

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสกัดแยกไอออนซีเรียมจากสารละลาย  
ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นายวิวัฒน์ ปัตทวิงกา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4142-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODELING OF CERIUM IONS EXTRACTION FROM AQUEOUS SOLUTION VIA HOLLOW FIBER  
SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



Mr. Weerawat Patthaveekongka

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2003

ISBN 974-17-4142-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์      แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสกัดแยกไอออนซีเรียมจากสารละลาย  
ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง  
โดย                              นายวีรวัฒน์ ปัตทวิทกคา  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย      อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....      อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

.....      กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติสุขภกร)

.....      กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชนันท์ สิริพัฒน์ไพบูลย์)

.....      กรรมการ  
(ดร.สิริมาภุ เลาะห์โรจนพันธ์)

วิวัฒน์ ปัททวิงคา : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสกัดแยกไอออนซีเรียมจากสารละลายผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. (MODELING OF CERIUM IONS EXTRACTION FROM AQUEOUS SOLUTION VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. อูรา ปานเจริญ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์, 133 หน้า. ISBN 974-17-4142-1

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane Process, HFSLM) เป็นกระบวนการหนึ่งในกรรมวิธีการสกัดแยกไอออนโลหะออกจากสารละลาย ซึ่งเป็นกระบวนการสกัดแยกที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถขยายกำลังการผลิตได้ง่ายด้วยการเพิ่มจำนวนหอสกัด โดยในงานวิจัยนี้ได้ค้นพบวิธีการใหม่สำหรับทำนายผลการสกัดของกระบวนการ โดยใช้วิธีการสร้างกราฟอย่างง่าย สามารถทำนายผลการสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด โดยได้ทำการพิสูจน์ผลของวิธีการที่ค้นพบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของกระบวนการ HFSLM สำหรับกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะ 4 ชนิด คือ 1. กระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออน โดยใช้สารสกัด TOA ในตัวทำละลาย Kerosene Jet A-1 เป็นเยื่อแผ่นเหลว และมีสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายสตริป 2. กระบวนการสกัดแยกนีโอดีเมียมไอออน โดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลาย Kerosene Jet A-1 เป็นเยื่อแผ่นเหลว และมีสารละลายกรดไนตริกเป็นสารละลายสตริป 3. กระบวนการสกัดแยกแลนทานัมไอออน โดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลาย Kerosene Jet A-1 เป็นเยื่อแผ่นเหลว และมีสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายสตริป และ 4. กระบวนการสกัดแยกแพลเลเดียมไอออน โดยใช้สารสกัด TRHCl-OA ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มเป็นเยื่อแผ่นเหลว และมีสารละลายโซเดียมไนไตรต์เป็นสารละลายสตริป

จากผลการทดลองศึกษาพบว่ากระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบหอสกัดเดี่ยว สามารถสกัดแยกซีเรียม นีโอดีเมียม แลนทานัม และแพลเลเดียมไอออนได้ถึง 32%, 47%, 46% และ 36% ตามลำดับ ส่วนในระบบสองหอสกัดกระบวนการสามารถสกัดแยกซีเรียม นีโอดีเมียม แลนทานัม และแพลเลเดียมไอออนได้ถึง 54%, 74%, 72% และ 60% ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟที่ได้เสนอนั้น พบว่าได้ผลสอดคล้องเป็นอย่างดีทั้งในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบหอสกัดเดี่ยวและแบบสองหอสกัด วิธีการดังกล่าวนี้สามารถพัฒนาเพื่อทำนายผลของกระบวนการในระบบหลายหอสกัดได้อีกด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4271820221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD : CERIUM / LIQUID MEMBRANE / EXTRACTION / HOLLOW FIBER / GRAPHICAL  
/ LANTHANUM / NEODYMIUM / PALLADIUM

WEERAWAT PATTHAVEEKONGKA : MODELING OF CERIUM IONS EXTRACTION  
FROM AQUEOUS SOLUTION VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D. Eng. Sc.

THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. SUTTICHA ASSABUMRUNGRAT, Ph. D.

133 pp. ISBN 974-17-4142-1

Hollow fiber supported liquid membrane (HFSLM) is the one of separation process which extracts metal ions from an aqueous solution. The process has high efficiency and can be scaled up simply by increasing number of modules. This research discovers a new technique which can efficiently predict the metal ions separation via HFSLM in both of a single column module and a double column module. This method is verified with the experimental results of the four metal ions extraction systems; i.e. 1) Cerium ions extraction via HFSLM process, using TOA, kerosene Jet A-1 and sulphuric acid as extractant, liquid membrane and stripping solution, respectively, 2) Neodymium ions extraction via HFSLM process, using D2EHPH, kerosene Jet A-1 and nitric acid as extractant, liquid membrane and stripping solution, respectively, 3) lanthanum ions extraction via HFSLM process, using D2EHPA, kerosene Jet A-1 and sulphuric acid as extractant, liquid membrane and stripping solution, respectively, 4) Palladium ions extraction via HFSLM process, using TRHCl-OA, chloroform and sodium nitrite as extractant, liquid membrane and stripping solution, respectively.

The experimental results showed that the HFSLM with the single column module can extract cerium, neodymium, lanthanum and palladium ions at 32, 47, 46 and 36%, respectively. For the double column module, the extractions are 54, 74, 72 and 60%, respectively. By comparing the experimental results with the values calculated from the proposed. Graphical solution technique, it was found that the graphical methods could precisely predict extraction percentage and the trend of the extraction results for both the single column module and the double column module of HFSLM. In addition, the simple graphical method was developed for predicting extraction in HFSLM with a multi column module.

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

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

Academic year ..... 2003 ..... Co-advisor 's signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ซึ่งได้ให้คำปรึกษาตลอดจนคำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และยังช่วยตรวจทานต้นฉบับวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชนันท์ ลิพิพัฒน์ไพบูลย์ และ ดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนอุดหนุนการวิจัย บริษัทไทยออยล์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนตัวทำละลาย Kerosene Jet A-1 ที่ใช้ในการวิจัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ นายทวี และนางวรรณ ปัตตวิคกคา ผู้ซึ่งให้กำเนิดและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน อีกทั้งยังให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน รวมทั้งพี่ๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คุณประภัสสร ใจใส คุณหริเนตร มุ่งพยาบาล และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการวิเคราะห์ตัวอย่าง อีกทั้งยังเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
สัญลักษณ์.....	ณ
บทที่	
<b>1 บทนำ</b> .....	1
1.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) .....	1
1.2 เยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane) .....	6
1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane, ELM) .....	10
1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane, ESPLM) .....	15
1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพองไว้ (Supported Liquid Membrane, SLM) .....	17
1.2.3.1 ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat Sheet) .....	18
1.2.3.2 ตัวรองรับชนิดเกลียววน (Spiral) .....	20
1.2.3.1 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) .....	22
1.3 ซีเรียม .....	27
1.3.1 แหล่งธาตุซีเรียมในธรรมชาติ .....	27
1.3.2 ประโยชน์ของซีเรียม .....	29
1.4 งานวิจัยที่ผ่านมา .....	31
1.5 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	35



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.6 ขอบเขตของงานวิจัย .....	35
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	36
1.8 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย .....	36
<b>2 ทฤษฎี</b> .....	<b>37</b>
2.1 กระบวนการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง .....	37
2.2 กระบวนการสกัดซีเรียมไอออนในห่อเดี่ยว .....	38
2.3 รูปแบบสมดุลการไหลในท่อ (Tubular Flow Model) .....	40
2.4 วิธีการสร้างกราฟสำหรับระบบหอสกัดเดี่ยว (Graphical Solution for One-Column System) .....	43
2.5 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบสองหอสกัด (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane System with Two Columns) .....	47
2.6 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบหลายหอสกัด (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane System with Multi Columns) .....	51
<b>3 การทดลอง</b> .....	<b>54</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	54
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	56
3.2.1 ชุดทดลองศึกษา .....	56
3.2.2 เครื่องมือตรวจวัด .....	58
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมืออื่นๆ .....	59
3.3 ลักษณะการปฏิบัติการ .....	59
3.3.1 ลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว (One Through Mode) .....	60
3.3.2 ลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบ (Circulating Mode) .....	61



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 วิธีการทดลอง .....	62
3.4.1 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารละลายป้อน .....	62
3.4.2 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายสตรีป .....	64
3.4.3 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในเยื่อแผ่นเหลว .....	66
3.4.4 การทดลองศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของสารละลายป้อน .....	68
3.4.5 การทดลองศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย .....	70
3.4.6 การทดลองศึกษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัด .....	71
3.4.7 การทดลองศึกษาการสกัดที่สภาวะคงตัว เพื่อหาค่าคงที่สมดุลการสกัด .....	74
<b>4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....</b>	<b>77</b>
4.1 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารละลายป้อน .....	77
4.2 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายสตรีป .....	80
4.3 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในเยื่อแผ่นเหลว .....	82
4.4 การทดลองศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของสารละลายป้อน .....	85
4.5 การทดลองศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย .....	87
4.6 การทดลองศึกษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัด .....	89
4.7 การทดลองศึกษาการสกัดที่สภาวะคงตัว เพื่อหาค่าคงที่สมดุลการสกัด .....	91
4.8 การคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัด (Graphical Solution for Single & Double Column System) .....	94
<b>5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>105</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	108
รายการอ้างอิง .....	109

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก (ข้อมูลผลการทดลอง).....	116
ภาคผนวก ข (ตัวอย่างการคำนวณ) .....	131
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	133



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย กับกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว ..... 25
1.2	แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ ..... 26
1.3	แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของซีเรียม ..... 28
3.1	แสดงรายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ..... 55
3.2	แสดงรายละเอียดสารเคมีแต่ละชนิดที่ใช้ในแต่ละกระบวนการสกัด ..... 56
3.3	แสดงรายละเอียดคุณลักษณะของชุดโมดูลเส้นใยกลวง ..... 58
3.4	สถานะที่เหมาะสมของการสกัดแยกไอออนโลหะแต่ละชนิดด้วย HFSLM ชุดนี้ ..... 76
4.1	แสดงค่าคงที่สมดุลของกระบวนการสกัดแยกไอออนชนิดต่างๆ ..... 93
4.2	ตารางสรุปผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสกัดของไอออนชนิดต่างๆ ..... 103
5.1	ตารางสรุปค่าคงที่สมดุลกระบวนการ และแสดงเปอร์เซ็นต์การสกัด ของไอออนชนิดต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการในระบบหอสกัดเดี่ยว กับระบบสองหอสกัด ..... 107
ก-1	ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารละลายป้อน ..... 117
ก-2	ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายสตรีป ..... 117
ก-3	ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในเยื่อแผ่นเหลว ..... 118
ก-4	ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของสารละลายป้อน ..... 118
ก-5	ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย ..... 119
ก-6	ข้อมูลผลการทดลองศึกษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัด ..... 120
ก-7	ข้อมูลผลการทดลองศึกษาการสกัดที่สถานะคงตัว เพื่อหาค่าคงที่สมดุลกระบวนการ ..... 121
ก-8	ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียม ไอออน ด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้ โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลในระบบหอสกัดเดี่ยว ..... 122

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-9	ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียม ไอออน ด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล และผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว ..... 123
ก-10	ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียม ไอออน ด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลในระบบสองหอสกัด ..... 124
ก-11	ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียม ไอออน ด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล และผลที่ได้จากการทดลองในระบบสองหอสกัด ..... 126
ก-12	ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียม ไอออน ด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล และผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัด ..... 127
ก-13	ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดแลนทานัม ไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลและผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัด ..... 128
ก-14	ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดนีโอดีเมียม ไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลและผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัด ..... 129
ก-15	ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดแพลเลเดียม ไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลและผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัด ..... 130

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ ในการสกัดด้วยตัวทำละลาย .....	2
1.2	แสดงขั้นตอนการสกัดด้วยเครื่องปฏิกรณ์การสกัดแบบอิมัลชัน .....	3
1.3	แสดงกลไกการถ่ายเทมวลของไอออน โลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลว .....	7
1.4	แสดงขั้นตอนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน .....	10
1.5	แสดงลักษณะของอิมัลชันซ้อน (Double Emulsion) และกลไกการถ่ายเทมวล ในอิมัลชันซ้อน .....	12
1.6	แสดงอิมัลชันซ้อนแบบ (น้ำ / น้ำมัน / น้ำ) และ (น้ำมัน / น้ำ / น้ำมัน) .....	13
1.7	แสดงลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต .....	15
1.8	แสดงรูปพหุรูปของตัวรองรับที่ทำจากวัสดุชนิดต่างๆ .....	18
1.9	แสดงภาพจำลองกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง .....	19
1.10	แสดงลักษณะของตัวรองรับชนิดเกลียววน และภาคตัดขวาง .....	21
1.11	แสดงภาพขยายขนาดของเส้นใยกลวงพอลิเมอร์ที่มีรูปพหุรูปภาค .....	23
1.12	แสดงภาพจำลองภาคตัดขวางของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง .....	24
2.1	แสดงแผนผังของชุดการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง .....	40
2.2	แผนผังของรูปแบบสมมูลการไหลในท่อ .....	41
2.3	แผนผังขั้นตอนการสกัดไอออน โลหะด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว .....	44
2.4	วิธีการสร้างกราฟทำนายผลการสกัดไอออน โลหะด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว .....	46
2.5	แผนผังขั้นตอนการสกัดไอออน โลหะด้วย HFSLM ในระบบสองหอสกัด .....	48
2.6	วิธีการสร้างกราฟทำนายผลการสกัดไอออน โลหะด้วย HFSLM ในระบบสองหอสกัด .....	49
2.7	วิธีการสร้างกราฟทำนายผลการสกัดไอออน โลหะด้วย HFSLM ในระบบหลายหอสกัด .....	52
3.1	แสดงชุดการทดลองการสกัดไอออน โลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง .....	57
3.2	แสดงรายละเอียดของตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ บนชุดการทดลอง HFSLM .....	57

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	แสดงรูปแบบการไหลแบบไหลสวนทางกัน ในโมดูลเส้นใยกลวง ..... 60
3.4	แสดงลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว (One Through Mode) ..... 61
3.5	แสดงลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบ (Circulating Mode) ..... 62
4.1	แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายป้อนที่ค่าต่างๆ เปรียบเทียบกับเวลา ..... 78
4.2	แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ที่ความเข้มข้นของ กรดซัลฟิวริกในสารละลายสตริปที่ค่าต่างๆ ..... 81
4.3	แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ที่ความเข้มข้นของ สารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดที่ค่าต่างๆ ..... 83
4.4	แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายป้อนที่ค่าต่างๆ ..... 85
4.5	แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ที่อัตราการไหล ของสารละลายค่าต่างๆ ..... 88
4.6	แสดงปริมาณยูเรียที่ตรวจพบในกระบวนการสกัดแยกซีเรียม ไอออน ด้วย HFSLM ที่เวลาต่างๆ..... 90
4.7	แสดงปริมาณซีเรียม ไอออนในวัฏภาคต่างๆ ของกระบวนการสกัดแยก ซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM..... 92
4.8	แสดงตัวอย่างผลการทำนายผลการสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ด้วยวิธีการฟิสิกส์ในระบบหอสกัดเดี่ยว..... 94
4.9	แสดงผลการสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองศึกษากับผลที่ได้จากการคำนวณ ด้วยวิธีการฟิสิกส์ที่ได้นำเสนอ..... 95

## สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	แสดงตัวอย่างผลการทำนายผลการสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ด้วยวิธีการในระบบสองหอสกัด..... 96
4.11	แสดงผลการสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ในระบบสองหอสกัด เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองศึกษากับผลที่ได้จากการคำนวณ ด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอ..... 97
4.12	ผลการสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว กับระบบสองหอสกัด..... 98
4.13	ผลการสกัดแยกแลนทานัม ไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว กับระบบสองหอสกัด..... 100
4.14	ผลการสกัดแยกนีโอดีเมียม ไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว กับระบบสองหอสกัด..... 101
4.15	ผลการสกัดแยกแพลเลเดียม ไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว กับระบบสองหอสกัด..... 102



## สัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

Ce	ซีเรียม (Cerium)
D2EHPA	สารสกัด Di (2-Ethylhexyl) Phosphate
F	สารละลายฟลูออรีน
kF	ค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยาการสกัด
kS	ค่าคงที่สมดุลปฏิกิริยาการนำกลับ
K	ค่าคงที่
La	แลนทานัม (Lanthanum)
M	ไอออนโลหะ
N	จำนวนรอบ
ml	มิลลิลิตร
mg	มิลลิกรัม
min	นาที
m, n	จำนวนโมล
Nd	นีโอดิเมียม (Neodymium)
Pd	แพลเลเดียม (Palladium)
RH	สารสกัด
S	สารละลายสตรีป
TOA	สารสกัด Trinornal Octylamine
TRHCL-OA	สารสกัด Thioridazine-HCL
[ ]	ความเข้มข้นของสารละลายนั้น
Q	อัตราการใช้
V	ปริมาตร

## ตัวยก

n จำนวน โมล

## ตัวห้อย

f สารละลายป้อน

Feed สารละลายป้อน

In ขาเข้า

Out ขาออก

n จำนวน โมล

s สารละลายสตรีป

Strip สารละลายสตรีป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

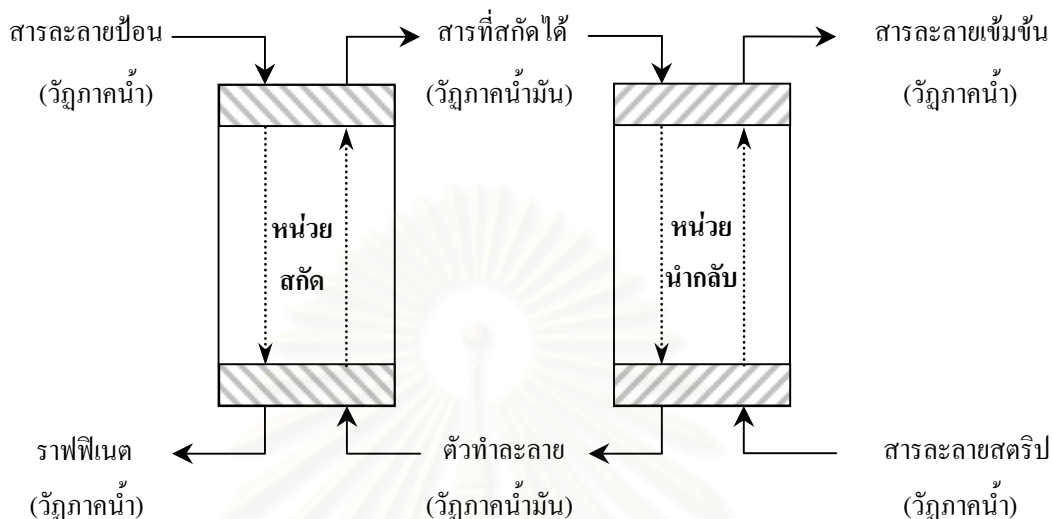
## บทนำ

กระบวนการแยกไอออนโลหะจากสารละลาย ได้รับความสนใจศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง อาทิเช่น กระบวนการตกตะกอนไอออนโลหะ (Metal Ions Precipitation Process) กระบวนการแยกไอออนโลหะด้วยไฟฟ้า (Metal Ions Electrolysis Process) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Process) กระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction Process) และกระบวนการแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่น (Membrane Process) เป็นต้น โดยในแต่ละกระบวนการต่างมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ความเหมาะสมในการเลือกใช้จึงขึ้นอยู่กับสถานะ เจือปนและองค์ประกอบต่างๆ ประกอบกันในการพิจารณาเลือกกระบวนการ อีกทั้งในแต่ละกระบวนการยังได้รับการพัฒนาอย่างเป็นลำดับและต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะออกจากสารละลายด้วยกระบวนการเยื่อแผ่น เพราะเป็นกระบวนการที่มีข้อได้เปรียบในหลายๆ ด้าน ซึ่งกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวเป็นหนึ่งในกระบวนการเยื่อแผ่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการแยกไอออนโลหะออกจากสารละลาย และมีศักยภาพสูงในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยหลักการของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจะอาศัยหลักการของเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดของวิธีการดังต่อไปนี้

### 1.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นเทคนิคการสกัดพื้นฐานที่อาศัยความสามารถในการละลายของสารในตัวทำละลายชนิดเดียวกันได้แตกต่างกันเป็นกลไกในการสกัด (หรืออาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบของสารที่ต้องการสกัดแยกกับสารสกัดในตัวทำละลาย เป็นหลักการร่วมได้) ซึ่งกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายนี้เป็นกระบวนการที่นิยมใช้มากในทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการสกัดแยกไอออนโลหะ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการปฏิบัติ

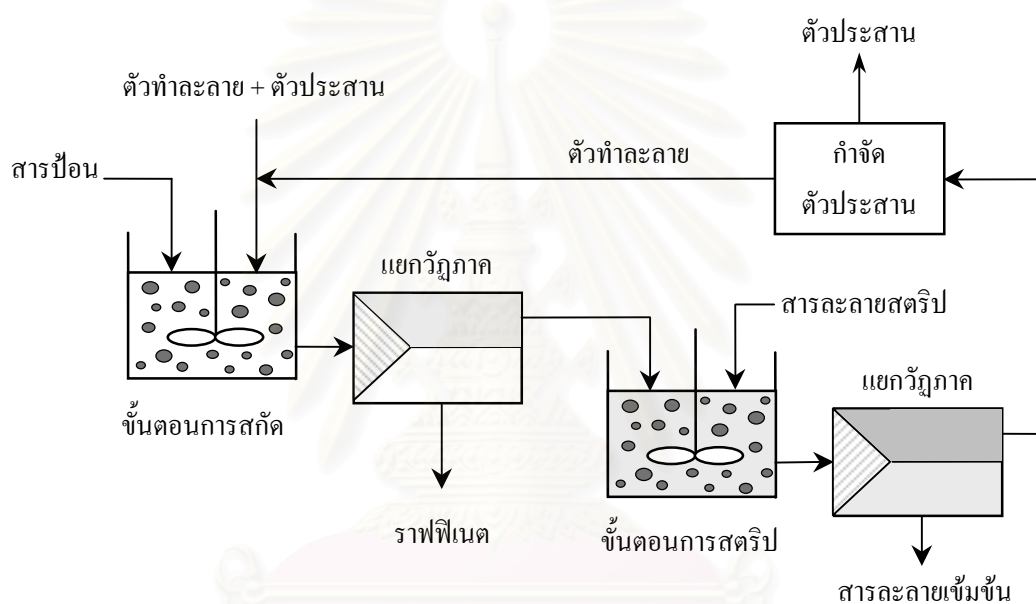
การและมีกำลังการผลิตสูง โดยทั่วไปกระบวนการจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการปฏิบัติการ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ ดังรูปที่ 1.1



**รูปที่ 1.1** แสดงขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ ในการสกัดด้วยตัวทำละลาย

จากรูปที่ 1.1 เป็นลักษณะการปฏิบัติการโดยทั่วไปของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งแสดงขั้นตอนการปฏิบัติการต่างๆ ของกระบวนการ โดยกระบวนการเริ่มต้นจากขั้นตอนการสกัดโดยป้อนสารละลายป้อน (Feed Solution) ซึ่งเป็นสารละลายที่เข้มข้นไปด้วยไอออนของสารที่ต้องการสกัดหรือตัวถูกละลาย (Solute) เข้าสู่หน่วยสกัดพร้อมกับป้อนตัวทำละลายซึ่งเป็นวัฏภาคที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันเข้าสู่หน่วยสกัดในสัดส่วนที่เหมาะสม วัฏภาคของสารละลายป้อนจะสัมผัสกับวัฏภาคของตัวทำละลาย (Solvent) ทำให้สารที่ต้องการสกัดเกิดการถ่ายเทมวลออกจากสารละลายป้อนไปสู่วัฏภาคของตัวทำละลาย อันเนื่องมาจากความสามารถในการละลายในตัวทำละลายชนิดเดียวกันได้แตกต่างกันของสาร ซึ่งการถ่ายเทมวลดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสอง โดยเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีปริมาณมากจะทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งวัฏภาคทั้งสองจะทำให้สัมผัสกันจนกระทั่งตัวทำละลายอิ่มตัวไปด้วยสารที่ต้องการสกัด จากนั้นจะแยกวัฏภาคทั้งสองออกจากกันโดยสารละลายป้อนจะมีความเข้มข้นของสารที่ต้องการสกัดลดลงซึ่งจะเรียกว่า “ราฟไฟเนต (Raffinate)” และจะป้อนออกจากกระบวนการ ในขณะที่

ตัวทำละลายซึ่งอิมตัวไปด้วยสารที่ต้องการสกัด (Extract) แล้วนั้นจะป้อนเข้าสู่หน่วยการนำกลับต่อไป โดยจะป้อนพร้อมกันกับสารละลายสตริป (Stripping Solution) เข้าสู่หน่วยการนำกลับดำเนินการตีกวนให้วัฏภาคทั้งสองสัมผัสกัน จนกระทั่งสารละลายสตริปนำกลับสารที่ต้องการออกจากตัวทำละลายจนอิมตัวและแยกวัฏภาคทั้งสองออกจากกัน โดยที่สารละลายสตริปเมื่อผ่านหน่วยการนำกลับแล้วจะเข้มข้นไปด้วยสารที่ต้องการดังนั้นจึงเรียกว่า “สารละลายเข้มข้น (Concentrate)” ส่วนตัวทำละลายที่ผ่านหน่วยการนำกลับแล้ว จะถูกป้อนไหลกลับไปยังขั้นตอนการสกัดเพื่อนำตัวทำละลายกลับไปใช้ซ้ำต่อไป โดยกระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงขั้นตอนการสกัดด้วยเครื่องปฏิกรณ์การสกัดแบบอิมัลชัน

การถ่ายเทมวลของกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย จะเกิดการถ่ายเทมวลที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเป็นสำคัญ ดังนั้นประสิทธิภาพในการแยกของกระบวนการนี้จึงขึ้นอยู่กับวิธีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสอง จึงก่อให้เกิดการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) ของกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายอยู่มากมายหลายชนิดอาทิเช่น เครื่องปฏิกรณ์การสกัดแยกด้วยใบกวน (Agitator Tank) หรือเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อเครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซตเตอร์ (Mixer Settler) เครื่องปฏิกรณ์การสกัดแบบหอสกัด (Extraction Column) และเครื่องปฏิกรณ์การสกัดแบบอิมัลชัน เป็นต้น

จากรูปที่ 1.2 เป็นกระบวนการสกัดแยกด้วยเครื่องปฏิกรณ์การสกัดแบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water in oil, W/O) ซึ่งมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลายน้ำ (Aqueous Phase) กระบวนการเริ่มต้นโดยสารละลายป้อนซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลายและเข้มข้นไปด้วยสารที่ต้องการสกัดป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดผสมกับตัวทำละลายซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ (Organic Phase) ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันในถังปฏิกรณ์การสกัด ภายในถังปฏิกรณ์การสกัดจะตีควนวัฏภาคทั้งสองให้อยู่ในรูปของอิมัลชัน (Emulsion) ซึ่งเป็นหยดของสารละลายป้อนขนาดเล็กที่มีวัฏภาคสารอินทรีย์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบและคงรูปเป็นอิมัลชันด้วยการเติมตัวประสาน (Surfactant) โดยพื้นที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคทั้งสองที่สัมผัสกันรอบเม็ดอิมัลชัน จะเป็นพื้นที่สำหรับถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาคนั้นคือพื้นที่ผิวทรงกลมของหยดอิมัลชันนั่นเอง สารที่ต้องการสกัดในสารละลายป้อนจะเกิดการถ่ายเทมวลผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสองรอบผิวอิมัลชัน จนกระทั่งวัฏภาคของสารอินทรีย์อิมัลชันไปด้วยสารที่ต้องการสกัด จากนั้นจะแยกวัฏภาคทั้งสองออกจากกันในขั้นตอนการแยกวัฏภาค โดยที่วัฏภาคของสารละลายป้อนหลังจากผ่านขั้นตอนการสกัดแล้วจะมีความเข้มข้นของสารที่ต้องการสกัดลดลงและถ่ายเทออกจากกระบวนการออกไป ส่วนวัฏภาคของสารอินทรีย์ที่อิมัลชันไปด้วยสารที่ต้องการสกัดแล้วนั้น จะป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการนำกลับพร้อมๆ กันกับสารละลายสตรีป ซึ่งมีวัฏภาคแตกต่างกับสารอินทรีย์จึงไม่ละลายซึ่งกันและกันในถังปฏิกรณ์การนำกลับ โดยภายในถังปฏิกรณ์การนำกลับวัฏภาคทั้งสองจะถูกตีควนให้เกิดเป็นอิมัลชัน และคงรูปอิมัลชันด้วยการเติมตัวประสาน ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของสารที่ต้องการออกจากวัฏภาคสารอินทรีย์ไปสู่วัฏภาคสารละลายสตรีป จนกระทั่งวัฏภาคสารละลายสตรีปอิมัลชันไปด้วยสารที่ต้องการสกัด ต่อจากนั้นจะแยกวัฏภาคทั้งสองออกจากกัน โดยสารละลายสตรีปหลังจากผ่านขั้นตอนการนำกลับแล้วจะเข้มข้นไปด้วยสารที่ต้องการ ส่วนวัฏภาคสารอินทรีย์จะมีความเข้มข้นของสารที่ต้องการสกัดเจือจางลง และจะถูกปรับสภาพด้วยขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน เพื่อนำสารอินทรีย์กลับไปใช้ซ้ำในขั้นตอนการสกัดต่อไป

จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีความสำคัญต่อการถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมตัวประสานหรือสารลดแรงตึงผิว



เพื่อรักษาเสถียรภาพของเม็ดอิมัลชันเอาไว้จนกระทั่งเกิดการถ่ายเทมวลผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง  
 วัฏภาคจนอิมัลชัน โดยในกระบวนการวัฏภาคของสารละลายจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง มีวัฏภาคภายใน  
 เป็นวัฏภาคสารละลาย ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ชอบน้ำ  
 (Hydrophobic Surfactant) ในทางกลับกันหากกระบวนการมีวัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อ  
 เนื่อง และมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลายแล้ว ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลด  
 แรงตึงผิวชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant)

แม้ว่าสารลดแรงตึงผิวจะมีความสำคัญอย่างมาก โดยจะช่วยผสานผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค  
 ต่างๆ ทำให้หยดอิมัลชันมีเสถียรภาพคงรูปอยู่ได้และทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาครอบ  
 หยดอิมัลชันนั้น แต่สารลดแรงตึงผิวดังกล่าวจะก่อตัวกลายเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายเทมวลข้าม  
 วัฏภาค หรืออาจเรียกว่าเกิดเป็นชั้นต้านทานการถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาค ทำให้กระบวนการมีประ  
 สติภาพด้อยลง อีกทั้งในขั้นตอนการแยกวัฏภาคทั้งสองออกจากกันและขั้นตอนการบำบัดสาร  
 อินทรีย์ที่ใช้งานแล้ว เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ยังมีความยุ่งยากในการปฏิบัติ โดยทั่วไปการบำบัดสาร  
 อินทรีย์ที่ใช้งานแล้วจะมีวิธีปฏิบัติอยู่ 2 วิธีคือวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพ โดยวิธีทางเคมีจะ  
 กระทำโดยเติมสารลดการประสาน (Demulsifier) ซึ่งจะทำให้ตัวประสานแยกออกจากสารอินทรีย์  
 ได้ดี แต่สารอินทรีย์ที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธีการนี้จะมีคุณภาพด้อยลง ทำให้สามารถนำกลับมาใช้  
 งานใหม่ได้น้อยครั้งลง ส่วนวิธีทางกายภาพเป็นการบำบัดด้วยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ซึ่งผล  
 ที่ได้จากการบำบัดด้วยวิธีการนี้ สามารถแยกวัฏภาคและทำลายโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวได้ดี  
 อีกทั้งสารเคมีในกระบวนการมีคุณภาพด้อยลงเพียงเล็กน้อย แต่อุปกรณ์ที่ใช้มีความยุ่งยากซับซ้อน  
 มีอันตรายสูง อีกทั้งยังมีราคาสูงอีกด้วย

จะเห็นว่ากระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย ถึงแม้จะเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการปฏิบัติ  
 และมีกำลังการผลิตสูง ซึ่งเหมาะสมในการพัฒนาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมก็ตาม แต่ยังมี  
 ข้อด้อยอยู่เช่นกันนั่นคือ ขั้นตอนของกระบวนการมีมากมายหลายขั้นตอน การสกัดมีประสิทธิภาพ  
 ต่ำเนื่องจากข้อจำกัดของสมดุลระหว่างวัฏภาคที่ผิวสัมผัส นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการเลือก

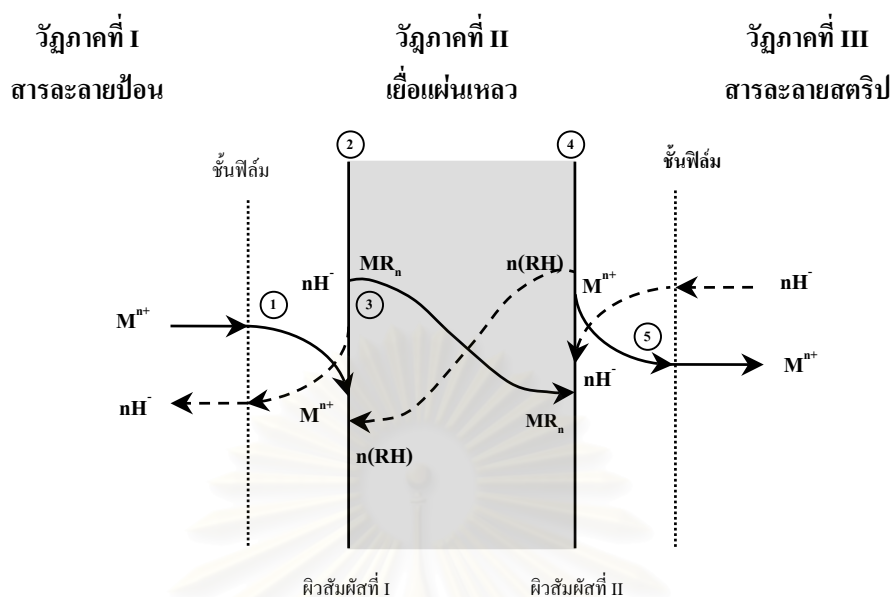


สกัดต่ำ อีกทั้งยังใช้สารเคมีและพลังงานในปริมาณสูงอีกด้วย ดังนั้นการพัฒนาขยายขีดจำกัดในการถ่ายเทมวล เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลตามกลไกการสกัดอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยรวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายให้เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน กลายเป็นขั้นตอนเดียว จึงเป็นจุดริเริ่มในการพัฒนาและนำไปสู่กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวตามลำดับ

## 1.2 เยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวเป็นเยื่อแผ่น (Membrane) ชนิดหนึ่งในกระบวนการแยกสาร โดยที่ตัวเยื่อเป็นของเหลวที่สามารถขวางกั้นสาร 2 วัฏภาคเอาไว้ได้และเกิดการแยกชั้น ซึ่งกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวเป็นกระบวนการสกัดแยกสารที่ได้รับการพัฒนามาจากกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ดังนั้นกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจึงมีกลไกการแยกสารโดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกันกับกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย นั่นคืออาศัยหลักความสามารถในการละลายของสารในตัวทำละลายได้แตกต่างกัน หรืออาศัยการเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดในตัวทำละลายร่วมด้วย โดยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวเป็นกระบวนการซึ่งรวมขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายรวมไว้เป็นขั้นตอนเดียวกัน ทำให้เกิดการสกัดและการนำกลับอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนเดียว โดยกลไกการถ่ายเทมวลของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.3

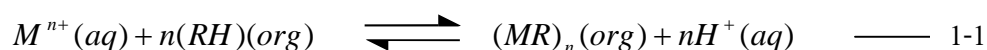
จากรูปที่ 1.3 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลว โดยกระบวนการจะประกอบไปด้วยสาร 3 วัฏภาค นั่นคือ วัฏภาคสารละลายป้อน วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและวัฏภาคสารละลายสกัด ซึ่งวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างวัฏภาคของสารละลายป้อนและวัฏภาคของสารละลายสกัด โดยผิวสัมผัสที่ I และ II เป็นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสองด้านของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคของไอออนโลหะนั่นเอง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคจะเกิดขึ้นฟิล์มบางๆ เพื่อแสดงถึงขอบเขตบริเวณอิทธิพลการแพร่ของสารใกล้ผิวสัมผัส โดยกลไกการถ่ายเทมวลของกระบวนการประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 1.3 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลว

ขั้นตอนที่หนึ่ง จากรูปที่ 1.3 แสดงได้ด้วยสัญลักษณ์ ① เป็นขั้นตอนที่ไอออนโลหะซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $M^{n+}$  จากกระแสวัฏภาคของสารละลายป้อนแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางๆ ไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัสที่ I) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะ (Concentration Gradient) ไปสู่บริเวณผิวสัมผัสที่ I

ขั้นตอนที่สอง จากรูปที่ 1.3 แสดงได้ด้วยสัญลักษณ์ ② เป็นขั้นตอนที่ไอออนโลหะบริเวณผิวสัมผัสที่ I หลังจากแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมาแล้ว จะเกิดการปฏิกิริยาสารสกัด เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะ ( $MR_n$ ) และไฮโดรเนียมไอออน ( $nH^+$ ) โดยปฏิกิริยาการสกัดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสที่ I สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1-1



โดยที่อักษรย่อ *aq* แทนวัฏภาคสารละลาย (Aqueous Phase) ส่วนอักษรย่อ *org* แทนวัฏภาคของสารอินทรีย์ (Organic Phase) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดดำเนินไปข้างหน้าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1-2

$$r_{ex,forward} = k_{1ex}[M^{n+}][RH]^n \quad \text{--- 1-2}$$

และสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดดำเนินย้อนกลับแสดงได้ดังสมการที่ 1-3

$$-r_{ex,forward} = k_{2ex}[MR_n][H^+]^n \quad \text{--- 1-3}$$

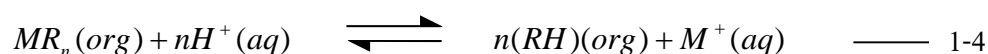
โดยที่ *RH* แทนสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว

$k_{1ex}$  แทนค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดไปข้างหน้า

$k_{2ex}$  แทนค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดย้อนกลับ

ขั้นตอนที่สาม จากรูปที่ 1.3 แสดงได้ด้วยสัญลักษณ์ ③ เป็นขั้นตอนที่สารประกอบเชิงซ้อนของสารสกัดกับไอออนโลหะ ( $MR_n$ ) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสกัดบริเวณผิวสัมผัสที่ I แพร่ผ่านชั้นความหนาของเยื่อแผ่นเหลว อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน (Concentration Gradient) ไปสู่บริเวณผิวสัมผัสที่ II

ขั้นตอนที่สี่ จากรูปที่ 1.3 แสดงได้ด้วยสัญลักษณ์ ④ เป็นขั้นตอนที่สารประกอบเชิงซ้อนหลังจากแพร่ผ่านชั้นความหนาของเยื่อแผ่นเหลวมายังบริเวณผิวสัมผัสที่ II แล้วนั้น จะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับกับสารละลายสตริป ทำให้ไอออนโลหะถ่ายเทมวลออกจากเยื่อแผ่นเหลว ณ บริเวณผิวสัมผัสที่ II ซึ่งปฏิกิริยาการนำกลับสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1-4



โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับดำเนินไปข้างหน้าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1-5

$$r_{re,forward} = k_{1re} [MR_n][H^+]^n$$

และสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับดำเนินย้อนกลับสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1-6

$$-r_{re,reverse} = k_{2re} [M^{n+}][RH]^n \quad \text{--- 1-6}$$

โดยที่  $k_{1re}$  แทนค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับไปข้างหน้า

$k_{2re}$  แทนค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับย้อนกลับ

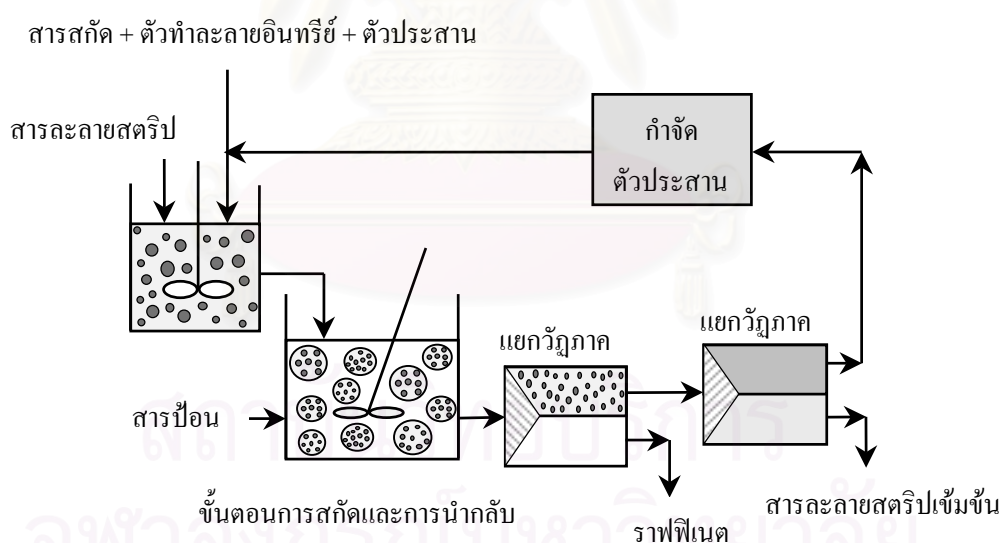
และขั้นตอนที่ห้า จากรูปที่ 1.3 แสดงได้ด้วยสัญลักษณ์ ⑤ เป็นขั้นตอนที่ไอออนโลหะหลั่งจากถ่ายเทมวลออกจากเยื่อแผ่นเหลวที่บริเวณผิวสัมผัสที่ II แล้วนั้น จะแพร่ออกจากบริเวณผิวสัมผัสที่ II ผ่านชั้นฟิล์มบางไปสู่กระแสสารละลายสตริป ด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะ (Concentration Gradient) ที่ถ่ายเทมวลออกมา

จากกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะผ่านกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวดังรูปที่ 1.3 ดังกล่าวข้างต้นเมื่อไอออนเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะบริเวณผิวสัมผัสที่ II เกิดปฏิกิริยาการนำกลับนั้น จะเป็นการทำลายพันธะของสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ไอออนโลหะถ่ายเทมวลออกจากภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลว และสารสกัดจะมีสภาพกลับคืนสู่ภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลวตามลำดับ โดยสารสกัดหลังจากแยกออกจากสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวแล้ว จะแพร่อ้อนกลับออกจากบริเวณผิวสัมผัสที่ II ไปสู่ผิวสัมผัสที่ I ดังเดิมอันเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารสกัดนั้นและดำเนินการสกัดตามกลไกทั้ง 5 ขั้นตอนเข้าไป ด้วยแรงขับของกระบวนการจากความแตกต่างของความเป็นกรด-ด่าง (pH Gradient) ซึ่งเป็นสภาวะของกระบวนการและความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) อย่างต่อเนื่องต่อไป

โดยทั่วไปกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane, ELM หรือ Liquid Surfactant Membrane), เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane, ESPLIM) และเยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพยุงไว้ (Supported Liquid Membrane, SLM หรือ Immobilized Liquid Membrane) โดยเยื่อแผ่นเหลวทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะรายละเอียดโดยทั่วไปดังนี้

### 1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane, ELM)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันได้รับการพัฒนามาจาก กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นลำดับแรก โดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้มีชื่อเรียกด้วยกันหลายชื่ออาทิเช่น เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane, ELM) เยื่อแผ่นเหลวชนิดตัวประสาน (Liquid Surfactant Membrane, LSM) หรือ เยื่อแผ่นเหลวแบบเคลื่อนตัว (Mobilized Liquid Membrane, MLM) เป็นต้น



รูปที่ 1.4 แสดงขั้นตอนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน

โดยกระบวนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันนี้ จะมีลักษณะการปฏิบัติการเช่นเดียวกันกับการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดอิมัลชัน แต่จะรวมขั้นตอนการสกัดและ

ขั้นตอนการนำกลับไว้เป็นขั้นตอนเดียวกัน โดยทำให้เกิดเป็นอิมัลชันซ้อน (Double Emulsion) ซึ่งเป็นเทคนิคในการปฏิบัติการของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ เพื่อให้การสกัดและการนำกลับรวมเป็นขั้นตอนเดียวกันได้ จึงเป็นการลดขั้นตอนการปฏิบัติการ เกิดการถ่ายเทมวลอย่างต่อเนื่องเป็นผลให้กระบวนการสกัดแยกมีประสิทธิภาพมากขึ้น

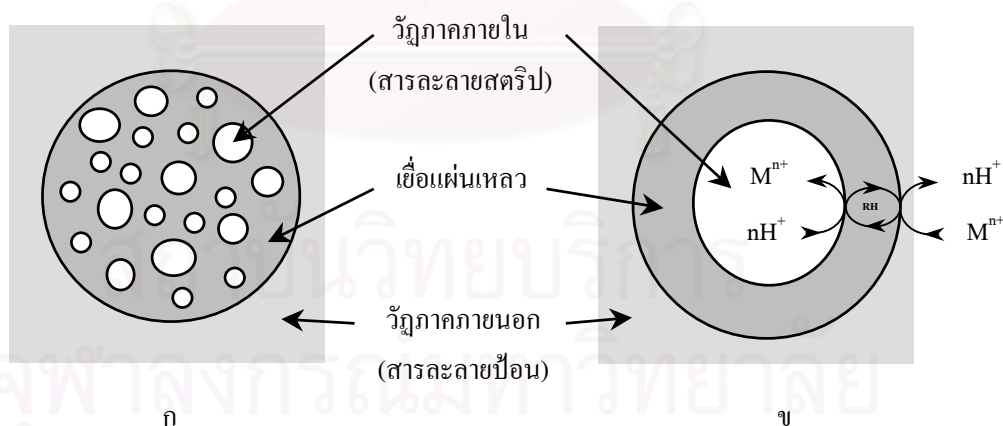
จากรูปที่ 1.4 เป็นกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันแบบน้ำ/น้ำมัน/น้ำ (Water/Oil/Water, W/O/W) นั่นคือมีวัฏภาคภายในเป็นหยดอิมัลชันขนาดเล็กของวัฏภาคสารละลาย (สารละลายสตริป) ซึ่งหยดอิมัลชันของสารละลายดังกล่าวจะมีวัฏภาคสารอินทรีย์ล้อมรอบเอาไว้ โดยหลังจากนั้นแล้วกลุ่มอิมัลชันในสารอินทรีย์ที่ได้ถูกหยอดลงในวัฏภาคของสารละลายอีกชนิดหนึ่ง (สารละลายป้อน) เป็นผลให้กลุ่มอิมัลชันในสารอินทรีย์ที่ได้จะล้อมรอบไว้ด้วยวัฏภาคของสารละลายอีกครั้งหนึ่ง เกิดเป็นอิมัลชันซ้อนได้นั่นเอง โดยกระบวนการลักษณะนี้วัฏภาคของสารอินทรีย์จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง รายละเอียดของกระบวนการจะประกอบไปด้วยสาร 3 วัฏภาคนั่นคือ วัฏภาคแรกเป็นวัฏภาคสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายที่เข้มข้นไปด้วยองค์ประกอบของสารที่ต้องการสกัด วัฏภาคที่สองคือวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากการผสมระหว่างสารสกัดกับตัวทำละลายอินทรีย์ในสัดส่วนที่เหมาะสม และวัฏภาคที่สามคือวัฏภาคสารละลายสตริป ซึ่งเป็นสารนำกลับขององค์ประกอบที่ต้องการสกัด ให้แยกออกจากวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว วิธีการดำเนินการเริ่มจากป้อนสารละลายสตริปผสมกับสารอินทรีย์ซึ่งต่างวัฏภาคกัน จึงไม่ละลายซึ่งกันและกัน จากนั้นจึงตีคววนให้เกิดอิมัลชันซึ่งเป็นหยดขนาดเล็กของสารละลายสตริปที่มีสารอินทรีย์ห่อหุ้มเอาไว้ และเพิ่มเสถียรภาพของหยดอิมัลชันเอาไว้ด้วยสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) หลังจากนั้นจะป้อนกลุ่มอิมัลชันที่ได้ผสมกับสารละลายป้อนและตีคววนเพื่อให้เกิดอิมัลชันซ้อน ทำให้ขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับเกิดขึ้นได้พร้อมๆ กันตามกลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวดังรูปที่ 1.3 ต่อไป

กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันนี้ เยื่อแผ่นเหลวจะมีการเคลื่อนตัวตลอดเวลาจึงเป็นสาเหตุทำให้สามารถเรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้ชื่อหนึ่งคือ เยื่อแผ่นเหลวแบบ



เคลื่อนตัว (Mobilized Liquid Membrane) และเรียกวิฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวว่าเป็นวิฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) อีกทั้งในกระบวนการสกัดจำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อรักษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นจึงทำให้สามารถเรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้ชื่อหนึ่งเป็นเยื่อแผ่นเหลวชนิดตัวประสาน (Liquid Surfactant Membrane) ได้อีกด้วย

จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นเมื่อกลุ่มอิมัลชันเกิดการสกัดและการนำกลับตามกลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแล้ว จะทำการแยกวิฏภาคต่างๆ ออกจากกันในหน่วยแยกวิฏภาค โดยในหน่วยแยกวิฏภาคแรกจะแยกสารละลายป้อนให้ออกจากกระบวนการออกไป จากนั้นวิฏภาคที่เหลือซึ่งเป็นวิฏภาคของสารอินทรีย์ที่มีกลุ่มอิมัลชันสารละลายสตริปอยู่ภายใน จะป้อนเข้าสู่หน่วยแยกวิฏภาคลำดับต่อมา เพื่อแยกวิฏภาคสารละลายสตริปที่เข้มข้นไปด้วยองค์ประกอบของสารที่ต้องการออกจากวิฏภาคของสารอินทรีย์ และป้อนออกจากกระบวนการออกไป จากนั้นสารอินทรีย์หลังจากแยกวิฏภาคออกมาแล้วจะป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน เพื่อนำสารอินทรีย์กลับไปใช้ซ้ำในกระบวนการต่อไป โดยลักษณะการเกิดอิมัลชันซ้อนในกระบวนการสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.5

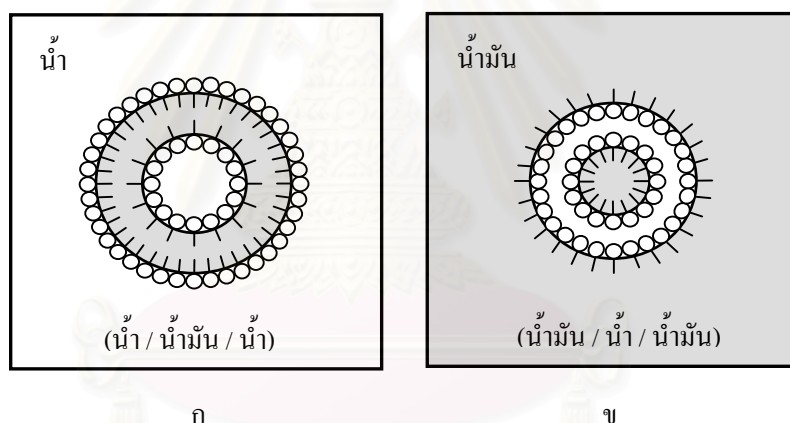


รูปที่ 1.5 แสดงลักษณะของอิมัลชันซ้อน (Double Emulsion) และกลไกการถ่ายโอนมวลในอิมัลชันซ้อน

จากรูปที่ 1.5 แสดงลักษณะการเกิดอิมัลชันซ้อนของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน โดยในรูปย่อย ก แสดงหยดขนาดใหญ่ของสารอินทรีย์ที่มีกลุ่มหยดอิมัลชันสารละลาย



สตริปขนาดเล็ๆ ในวัฏภาคของสารละลายป้อน และในรูปย่อย ข แสดงส่วนขยายของหนึ่งหยดอิมัลชันขนาดเล็กในวัฏภาคสารละลาย โดยที่วัฏภาคภายในของหยดอิมัลชันขนาดเล็กนี้จะเรียกว่าวัฏภาคภายใน (Internal Phase) ซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายสตริปและถูกห่อหุ้มไว้ด้วยเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ ที่มีวัฏภาคแตกต่างกันจึงไม่ละลายซึ่งกันและกันทำให้สามารถห่อหุ้มหยดสารละลายสตริปเอาไว้ได้ โดยมีสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่ชอบน้ำทำหน้าที่ช่วยให้หยดอิมัลชันมีเสถียรภาพ จากนั้นจะป้อนกลุ่มอิมัลชันที่ได้นี้ผสมลงในวัฏภาคของสารละลายป้อน ซึ่งมีวัฏภาคแตกต่างจากวัฏภาคสารอินทรีย์จึงไม่ละลายซึ่งกันและกันทำให้สามารถห่อหุ้มกลุ่มอิมัลชันในสารอินทรีย์เอาไว้ได้ เกิดเป็นอิมัลชันซ้อน โดยมีสารลดแรงตึงผิวชนิดชอบน้ำทำหน้าที่รักษาเสถียรภาพของอิมัลชันซ้อนที่เกิดขึ้นเอาไว้ได้นั่นเอง โดยลักษณะการใช้ตัวประสาน ในการรักษาเสถียรภาพของเม็ดอิมัลชันแสดงได้ดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 แสดงอิมัลชันซ้อนแบบ (น้ำ / น้ำมัน / น้ำ) และ (น้ำมัน / น้ำ / น้ำมัน)

จากรูปที่ 1.6 แสดงส่วนขยายของหนึ่งหยดอิมัลชันขนาดเล็ก ซึ่งลักษณะการเกิดอิมัลชันซ้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดแรกเป็นชนิดที่วัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลายสตริป โดยมีวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ห่อหุ้มเอาไว้ และทำให้กระจายตัวในสารละลายป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายน้ำ โดยวัฏภาคของสารละลายป้อนจะห่อหุ้มกลุ่มของอิมัลชันขนาดเล็กในสารอินทรีย์อีกลำดับหนึ่งเกิดเป็นอิมัลชันซ้อนขึ้น ดังนั้นระบบการสกัดจะมีการเรียงลำดับของวัฏภาคเป็น น้ำ-น้ำมัน-น้ำ (Water-Oil-Water, W/O/W) มีกระบวนการตาม

ขั้นตอนการสกัดรูปที่ 1.4 และมีลักษณะการเกิดอิมัลชันซ้อนในแต่ละหยดอิมัลชันเล็กๆ ดังรูปย่อย ก ในรูปที่ 1.6

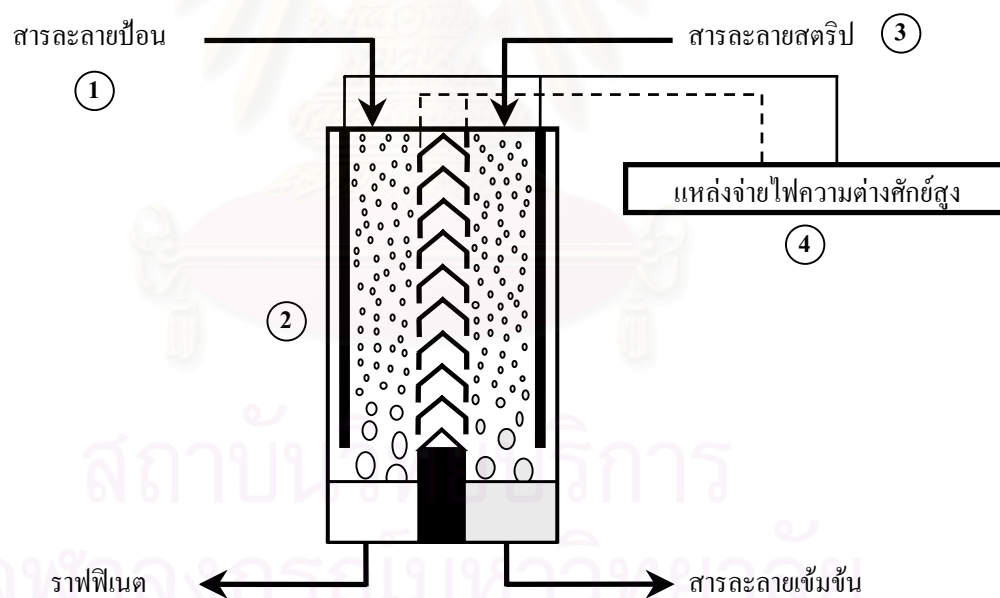
ส่วนอิมัลชันซ้อนชนิดที่สองเป็นชนิดที่วัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ ดังนั้นกระบวนการจะมีการเรียงลำดับของวัฏภาคเป็น น้ำมัน-น้ำ-น้ำมัน (Oil-Water-Oil, O/W/O) แสดงได้ดังรูปย่อย ข ในรูปที่ 1.6 ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวซึ่งเป็นตัวประสานเพื่อรักษาเสถียรภาพของอิมัลชันเอาไว้ จึงมีด้วยกัน 2 ชนิดเช่นเดียวกันคือ ชนิดที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) สำหรับอิมัลชันชนิด น้ำมัน-น้ำ (O/W) และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) สำหรับอิมัลชันชนิด น้ำ-น้ำมัน (W/O) กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันจะมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงมาก แต่มีปัญหาในการรักษาเสถียรภาพของอิมัลชัน ดังนั้นในกระบวนการจึงจำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อรักษาเสถียรภาพของการเกิดอิมัลชันเอาไว้

ถึงแม้ว่าสารลดแรงตึงผิวหรือตัวประสานจะช่วยรักษาเสถียรภาพของหยดวัฏภาคต่างๆ ให้คงรูปอยู่เป็นอิมัลชันไว้ได้ แต่พบว่าสารลดแรงตึงผิวหรือตัวประสานที่ใช้ จะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของหยดอิมัลชันโดยรอบดังรูปที่ 1.6 ซึ่งชั้นฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวนี้จะขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวล ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าลดต่ำลงแม้ว่าสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรจะมีค่าสูงมากก็ตาม อีกทั้งขั้นตอนการแยกวัฏภาคออกจากกันกระทำได้ยากและต้องใช้วิธีการกำจัดตัวประสาน โดยการกำจัดสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกกำจัดตัวประสานด้วยวิธีทางเคมี สามารถกระทำได้โดยเติมสารลดการประสานเพื่อทำลายพันธะของตัวประสาน วิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงแต่ทำให้คุณสมบัติของของเหลวในระบบเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีคุณภาพลดต่ำลงและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนวิธีที่สองเป็นการกำจัดตัวประสานด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นการใช้ประจุไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเพื่อทำลายพันธะของตัวประสาน ซึ่งวิธีนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างดี คุณสมบัติของของเหลวเปลี่ยนแปลงน้อย แต่อุปกรณ์มีความยุ่งยากซับซ้อนและมีราคาสูง อีกทั้งยังมีอันตรายสูงอีกด้วย ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยง

การใช้สารลดแรงตึงผิวในการรักษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว จึงมีการพัฒนารูปแบบต่างๆ ของกระบวนการเพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงขึ้นนั่นเอง

### 1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane, ESPLIM)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตเป็นเยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพัฒนาจากเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายในเครื่องปฏิกรณ์แบบหอสกัด (ชนิดหอสกัดแบบหยด) ร่วมกับหลักการไฟฟ้าสถิต และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวรวมเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้ อาทิ เช่น ลดจำนวนขั้นตอนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ลดปัญหาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น โดยลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แสดงลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต

จากรูปที่ 1.7 แสดงลักษณะต่างๆ ของชุดอุปกรณ์ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต ชุดอุปกรณ์โดยทั่วไปประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ อยู่ 4 ส่วน นั่นคือส่วนที่ 1 เป็นส่วนสาร

ละลายป้อนซึ่งประกอบไปด้วย ภาชนะบรรจุสารละลายป้อนเข้าหอสกัดและภาชนะบรรจุสารละลายป้อนออกจากหอสกัดซึ่งเรียกว่า “ราฟฟินेट” ตามลำดับ ส่วนที่ 2 คือส่วนของหอสกัดเป็นถึงปฏิกรณ์ที่ทำขึ้นเป็นพิเศษโดยภายในหอสกัดจะแบ่งเป็น 2 เซลล์คือเซลล์สกัดและเซลล์สตริป โดยมีแผ่นกั้น (Baffle Plate) ซึ่งเป็นวัสดุนำไฟฟ้ามีลักษณะเป็นตัวอักษรรูปตัว V คว่ำเรียงต่อกัน เว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่าๆ กันโดยมีลวดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอาไว้ ซึ่งสามารถวางกั้นเซลล์สกัดและเซลล์สตริปเอาไว้แล้ว ยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วย บริเวณส่วนล่างของแผ่นกั้นจะเป็นแผ่นวัสดุทึบสำหรับแบ่งช่องเซลล์ ซึ่งเป็นแหล่งรวมของวัฏภาคกราฟไฟเนตกับวัฏภาคสารละลายเข้มข้นเอาไว้ก่อนถ่ายเทออกจากหอสกัด โดยในเซลล์สกัดและเซลล์สตริปจะมีแท่งวัสดุนำไฟฟ้าซึ่งจะใช้เป็นขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มแช่อยู่เซลล์ละหนึ่งอัน โดยจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตต่อไป ส่วนที่ 3 เป็นส่วนสารละลายสตริป ซึ่งประกอบไปด้วย ภาชนะบรรจุสารละลายสตริปเข้าหอสกัดและภาชนะบรรจุสารละลายสตริปออกจากหอสกัดซึ่งเรียกว่า “สารละลายเข้มข้น” ตามลำดับ และส่วนที่ 4 คือส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

ขั้นตอนการปฏิบัติการจะเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัดกับตัวทำละลายอินทรีย์ ในถึงปฏิกรณ์จนได้ระดับปริมาตรตามที่ต้องการ โดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี้อาจเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง จ่ายกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต จากนั้นป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปพร้อมกันเป็นหยดขนาดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาค เมื่อหยดขนาดเล็กของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลวแล้ว จะทำให้เกิดการสกัดแยกและนำกลับองค์ประกอบที่ต้องการได้ ตามกลไกการสกัดและการนำกลับของกระบวนการเยื่อแผ่น โดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตเป็นปัจจัยส่งเสริมให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ถึงปฏิกรณ์ที่ใช้จะออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ โดยหากมีหยดของสารละลายป้อนหรือสารละลายสตริปหลุดเข้าไปในช่องของแผ่นกั้น ซึ่งทำหน้าที่กั้นวัฏภาคทั้งสองเอาไว้ นั่นหยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนตัวไปรวมกันได้ เนื่องจาก

สนามไฟฟ้าสถิตความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำทำให้หยดวิภาคของสารละลายที่อยู่บริเวณใกล้ๆ กันรวมตัวกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของวิภาคสารละลาย เป็นเหตุให้หยดสารละลายมีน้ำหนักมากขึ้นจึงอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดของโลกมากกว่าอิทธิพลจากการแพร่ไปยังเซลล์ถัดไป ดังนั้นหยดสารละลายจึงตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก อีกทั้งแผ่นกั้นที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษจะช่วยให้หยดของสารละลายต่างๆ ที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้น ให้รวมตัวกันเองและตกกลับไปยังเซลล์ของมันตามเดิมอีกด้วย

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตจะมีข้อดีอยู่มากมาย อาทิเช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวิภาคต่างๆ ต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ อาทิเช่น ขนาดและการกระจายตัวของหยดวิภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรต่ำ วิภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ และใช้กับกระบวนการที่วิภาคของสารอินทรีย์เป็นวิภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่ากระบวนการยังมีกำลังการผลิตต่ำ และปัญหาทางด้านความปลอดภัยในกระบวนการ อันเนื่องมาการใช้กระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงอีกด้วย

### 1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพองไว้ (Supported Liquid Membrane, SLM)

เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพองไว้ เป็นเยื่อแผ่นเหลวชนิดที่วิภาคของเยื่อแผ่นเหลวเป็นวิภาคที่ไม่เคลื่อนที่ โดยจะยึดตรึงเอาไว้ในรูพรุนจุลภาค (Microporous) ของตัวรองรับ ซึ่งการยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวเอาไว้ในรูพรุนจุลภาคนี้ จะทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพมากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการไม่ต้องใช้ตัวประสานหรือสารลดแรงตึงผิวใดๆ ซึ่งเป็นตัวก่อปัญหาให้เกิดชั้นต้านทานการถ่ายเทมวลของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว โดยรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับสำหรับยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวนี้นี้โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic Microporous) ซึ่งเป็นรูพรุนจุลภาคที่ยอมให้เฉพาะวิภาคของสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเท่า

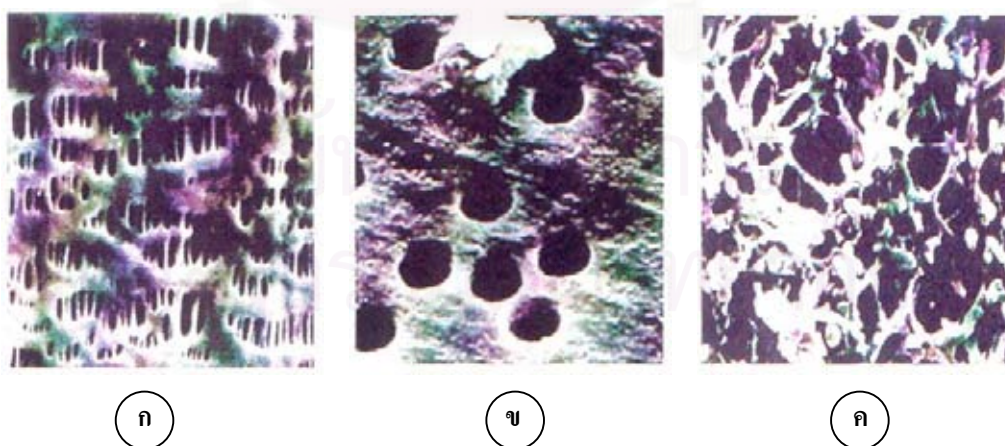


นั้น เคลื่อนผ่านหรือฝังยัดอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคได้ ส่วนรูพรุนจุลภาคอีกชนิดหนึ่งเป็นรูพรุนจุลภาคชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Microporous) ที่ยอมให้เฉพาะวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เท่านั้นเคลื่อนผ่านหรือฝังยัดอยู่ภายในรูพรุนได้

โดยเยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพองนี้ยังสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ตามลักษณะของตัวรองรับซึ่งได้แก่ ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat Sheet) ตัวรองรับชนิดเกลียววน (Spiral-Wound Module) และตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) โดยรายละเอียดของตัวรองรับแต่ละแบบสามารถแสดงได้ดังนี้

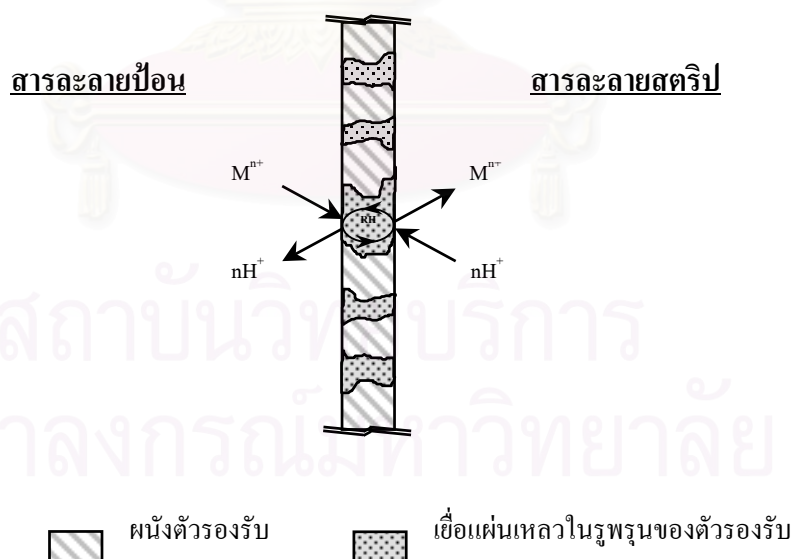
### 1.2.3.1 ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat Sheet)

ตัวรองรับชนิดแผ่นบางนี้มีลักษณะเป็นแผ่นวัสดุบางที่มีความพรุน (Porosity) ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์ อาทิเช่น พอลิโพรไพลีน (Polypropylene, PP) พอลิซัลโฟลน (Polysulfone, PF) พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) เป็นต้น โดยลักษณะของรูพรุนจุลภาคแสดงได้ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 แสดงรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับที่ทำจากวัสดุชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 1.8 แสดงรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่สร้างรูพรุนจุลภาคด้วยวิธีการต่างๆ โดยในรูปย่อย ก แสดงรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับที่ทำจากพอลิเอททีลินและสร้างรูพรุนด้วยวิธีดึงยืดแผ่นฟิล์ม (Expanded Film) ลำดับต่อมาในรูปย่อย ข แสดงรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับที่ทำจากพอลิคาร์บอเนตและสร้างรูพรุนด้วยวิธีกัดรอย (Track Etching) และสุดท้ายในรูปย่อย ค แสดงรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับที่ทำจากเซลลูโลสอะซิเตตและสร้างรูพรุนด้วยวิธีการระเหยตัวทำละลาย (Volatile Solvent) (Park, 2000) ซึ่งภายในรูพรุนของตัวรองรับจะเป็นแหล่งยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวไว้ด้วยสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน (Electro Affinity) แรงแคปิลลารี (Capillary Force) และคุณสมบัติของชนิดรูพรุน (Hydrophilic or Hydrophobic Microporous) โดยขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่ใช้ผลิตตัวรองรับ โดยแผ่นรองรับเมื่อยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวไว้แล้วนี้จะสามารถวางกั้นระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายสตรีปเอาไว้ได้ ทำให้เกิดการสกัดและนำกลับองค์ประกอบที่ต้องการสกัดได้อย่างต่อเนื่อง เป็นไปตามกลไกการสกัดผ่านกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวดังรูปที่ 1.3 โดยลักษณะการวางกั้นวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายสตรีป เกิดการถ่ายเทมวลตามกลไกดังที่กล่าวมาแล้วนั้นสามารถจำลองและแสดงได้ดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 แสดงภาพจำลองกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง



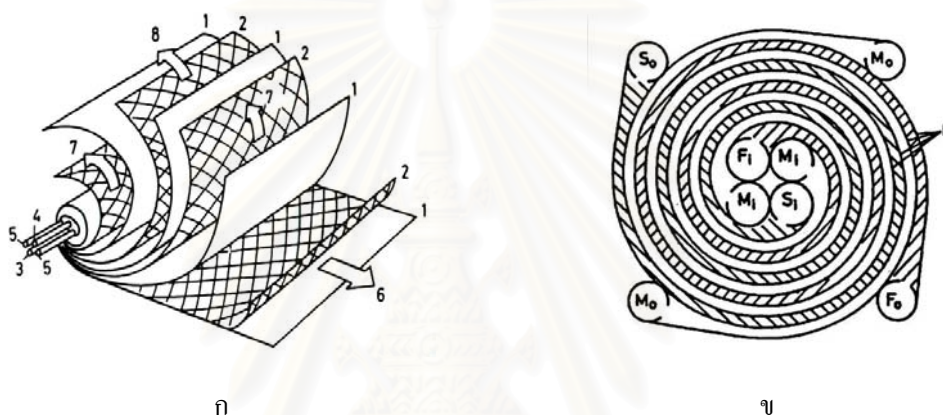
จากรูปที่ 1.9 แสดงภาพจำลองลักษณะการยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวไว้ในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นบาง และแสดงการวางกั้นวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายสตรีปของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง โดยกระบวนการประกอบด้วยสาร 3 วัฏภาคนั้นคือ วัฏภาคที่หนึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายป้อน วัฏภาคที่สองเป็นวัฏภาคของสารละลายสตรีป และ วัฏภาคที่สามเป็นวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว โดยวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวนี้อาจเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ ซึ่งถูกยึดตรึงติดอยู่ในรูพรุนจุลภาคของแผ่นตัวรองรับที่มีความพรุนสูง ทำให้สามารถวางกั้นระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายสตรีปเอาไว้ได้ โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่เกิดขึ้นทั้งในฝั่งของสารละลายป้อนกับฝั่งของสารละลายสตรีปที่สัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวจะเกิดการถ่ายเทมวลตามกลไกการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดได้โดยการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสขององค์ประกอบในวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายสตรีป กับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ด้วยวิธีการปั่นกวนวัฏภาคทั้งสอง

จากกระบวนการดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่าเยื่อแผ่นเหลวจะถูกยึดตรึงเอาไว้ในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นบาง ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูง และไม่ต้องใช้ตัวประสานหรือสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ ที่จะก่อตัวเป็นฟิล์มบางมาวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวลขององค์ประกอบที่ต้องการสกัด อีกทั้งยังยากต่อการกำจัดออกอีกด้วย จึงเป็นสาเหตุทำให้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวนี้นี้ มีข้อได้เปรียบกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่ากระบวนการนี้จะมีข้อดีอยู่มาก แต่ก็ยังพบว่ากระบวนการยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการเช่นกัน อาทิเช่น มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่ำกว่าเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันหลายเท่าตัว มีความยุ่งยากในการเตรียมกำลังการผลิตไม่สูงมากนัก และเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวมีขอบเขตจำกัดเช่นกัน

### 1.2.3.2 ตัวรองรับชนิดเกลียววน (Spiral)

ตัวรองรับชนิดเกลียววนเป็นตัวรองรับที่พัฒนาขึ้น เพื่อลดข้อจำกัดทางด้านพื้นที่การถ่ายเทมวลต่ำของตัวรองรับชนิดแผ่นบาง ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการม้วนห่อตัวรองรับชนิดแผ่นบาง

เป็นเกลียววนซ้อนกัน ยังผลให้สามารถเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรให้สูงขึ้นได้ อีกทั้งยังลดการตีคววนอันมีผลทำให้เยื่อแผ่นเหลวขาดเสถียรภาพลงได้ โดยการเปลี่ยนทิศทางของสารละลายให้ไหลขนานไปกับผิวสัมผัสของตัวรองรับ จึงสามารถลดแรงกระทำจากใบกวนของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง ที่มีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น ลักษณะของตัวรองรับชนิดเกลียววนและลักษณะการไหลของวัฏภาคต่างๆ สามารถจำลองและแสดงได้ดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 แสดงลักษณะของตัวรองรับชนิดเกลียววน และภาคตัดขวาง

จากรูปที่ 1.10 รูปย่อ ก แสดงลักษณะการม้วนห่อตัวรองรับชนิดแผ่นบางเป็นเกลียววนซ้อนกัน เพื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรให้เพิ่มสูงขึ้น โดยที่หมายเลข 1 คือตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่มีรูพรุนจุลภาคสำหรับยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลว หมายเลข 2 คือแผ่นตะแกรงกันเพื่อให้เกิดช่องว่างระหว่างแผ่นตัวรองรับ เพื่อให้เกิดเป็นช่องทางสำหรับไหลผ่านของสารละลาย หมายเลข 3 คือท่อสารละลายป้อนสำหรับไหลเข้าสู่โมดูล หมายเลข 4 คือท่อสารละลายสตริปสำหรับไหลเข้าสู่โมดูล หมายเลข 5 คือท่อเยื่อแผ่นเหลวสำหรับไหลเข้าไปในโมดูล หมายเลข 6 แสดงทิศทางการไหลของสารละลายป้อนที่ไหลภายในโมดูล หมายเลข 7 แสดงช่องทางการไหลของเยื่อแผ่นเหลวภายในโมดูล หมายเลข 8 แสดงช่องทางการไหลของสารละลายสตริปภายในโมดูล ส่วนรูปย่อย ข แสดงภาคตัดขวางของโมดูลตัวรองรับชนิดเกลียววน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงช่องทางการไหลของสารต่างๆ ภายใน

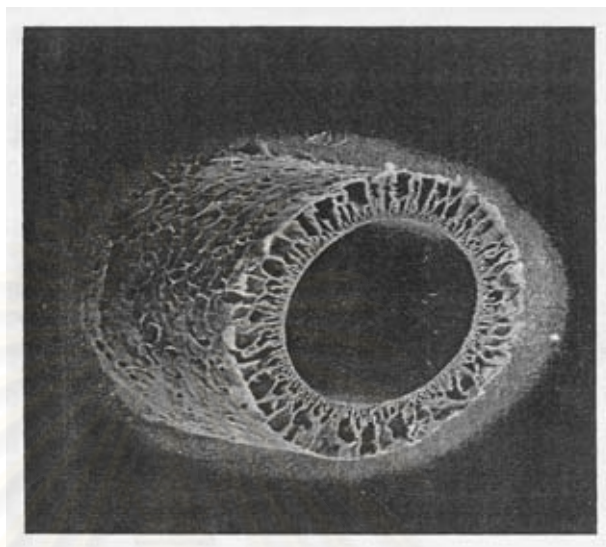
ในโมดูล โดยที่ Fi คือท่อสารละลายป้อนสำหรับไหลเข้าสู่โมดูล Si คือท่อสารละลายสตรีปสำหรับไหลเข้าสู่โมดูล Mi คือท่อสำหรับเชื่อมต่อแผ่นเหลวไหลเข้าสู่โมดูล Fo คือท่อสำหรับสารละลายป้อนไหลออกจากโมดูล So คือท่อสำหรับสารละลายสตรีปไหลออกจากโมดูล และสุดท้าย Mo คือท่อสำหรับเชื่อมต่อแผ่นเหลวไหลออกจากโมดูล ตามลำดับ

การเรียงและม้วนท่อตัวรองรับเป็นเกลียววนซ้อนกันนั้น นอกจากจะทำให้ความยาวของตัวรองรับเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทมวลแล้ว ยังสามารถเรียงซ้อนตัวรองรับเป็นชั้นๆ โดยการเรียงสลับกันเพื่อแบ่งชั้นวัสดุต่างๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนเซลล์ให้กับกระบวนการ ทำให้กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นได้อีกด้วย โดยถึงแม้ว่ากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเกลียววนนี้ จะมีเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวดีกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน สามารถหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวและยังมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางก็ตาม แต่กระบวนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเกลียววนยังมีข้อดีอีกหลายประการอาทิเช่น มีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรยังต่ำกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันมาก การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวมีความยุ่งยากซับซ้อนและปัญหาการตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว มีความซับซ้อนมากกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง อีกทั้งเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวก็มีอายุการใช้งานจำกัดเช่นเดียวกันกับเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง

### 1.2.3.3 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber)

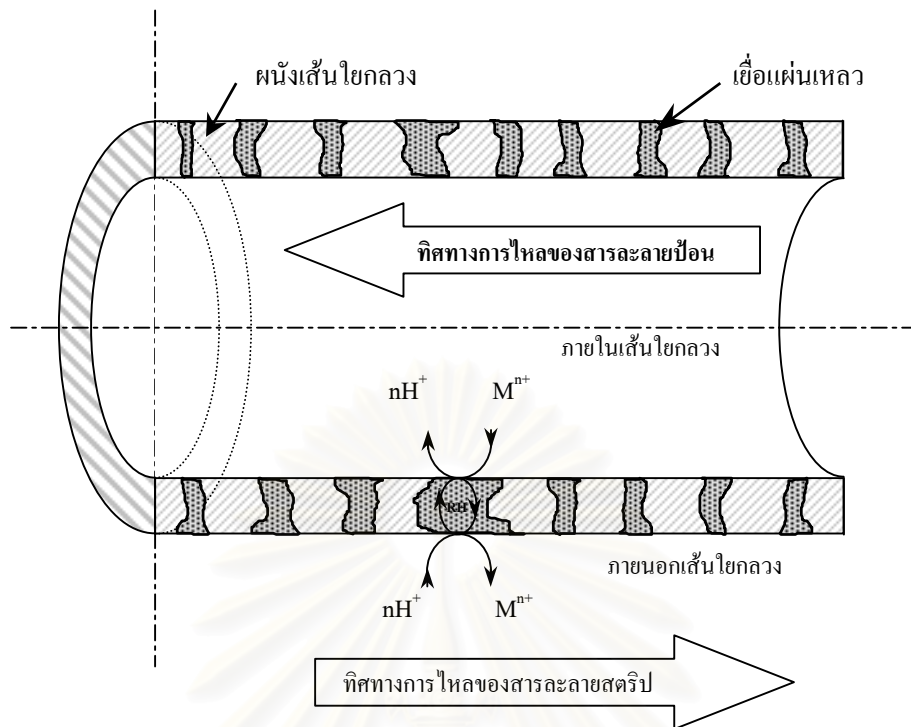
ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นตัวรองรับอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนามาจากตัวรองรับชนิดแผ่นบาง เริ่มแรกของการพัฒนาได้มีการม้วนท่อตัวรองรับชนิดแผ่นบางให้มีลักษณะเป็นท่อกลม (Tubular Tube) แต่พบว่าสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรยังมีค่าต่ำ ต่อมาจึงได้พัฒนามาใช้เส้นใยกลวงขนาดเล็กจำนวนมากและประกอบรวมกันให้เป็นหน่วยเดียวกัน ทำให้มีสัดส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูงมากขึ้น โดยตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงส่วนใหญ่ทำจาก

วัสดุประเภทพอลิเมอร์ ซึ่งมีความพรุนสูง โดยภาพขยายขนาดของเส้นใยกลางพอลิเมอร์ที่มีรูพรุน จุลภาคนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 แสดงภาพขยายขนาดของเส้นใยกลางพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนจุลภาค

จากรูปที่ 1.11 เป็นภาพขยายขนาดบริเวณปลายท่อเส้นใยกลาง ที่ถ่ายภาพไว้ด้วยกล้อง สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยโพรงช่องว่างในเนื้อ ของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลางจะเป็นรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลางนี้ ซึ่งเยื่อแผ่น เหลวจะยึดตรึงอยู่ภายในโพรงช่องว่างนี้เอง โดยหนึ่งโมดูลจะประกอบไปด้วยเส้นใยกลางจำนวน มากเรียงซ้อนรวมกันเป็นโมดูล เพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทมวลให้สูงขึ้นตามความต้องการ โดยชุด อุปกรณ์ชนิดนี้จะมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูงกว่าชุดตัวรองรับชนิดอื่นๆ เมื่อ โมดูลมีขนาดเท่าๆ กัน อย่างไรก็ตามระบบการสกัดจำเป็นต้องมีการกรองแยกขั้นต้น (Prefiltration) ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อป้องกันการอุดตันภายในโมดูลเส้นใยกลางเนื่องจากเส้นใยกลางมีขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลางที่เล็กมากนั่นเอง โดยลักษณะการไหลของวัฏภาคต่างๆ กลไกการสกัดและการทำงาน ของระบบการสกัด ของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเส้นใยกลางสามารถ จำลองและแสดงได้ดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 แสดงภาพจำลองภาคตัดขวางของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลาง

จากรูปที่ 1.12 แสดงภาพจำลองภาคตัดขวางของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลาง ซึ่งมีรูพรุน จุลภาคชนิดไม่ชอบน้ำ เยื่อแผ่นเหลวจะยึดตรึงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับ สารละลาย ป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายจะป้อนเข้าสู่โมดูลโดยให้ไหลอยู่ภายในท่อเส้นใยกลาง และสาร ละลายสตริปจะป้อนเข้าสู่โมดูลโดยให้ไหลภายนอกท่อเส้นใยกลาง โดยสารละลายทั้งสองจะมี ลักษณะการไหลเป็นแบบไหลสวนทางกัน จากกระบวนการจะเห็นได้ว่าเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็น วัฏภาคของสารอินทรีย์ เมื่อยึดตรึงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลางแล้ว จะ สามารถขวางกั้นระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายสตริปเอาไว้ได้ เช่นเดียวกัน กับตัวรองรับชนิดอื่นๆ และเกิดการสกัดตามกลไกเกิดการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่บริเวณ ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่สัมผัสกัน ซึ่งพบว่าข้อดีของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้คือ เยื่อแผ่นเหลวมี เสถียรภาพสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน หลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งก่อตัวเกิดเป็นชั้น ฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวลในกระบวนการ และยังมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอน มวลต่อปริมาตรสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อแผ่นเหลวที่พบบนตัวรองรับชนิดอื่นๆ ที่มีขนาด เดียวกันอีกด้วย



กระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะออกจากสารละลาย โดยใช้กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์และกระบวนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น แสดงให้เห็นได้ว่าแต่ละกระบวนการต่างมีข้อดี และข้อด้อยในแต่ละกระบวนการ ซึ่งขึ้นกับลักษณะการใช้งานและการพัฒนาในด้านต่างๆ ของแต่ละกระบวนการ โดยการเลือกใช้งานต้องพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ ประกอบการเลือกใช้ ดังนั้นจึงสรุปข้อดีและข้อด้อยของทั้งสองกระบวนการเปรียบเทียบกันได้พอสังเขปโดยแสดงไว้ดังตารางที่ 1.1

**ตารางที่ 1.1** แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายกับกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย		กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว	
ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน</li> <li>- กำลัการผลผลิตสูง</li> <li>- ปัญหาการปนเปื้อนต่ำ</li> <li>- ราคาถูก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้พลังงานมาก</li> <li>- ใช้สารเคมีปริมาณมาก</li> <li>- ประสิทธิภาพต่ำ</li> <li>- ใช้พื้นที่มาก</li> <li>- มีคุณสมบัติในการเลือกสกัดต่ำ</li> <li>- มีหลายขั้นตอนมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้พลังงานต่ำ</li> <li>- ใช้สารเคมีปริมาณต่ำ</li> <li>- มีประสิทธิภาพสูง</li> <li>- ใช้พื้นที่น้อย</li> <li>- มีคุณสมบัติในการเลือกสกัดสูง</li> <li>- รวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับไว้เป็นขั้นตอนเดียวกัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีกำลัการผลผลิตต่ำ</li> <li>- มีการปนเปื้อนง่าย</li> <li>- ราคาสูง</li> <li>- เสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวต่ำ</li> <li>- อายุการใช้งานต่ำ</li> </ul>

ส่วนกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวซึ่งยังแบ่งได้เป็น 3 ชนิด นั่นคือ เยื่อแผ่นเหลวชนิดมีลชั้น เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต และเยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพองไว้ โดยข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ สามารถสรุปเปรียบเทียบได้พอสังเขป ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพอง		เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต	
ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูงมาก	- ปัญหาการใช้สารลดแรงตึงผิวและการกำจัดออก	- มีประสิทธิภาพสูง	- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ	- เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูง	- มีกำลังการผลิตต่ำมาก
- มีกำลังการผลิตสูง	- มีการปนเปื้อนสูง	- ไม่ใช่สารลดแรงตึงผิว	- ปัญหาทางด้านอายุการใช้งานและเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว	- มีประสิทธิภาพสูงมาก	- สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขี้ด่ำ
- มีกระบวนการไม่ยุ่งยาก	- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก	- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ		- ปัญหาการปนเปื้อนต่ำ	- สารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น
- มีกระบวนการซับซ้อนมาก	- ใช้พลังงานมาก	- ใช้พลังงานต่ำ		- ไม่ใช่สารลดแรงตึงผิว	- อันตรายจากไฟฟ้า ความต่างศักย์สูง
					- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก

โดยในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเทคนิคการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีข้อดีอย่างเด่นชัดหลายประการ อาทิเช่น ใช้สารสกัดและตัวทำละลายในปริมาณต่ำซึ่งสารสกัดมักมีราคาสูง มีอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง อีกทั้งยังมีศักยภาพในการพัฒนากระบวนการสกัดเพื่อสกัดแยกไอออนโลหะหายาก (Rare Earth) ซึ่งเป็นโลหะที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจสูงแต่มีปริมาณต่ำในธรรมชาติได้อีกด้วย โดยในงานวิจัยจะศึกษาการสกัดแยกไอออนซีเรียมออกจากสารละลาย และเสนอวิธีการสร้างกราฟสำหรับทำนายผลการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยพิจารณาผลการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเป็นกรณีศึกษา ประกอบกับผลการวิจัยการสกัดแยกไอออนแลนทานัม ไอออนนีโอดีเมียมซึ่งเป็นไอออนของธาตุโลหะหายาก และการสกัดแยกไอออนแพลเลเดียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยข้อมูลทั่วไป ความสำคัญ และประโยชน์ของธาตุซีเรียมที่ใช้ในการศึกษา และผลการศึกษาวิจัยจะแสดงไว้เป็นลำดับต่อไป



### 1.3 ซีเรียม

ซีเรียม (Cerium) เป็นธาตุแรกของหมู่ธาตุแลนทานอยด์ (lanthanoids) หรือแลนทาไนด์ (lanthanides) หรือแลนทาโนน (lanthanon) ชื่อ lanthanoids เป็นชื่อที่รับรองของ IUPAC อาจเรียกธาตุในหมู่นี้ว่าเป็นธาตุในกลุ่มธาตุแรร์เอิร์ท (Rare earth elements) เป็นหมู่ย่อย (subgroup) ของหมู่ III B ในตารางธาตุ (Periodic table) ประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ ที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 57 – 71 รวม 15 ธาตุได้แก่ แลนทานัม (Lanthanum) ซีเรียม (Cerium) เพรซีโอดีเมียม (Praseodymium) นีโอดีเมียม (Neodymium) โพรมีเทียม (Promethium) ซาแมเรียม (Samarium) ยูโรเพียม (Europium) แกโดลิเนียม (Gadolinium) เทอร์เบียม (Terbium) ดิสโพรเซียม (Dysprosium) โฮล์เมียม (Holmium) เออร์เบียม (Erbium) ทูเลียม (Thulium) อิตเทอร์เบียม (Ytterbium) ลูทีเซียม (Lutetium) และอาจรวมธาตุอิตเทรียม (Yttrium) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับธาตุอื่น ๆ ในอนุกรมนี้ด้วย ธาตุแรร์เอิร์ททั้ง 15 ธาตุนี้ยังแยกออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มเบา (Light rare earth elements) และกลุ่มหนัก (Heavy rare earth elements)

#### 1.3.1 แหล่งธาตุซีเรียมในธรรมชาติ

ซีเรียมจัดเป็นธาตุหนึ่งในกลุ่มธาตุแรร์เอิร์ทกลุ่มเบา (สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2538) ซึ่งประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 57 – 63 คือตั้งแต่ธาตุแลนทานัมถึงธาตุยูโรเพียม ธาตุซีเรียมมักพบในแร่ที่มี กลุ่มธาตุแรร์เอิร์ทเป็นองค์ประกอบสำคัญได้แก่ แร่บาสเนไซต์ (Bastnaesite) แร่โมนาไซต์ (Monazite) และแร่ซีโนไทม์ (Xenotime)

แร่บาสเนไซต์ (Bastnaesite) เป็นแร่ฟลูออโรคาร์บอเนตของธาตุแรร์เอิร์ทที่มีสูตรโครงสร้างดังนี้  $(\text{CeLa})_2\text{Ba}(\text{CO}_3)_2\text{F}_2(\text{CeLa})\text{FCO}_3$  แร่บาสเนไซต์ มีแรร์เอิร์ทเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 75% ส่วนใหญ่เป็นแรร์เอิร์ทกลุ่มเบาโดยมีซีเรียมอยู่ประมาณ 50% แหล่งแร่บาสเนไซต์ที่สำคัญอยู่ที่

Mountain pass แคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา และที่ Bayan Obo ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

ตารางที่ 1.3 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของซีเรียม

คุณสมบัติ	ค่า
เลขอะตอม	58
น้ำหนักอะตอม	140.115
ออกซิเดชันสเตต	+3, +4
จุดหลอมเหลว	798 °C ± 3 °C
จุดเดือด	3,433 °C
ความหนาแน่น (20 °C)	6.78 g/cm <sup>3</sup>
โครงสร้างผลึก	Faced – centred cubic
Naturally occurring isotopes	
Ce-136	0.19%
Ce-140	88.48%
Ce-142	11.07%

แร่โมนาไซต์ (Monazite) เป็นแร่หนักโดยทั่วไปมีสีเหลือง สีน้ำตาลแดง สีน้ำตาลเหลือง สีเขียวเหลือง หรือสีเขียว มีความถ่วงจำเพาะ 5.0 – 5.3 ความแข็ง 5.0 – 5.5 แร่โมนาไซต์เป็นสารประกอบฟอสเฟตของกลุ่มธาตุแรร์เอิร์ทที่สำคัญได้แก่ ซีเรียม แลนทานัม นีโอดีเมียม และเพรซีโอดีเมียม นอกจากนี้ยังมีธาตุยูเรเนียม และยูเรเนียม เป็นองค์ประกอบย่อยอยู่ด้วย มีสูตรโครงสร้างดังนี้ (Ce, La, Y, Th)(PO<sub>4</sub>) ในทางธรณีวิทยาแร่โมนาไซต์มักเกิดแพร่กระจายทั่วไป มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ หรือเป็นผลึกอยู่ในหินแกรนิต ไนส์ และเพกมาไทต์ เมื่อหินดังกล่าวเกิดการผุพังและทำปฏิกิริยากับน้ำ จะทำให้เกิดการสะสมตัวตามแหล่งลานแร่ต่าง ๆ เช่นเดียวกับแร่ดีบุก แร่พลูมแฟรม แร่โมนาไซต์ (สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2538) พบมากในประเทศสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย อินเดีย บราซิล และแอฟริกาใต้ สำหรับประเทศไทยมักพบแร่โมนาไซต์ปะปน

กับแหล่งแร่ดีบุก แร่พลูแฟรม และทรายตามชายหาด แร่โมนาไซต์มีออกไซด์ของซีเรียมอยู่ประมาณ 46%

แร่ซีโนไทม์ (Xenotime) เป็นแร่ฟอสเฟตของแร่เอิร์ทกลุ่มหนัก ที่สำคัญได้แก่ อิทเรียม แร่ซีโนไทม์ ( $YPO_4$ ) พบในแหล่งลานแร่ดีบุก แร่พลูแฟรม เช่นเดียวกับแร่โมนาไซต์ แต่มีปริมาณน้อยกว่า แร่ซีโนไทม์มีซีเรียมออกไซด์ประมาณ 10%

### 1.3.2 ประโยชน์ของซีเรียม

ซีเรียมเป็นธาตุในกลุ่มธาตุแร่เอิร์ทอันดับแรก ๆ ที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างมากมาย ในปัจจุบันซีเรียมถูกนำมาใช้ในกิจการอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่นนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเคมีภัณฑ์ ตัวเร่งปฏิกิริยา อุตสาหกรรมโลหะผสม อุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และแม่เหล็กกำลังสูง ตลอดจนนำไปใช้เป็นผงขัด เป็นต้น ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ซีเรียมในทางอุตสาหกรรม ซึ่งจะใช้ประโยชน์จากซีเรียมโดยทั่วไปใน 3 ลักษณะดังนี้

1. การใช้ซีเรียมหรือสารประกอบของซีเรียมร่วมกับธาตุแร่เอิร์ทตัวอื่น ๆ เช่น การใช้ซีเรียมฟลูออไรด์หรือคลอไรด์ร่วมกับฟลูออไรด์หรือคลอไรด์ของแร่เอิร์ทตัวอื่น ๆ ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า สารประกอบซัลเฟตของซีเรียมและธาตุแร่เอิร์ทบางตัว นำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมการทำกรดกำมะถัน เป็นต้น

2. การใช้ เฉพาะซีเรียมและสารประกอบของซีเรียมแต่เพียงอย่างเดียว เช่น ซีรีคออกไซด์ ( $CeO_2$ ) ใช้เป็นผงขัดในอุตสาหกรรมแก้ว ใช้ในอุตสาหกรรมทำแก้วหรือกระจกสีซึ่งสามารถลดระดับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและความร้อนได้ ซีเรียมออกไซด์ ( $CeO$ ) ใช้ผสมกับแก้วที่ใช้ในงานเกี่ยวกับรังสีเอ็กซ์ ใช้เคลือบเลนส์ และเคลือบภาชนะแทนดีบุก ซีรีคซัลเฟตและซีรีคทังสเตตใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังใช้ซีเรียมออกไซด์ในอุตสาหกรรมใยแก้วนำแสง เป็นต้น

3. ใช้ในรูปของโลหะ โลหะซีเรียมมักใช้ในรูปของโลหะผสมหรือโลหะเจือ โลหะผสมของซีเรียมกับเหล็ก (Ferro-cerium alloy) ใช้เป็นแคตตาไลสต์ในการถลุง (Refining agent) หรือการผลิตโลหะผสมบางชนิด เช่น โลหะผสมระหว่างอลูมิเนียมและซีเรียมนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ และอากาศยาน โลหะผสมของซีเรียมกับธาตุอื่นซึ่งเป็นที่รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางคือ Misch metal เป็นโลหะผสมที่มีซีเรียมเป็นส่วนประกอบหลัก โดยมีซีเรียมมากกว่า 50% ส่วนผสมอื่น ๆ ได้แก่ นีโอดีเมียม พราซีโอดีเมียม แลนทานัม ซามาเรียม เทอร์เบียม อิตเทรียม เหล็กและมีซิลิกอน แคลเซียม อลูมิเนียม เล็กน้อย โลหะผสม Misch metal มักจะนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมโลหะ ซึ่งมีคุณสมบัติในการช่วยเพิ่มความแข็ง เหนียว หรือคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ เป็นต้น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2540)

โดยที่ซีเรียมและสารประกอบต่าง ๆ ของซีเรียมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกิจการอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้หลายประเภทดังกล่าวข้างต้น ความต้องการใช้ซีเรียมและสารประกอบต่าง ๆ ของซีเรียมในแต่ละปีจึงมีปริมาณค่อนข้างสูง โดยเฉพาะประเทศที่มีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม ในส่วนของประเทศไทยได้มีบริษัทต่างประเทศหลายบริษัทเข้ามาลงทุนในอุตสาหกรรมขั้นสูง ที่จำเป็นต้องใช้ซีเรียมและแรร์เอิร์ทเป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ประเทศขาดดุลการค้า ทั้ง ๆ ที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศจากกากเหลือใช้ที่ได้จากเหมืองแร่ดีบุก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการขาดดุลทางการค้า จึงต้องมีการศึกษาพัฒนากระบวนการสกัดแยกเพื่อนำทรัพยากรธรรมชาติภายในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการลดปริมาณของเสียจากเหมืองแร่ดีบุกจึงเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมสอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาลในการใช้เทคโนโลยีสะอาดอีกด้วย

ดังนั้นเทคโนโลยีการแยกสารจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยในปัจจุบันกระบวนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะเป็นเทคนิคการสกัดที่มีข้อได้เปรียบเทคนิคอื่นๆ หลายประการ อาทิเช่น ใช้สารสกัดและตัวทำละลายปริมาณน้อย มีอัตราการถ่ายเทมวลสูง อีกทั้งยังประหยัดพลังงาน โดยงานวิจัยส่วนมากมัก

มุ่งเน้นในการศึกษาความเป็นไปได้ในการสกัดแยกไอออนสารชนิดต่าง ๆ ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์, การศึกษากลไกการสกัดแยกสาร และการศึกษาการเลือกสารสกัดที่เหมาะสมที่สามารถเลือกสกัดเพียงเฉพาะสารที่ต้องการให้แยกออกได้ โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้ทฤษฎีสวมคูล และเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นอย่างง่าย ในการสร้างกราฟเพื่อทำนายการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งการสร้างกราฟเชิงเส้นเพื่อทำนายผลดังกล่าวนี้ยังเป็นเรื่องใหม่ที่ยังไม่มีผู้ใดนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวมามาก่อน โดยผลที่ได้จากการศึกษาจะแสดงไว้เป็นลำดับต่อไป

#### 1.4 งานวิจัยที่ผ่านมา

กว่า 160 ปี (1787-1947) นับตั้งแต่วันที่ Arrhenius เริ่มทดลองค้นคว้าแร่สีดาชนิดหนึ่ง ส่งผลให้นักวิทยาศาสตร์หลายต่อหลายท่านศึกษาวิจัยแร่ดังกล่าวอย่างมาก จนสามารถแยกธาตุออกมาได้เป็นธาตุที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวจำนวนทั้งสิ้น 14 ธาตุ และเรียกกันว่าธาตุหายาก (Rare Earth Element) จนกระทั่งปี ค.ศ. 1947 J.A. Marinsky, L.E. Glendenin และ C.D. Coryell จากห้องปฏิบัติการ Oak Ridge National Laboratory สหรัฐอเมริกา ได้ค้นพบธาตุตัวที่ 15 จากธาตุในกลุ่มนี้ นั่นคือ โพรมิเทียม ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการแบ่งแยกนิวเคลียสของยูเรเนียม (Nuclear Fission) นับจากวันนั้นจนถึงวันนี้ก็ไม่มี การค้นพบธาตุหายากตัวใหม่ ๆ อีกเลย ทำให้ธาตุหายากเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง โดยความสำเร็จส่วนใหญ่ของการค้นพบธาตุหายากอยู่ระหว่าง 40-50 ปีที่ผ่านมา การค้นพบส่วนหนึ่งสืบเนื่องมาจากการทุ่มทุนวิจัยของสหรัฐอเมริกาในโครงการ Manhattan Project ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยได้มีการพัฒนาเทคนิคการแยกธาตุหายากขึ้นมา 2 วิธี นั่นคือ 1. วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Method) และ 2. วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid-Liquid Extraction) ซึ่งทั้งสองวิธีได้กลายเป็นเทคนิคการแยกธาตุหายากในเชิงพาณิชย์ในราว 30 ปีมานี้เอง



เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางที่สุด และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการและการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่กระบวนการ จนกระทั่งได้รับการพัฒนาเกิดเป็นเทคนิคการสกัดชนิดใหม่นั้นคือ เทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว และได้รับการศึกษาพัฒนาเรื่อยมา H. Strathmann (1981) ได้รวบรวมเทคนิคต่าง ๆ ของเยื่อแผ่นภายใต้หัวข้อเรื่อง “Membrane Separation Processes” และ H. K. Lonsdale (1982) ได้นำเสนอให้เห็นถึงวิวัฒนาการและความก้าวหน้าของเทคโนโลยีเยื่อแผ่น ซึ่งรวมทั้ง เทคนิคการใช้เยื่อแผ่นในการกรองต่าง ๆ อีกด้วย L.L. Tavlarides, J.H. Bae, and C.K. Lee (1987) ได้นำเสนองานวิจัยที่รวบรวมเทคนิคการแยกโลหะ ซึ่งประกอบด้วย การสกัดด้วยตัวทำละลาย การสกัดด้วยเยื่อแผ่น และการแยกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ส่งผลให้งานวิจัยในการสกัดแยกไอออนโลหะได้รับการศึกษากันอย่างจริงจัง การสกัดแยกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงแรกของการศึกษา แต่ในกระบวนการประสบปัญหาความเสื่อมสภาพของตัวดูดซับที่ใช้ ความก้าวหน้าของเทคนิคการสกัดแยกด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจึงมีแค่เพียงการพัฒนาตัวดูดซับที่ใช้ซึ่งใช้เวลาศึกษาค้นคว้ากันเป็นเวลายาวนาน การสกัดแยกด้วยเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายจึงโดดเด่นและพัฒนาต่อมาจนสามารถดำเนินการในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างแพร่หลาย แต่ยังคงพบว่ามีเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพต่ำ จึงมีความพยายามพัฒนากระบวนการสกัดด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลว ผลงานวิจัยส่วนใหญ่ของ Norman N. Li และคณะ นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1968 จนถึงปีค.ศ. 1988 เป็นการศึกษาทดลองประยุกต์ใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวในการสกัดแยกไอออนของสารทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยในช่วงท้าย ๆ ของงานวิจัยจะเป็นการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบเยื่อแผ่นเหลว งานวิจัยที่นำเครื่องมือต่าง ๆ เข้าร่วมกับกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวได้รับการพัฒนาโดย Marr R.J. และคณะ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 จนถึงค.ศ. 1990 แต่ผลงานการประยุกต์ที่ได้รับการยอมรับกลับเป็นผลการวิจัยของ Gu Z. และ Norman N. Li ในการพัฒนาระบบเยื่อแผ่นเหลวชนิดใหม่เป็นแบบชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane) โดยมีชื่อย่อเป็นที่เข้าใจกันคือ ESPLIM ในปี ค.ศ.1990

ในส่วนของเทคนิคการสกัดธาตุหายากมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง กอปรกับมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีอย่างมาก ทำให้โลหะหายากถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ส่งผลให้ความต้องการแร่หายากมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น โดยเทคนิคการสกัดแยกธาตุหายากส่วนใหญ่มักใช้เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งถึงแม้ว่ากระบวนการจะมีประสิทธิภาพต่ำ แต่มีความสะดวกง่ายดายในการดำเนินการ อีกทั้งประเทศที่ดำเนินการผลิตด้วยเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นประเทศที่มีธาตุหายากในปริมาณสูงมาก อาทิเช่น จีน ออสเตรเลีย บราซิล อินเดีย มาเลเซีย แอฟริกาใต้ และสหรัฐอเมริกาเป็นต้น ดังนั้นจึงมีทรัพยากรมากเกินพอ ในการสำรองการผลิตด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยในประเทศไทยปริมาณสินแร่ธรรมชาติมีปริมาณมากพอสมควร แต่ในระบบเยื่อแผ่นเหลวมีการพัฒนาการสกัดแยกโลหะหายากอย่างกว้างขวาง Goto M. และคณะ (1989) ศึกษาการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับธาตุหายากทั้งสองได้แต่ก็พบปัญหาเสถียรภาพของเยื่อแผ่น Zhang และคณะ (1989 -1990) ศึกษาการสกัดแยกกลุ่มธาตุหายากออกจากสารละลายในน้ำเสีย และกระบวนการมีประสิทธิภาพในการสกัดได้ดี จึงมีผลงานวิจัยต่อเนื่องเป็นผลงานวิจัยการออกแบบการใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวในการสกัดธาตุหายาก และผลงานดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกกลุ่มธาตุหายากออกจากกลุ่มธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ร่วมกันในปัจจุบัน Milanova M. และคณะ (1993) ศึกษาการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียม พบว่าการสกัดขั้นต้นผลการใช้สารลดแรงตึงผิวในเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน เป็นไปตามผลการทดลองของ Teramoto M. และคณะ (1986) ที่ได้ศึกษาการสกัดแยกกลุ่มธาตุหายากผสมระหว่าง La, Nd, Eu, Gd, และ Yb Gill J.S. และคณะ (1994) ทำการศึกษาการสกัดซาแมเรียและยูเรเนียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่ทำจากซิลิโคน แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ในการสกัดแยกไอออนทั้งสองได้ K. Uezu ร่วมกับคณะของ Goto M. (1995) ศึกษาการสกัดแยกโลหะหายากโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันที่เตรียมจากสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ ซึ่งส่งผลให้เยื่อแผ่นเหลวไม่ชอบน้ำสูง (Strongly Hydrophobic) ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพ สามารถสกัดแยกโลหะหายากทั้ง 12 ชนิดที่นำมาศึกษาได้แต่ประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น Span 80 แล้วพบว่าสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ที่นำมาทดลองมีประสิทธิภาพสูงกว่า



Tatsuya และคณะของ Goto M. (1998) ทำการศึกษาการสกัดแยกโลหะหายากด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน โดยประสิทธิภาพของการสกัดแยกจะพิจารณาจากการถ่ายเทไอออนของโซเดียม ซึ่งเป็นไอออนที่ถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวเมื่อโลหะหายากถูกสกัด ดังนั้นปริมาณไอออนโซเดียมจึงเป็นตัวแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการสกัด Ashraf M. C.(1996) ศึกษาการสกัดแยกไอออนซีเรียม ผ่านเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง โดยใช้กรดแอสโบบิก และกรดแมนดริก เป็นสารละลายสตรีป และใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวออกซิไดซ์ ซีเรียมไอออนเป็นซีริกไอออน พบว่าการสกัดมีประสิทธิภาพดีเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.4 โมลต่อลิตร วิทยา นามสว่างและคณะ (2542) ศึกษาการสกัดแยกไอออนแลนทานัมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง พบว่าสามารถสกัดแยกได้ดีเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายสตรีปเท่ากับ 0.25 โมลต่อลิตร และพบว่าการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนโดยใช้สารละลายกรดเกลือ ได้ผลการศึกษาดีกว่าการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ นิลิต สุไลมานและคณะ (2541) ศึกษาการสกัดแยกไอออนนีโอดีเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง พบว่าสามารถสกัดแยกนีโอดีเมียมไอออนได้ดีเมื่อใช้กรดไนตริกเป็นสารละลายสตรีปที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

สมการทางคณิตศาสตร์กับกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายแต่ล้วนแล้วแต่จะพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะ งานวิจัยที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับกันมีเพียงส่วนน้อย ซึ่งในงานวิจัยที่สำคัญมีเพียงงานวิจัยของ Norman N. Li (1968) ได้ศึกษาวิจัยเยื่อแผ่นชนิดอิมัลชันและได้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยเฉพาะกับเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน แต่ในหลายกรณีก็ไม่สามารถอธิบายได้ ต่อมาจึงได้ร่วมมือกับ W. S. Winston Ho (1992) ร่วมกันปรับปรุงสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน โดยแบ่งพิจารณาเป็นแต่ละกรณีศึกษา แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ขึ้นอยู่กับกรณีที่ทำการศึกษา และยังเป็นต้นแบบสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญที่ได้รับการพัฒนาจวบจนปัจจุบัน

## 1.5 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง
2. เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง อาทิเช่น
  - 2.1 ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นเหลว
  - 2.2 ความเข้มข้นของสารละลายสตริป
  - 2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการสกัดไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง เป็นต้น
  - 2.4 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง

## 1.6 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง อันได้แก่
  - 1.1 ความเข้มข้นของสารสกัด (TOA) ในตัวทำละลายอินทรีย์ ในช่วงไม่เกิน 5 โมลต่อลิตร
  - 1.2 ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกที่ใช้เป็นสารละลายสตริป ในช่วงไม่เกิน 3 โมลต่อลิตร
  - 1.3 อัตราการไหลที่เท่ากันของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปในช่วงไม่เกิน 1 ลิตรต่อนาที
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบข้อมูลการสกัด ไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
2. สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด ไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
3. สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการสกัด ไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
4. มีความรู้ความชำนาญในเทคนิคการสกัด ไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
5. เผยแพร่ผลงานทางด้านเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดการพัฒนาประเทศต่อไป
6. มีแนวทางในการที่จะนำเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

## 1.8 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสกัด ไอออนซีเรียมด้วยเทคนิคต่างๆ
2. ออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้
3. เตรียมความพร้อมและทดสอบเครื่องมือก่อนใช้งานจริง
4. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
5. ดำเนินการทดลอง
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง
7. ปรับแต่งค่าตัวแปรต่างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้เหมาะสมกับการทดลอง และสามารถทำนายการสกัดซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
8. สรุปผลการดำเนินการวิจัย และเสนอผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

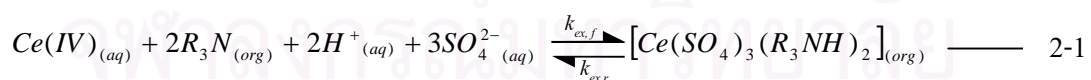
### ทฤษฎี

บทนี้จะกล่าวถึงลักษณะของกระบวนการสกัดแยกไอออนซีเรียม ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยอาศัยทฤษฎีสมดุลและรูปแบบสมดุลการไหลในท่อ อันนำไปสู่วิธีการทำนายผลการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยวิธีการสร้างกราฟในระบบหอสกัดเดี่ยว ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นระบบสองหอสกัด และระบบหลายหอสกัดได้ตามลำดับ โดยรายละเอียดของวิธีการดังกล่าวสามารถแสดงได้เป็นลำดับดังนี้

#### 2.1 กระบวนการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

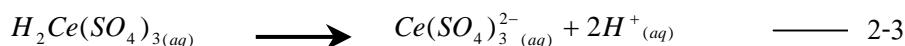
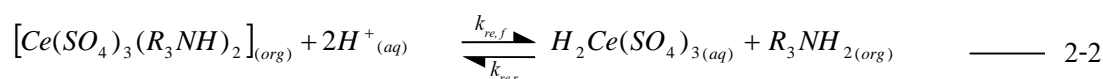
##### (Cerium Ion Extraction via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane)

กระบวนการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง มีรูปแบบของกระบวนการเป็นไปตามกลไกเช่นเดียวกับรูปที่ 1.3 ดังที่ได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 1 ซึ่งกระบวนการประกอบไปด้วยสาร 3 วัฏภาคนั้นคือ 1) วัฏภาคสารละลายป้อน 2) วัฏภาคสารละลายสตริป และมีวัฏภาคที่ 3 เป็นวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวซึ่งยึดตรึงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง ทำให้สามารถขวางกั้นวัฏภาคที่หนึ่งและสองเอาไว้ได้ โดยที่วัฏภาคสารละลายป้อนจะเข้มข้นไปด้วยไอออนซีเรียม ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสที่ I ดังสมการที่ 2-1



โดยที่  $RH$  เป็นสัญลักษณ์แทนสารสกัดไตรนอร์มัลออกทิลลามีน (Tri-n-Octylamine) ในเยื่อแผ่นเหลว และมีสมดุลปฏิกิริยาการสกัดเท่ากับ  $K_{ex} = \frac{k_{ex,f}}{k_{ex,r}}$  สารสกัดไตรนอร์มัลออกทิลลามีนในเยื่อแผ่นเหลวจะเข้าทำปฏิกิริยากับซีเรียมไอออนในสารละลายป้อน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะแพร่ผ่านชั้นเยื่อแผ่นเหลว จากผิวสัมผัสทางด้านฝั่งสารละลายป้อนไปสู่ผิวสัมผัสทางด้านฝั่งสารละลายสตริป จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับกับไฮโดรเนียม

ไอออนในวัฏภาคสารละลายสตริป ทำให้ไอออนซีเรียมถูกปลดปล่อยออกจากวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ไปสู่วัฏภาคสารละลายสตริป ดังสมการปฏิกิริยาการนำกลับซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2-2



และเมื่อสารประกอบเชิงซ้อนหลังเกิดปฏิกิริยาการนำกลับกับไฮโดรเนียมไอออนและปลดปล่อยซีเรียมไอออนออกไปแล้ว จะเกิดเป็นสารสกัดกลับคืนสู่เยื่อแผ่นเหลวและเกิดปรากฏการณ์ดัง เช่นที่กล่าวมาแล้วซ้ำ จนกระทั่งกระบวนการเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อไป

## 2.2 กระบวนการสกัดซีเรียมไอออนในหอสกัดเดี่ยว

### (Cerium Ion Extraction via Single Column of HFSLM)

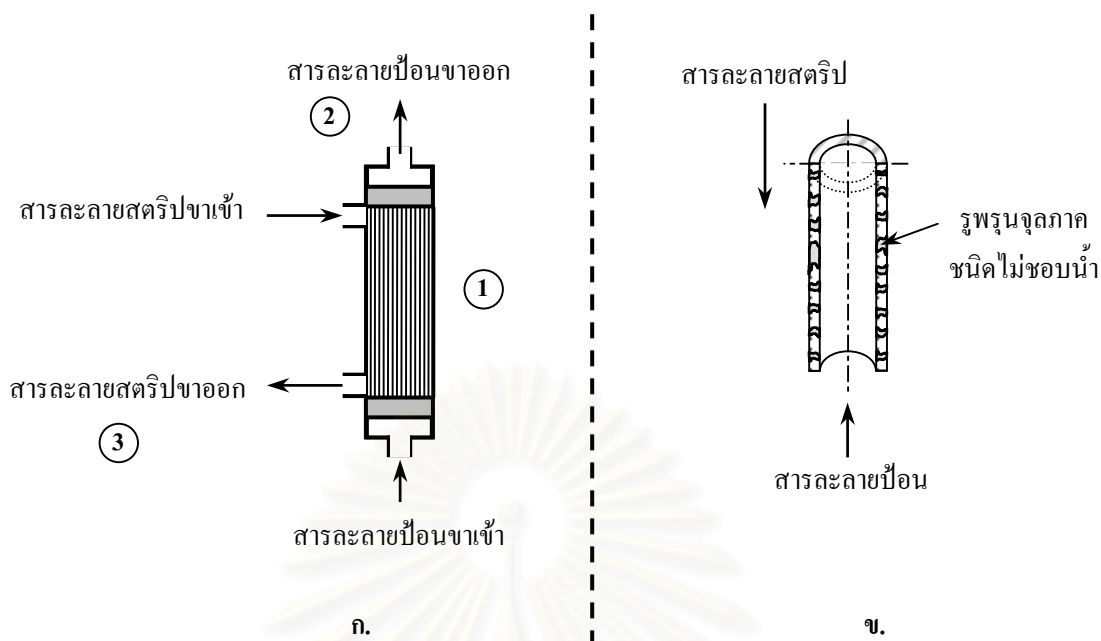
กระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในหอสกัด เดี่ยวนั้น การปฏิบัติการจะเริ่มต้นด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด เพื่อยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลว ให้พร้อมสำหรับเริ่มต้นกระบวนการสกัด กระทำได้โดยป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัด (ไตรนอร์มัลออกทิลลามีน) กับตัวทำละลายอินทรีย์ (น้ำมันก๊าด) ในสัดส่วนความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสม โดยป้อนสารละลายผสมที่ได้ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อ เส้นใยกลวงในหอสกัด สารละลายผสมนี้จะไหลเข้าไปในรูพรุนจุลภาคชนิดไม่ชอบน้ำของเส้นใย กลวงภายในหอสกัด ซึ่งจะเป็นแหล่งยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวเอาไว้ด้วยแรงดึงดูดของรูพรุนจุลภาค (Capillary force) และสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electro affinity) เกิดเป็นเยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงอยู่ ภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง และทำหน้าที่ขวางกั้นวัฏภาคระหว่างภายนอกและภายในท่อ เส้นใยกลวงเอาไว้ (Patthaveekongka et. al., 2003) ทำให้โมดูลเส้นใยกลวงพร้อมสำหรับเริ่มต้น กระบวนการสกัดต่อไป

จากนั้นเริ่มดำเนินการสกัด ด้วยการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปพร้อมกันเข้าสู่หอสกัด โดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าสู่ภายในท่อของเส้นใยกลวง และป้อนสารละลายสตรีปให้ไหลอยู่ภายนอกท่อเส้นใยกลวง ด้วยอัตราการไหลที่เท่ากันและมีลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกัน (Counter-current flow) โดยทันทีที่สารละลายป้อนสัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวจะเกิดปฏิกิริยาการสกัดดังสมการที่ 2-1 จากปฏิกิริยาการสกัดทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดไทรนอร์มัลออกทิลลามีนกับซีเรียมไอออน ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของซีเรียมไอออนออกจากสารละลายป้อนไปสู่เยื่อแผ่นเหลวที่ยึดตรึงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง และดำเนินการสกัดไปจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการสกัดอย่างรวดเร็ว (M. H. Yi, 1997)

ลำดับต่อมาสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านชั้นเยื่อแผ่นเหลว ไปสู่ผิวสัมผัสทางด้านฝั่งสารละลายสตรีปและเกิดปฏิกิริยาการนำกลับกับสารละลายสตรีปดังสมการที่ 2-2 ซึ่งปฏิกิริยาการนำกลับนั้นจะปลดปล่อยซีเรียมไอออนออกจากวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปสู่วัฏภาคสารละลายสตรีป และเกิดเป็นสารสกัดกลับคืนสู่วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยปฏิกิริยาการนำกลับจะเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของซีเรียมไอออนออกจากวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปสู่วัฏภาคสารละลายสตรีปนั่นเอง และปฏิกิริยาการนำกลับจะดำเนินไปจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการนำกลับอย่างรวดเร็วเช่นกัน (Mark and Porter, 1990; Marr and Kopp, 1982; Yi , 1995) กระบวนการจะดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ ข้างต้นซ้ำๆ ไปจนกระทั่งครบปริมาตรของสารละลายทั้งสอง เป็นอันครบรอบการปฏิบัติการแรก และจะดำเนินการสกัดรอบต่อไปจนกระทั่งได้ครบตามจำนวนรอบการสกัดที่ต้องการต่อไป

กระบวนการตามขั้นตอนทั้งหมดข้างต้นมีผลทำให้ซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนเกิดการถ่ายเทมวลออกไปสู่สารละลายสตรีป โดยมีกลไกการถ่ายเทมวลเป็นการเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ขวางกั้นสารละลายทั้งสองนั่นเอง (Jeong and Ju, 2002; Chaudry, 1996) ซึ่งกระบวนการสามารถแสดงแผนผังการไหลของวัฏภาคต่างๆ ภายในกระบวนการได้ดังรูปที่ 2.1





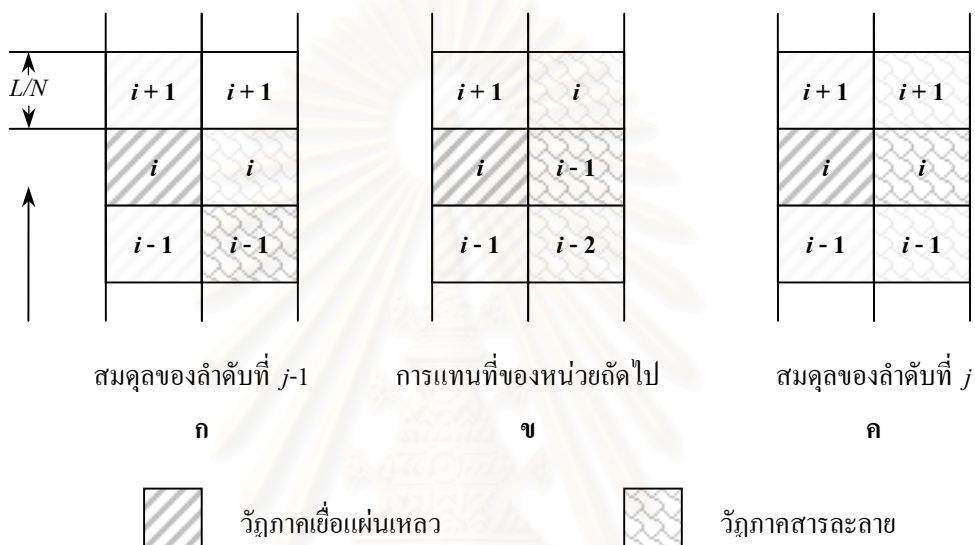
รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังของชุดการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

พิจารณาจากรูปที่ 2.1 ในส่วนของรูปย่อย ก. แสดงแผนผังของกระบวนการสกัดซึ่งมีส่วนประกอบใหญ่ๆ 3 ส่วนนั่นคือส่วนที่ 1 หอสกัด ส่วนที่ 2 คือส่วนของสารละลายป้อนและ ส่วนที่ 3 คือส่วนของสารละลายสตรีป โดยที่ภายในหอสกัดจะบรรจุเส้นใยกลวงขนาดเล็กจำนวนมากมายหลายเส้น โดยเส้นใยกลวงแต่ละเส้นสามารถแสดงได้ดังรูปย่อย ข. ซึ่งจะแสดงภาพจำลองขยายขนาดของเส้นใยกลวงขนาดเล็กที่อยู่ภายในหอสกัด เส้นใยกลวงแต่ละเส้นจะมีรูพรุนจุลภาคชนิดไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic micro-porous) ซึ่งรูพรุนจุลภาคเหล่านี้จะเป็นแหล่งยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวให้มีเสถียรภาพ (Thamphiphit, 1996; Ramakul and Panchareon, 2003) โดยลักษณะการปฏิบัติของกระบวนการจะสอดคล้องกับแบบจำลองการไหลในท่อ ซึ่งจะกล่าวเป็นลำดับต่อมา

### 2.3 รูปแบบสมมูลการไหลในท่อ (Tubular Flow Model)

จากการศึกษาของ Chen และคณะ (1980) ก่อให้เกิดแนวความคิดใหม่ อันนำไปสู่การประยุกต์ใช้รูปแบบสมมูลการไหลในท่อกับกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่

พยางค์ด้วยเส้นใยกลวง โดยพิจารณาจากรูปแบบขั้นตอนสมมูลการถ่ายเทมวล ซึ่งจะแบ่งโมดูลเส้นใยกลวง ให้เป็นหน่วยย่อยๆ ขนาดเล็กจำนวน  $N$  ส่วนซึ่งแต่ละหน่วยจะมีขนาดเท่าๆ กัน และมีขนาดเท่ากับ  $L/N$  โดยที่  $L$  คือความยาวของโมดูลเส้นใยกลวง ขั้นตอนแต่ละขั้นจะถูกแทนด้วย  $(i, j)$  โดยที่  $i$  คือหมายเลขลำดับของขั้นตอนแต่ละขั้น ส่วน  $j$  คือลำดับการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของหน่วยย่อยแต่ละหน่วย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนผังของรูปแบบสมมูลการไหลในท่อ

จากรูปที่ 2.2 แสดงหน่วยเล็กๆ ของภูมิภาคสารละลายกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสของภูมิภาคทั้งสองในแต่ละลำดับขั้นตอนต่างๆ ซึ่งจะประกอบไปด้วยรูปย่อยๆ ได้ 3 รูป (ก, ข และ ค) ตามลำดับของ  $j$  โดยในแต่ละรูปย่อยจะสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนนั่นคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่อยู่ทางด้านซ้ายมือซึ่งจะเป็นส่วนของเยื่อแผ่นเหลว และส่วนที่สองเป็นส่วนที่อยู่ทางด้านขวามือซึ่งจะเป็นส่วนของภูมิภาคสารละลาย

กระบวนการจะเริ่มต้นจากสมมูลของลำดับที่  $j-1$  ดังรูปย่อย ก จะแสดงหน่วยเล็กๆ ของภูมิภาคต่างๆ โดยแต่ละหน่วยเล็กๆ จะอยู่ในภาวะสมมูลซึ่งกันและกัน ดังนั้นจึงมีความเข้มข้นของไอออนโลหะสมมูลกันทั้งภูมิภาคสารละลายและภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวเมื่อถูกยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในหอสกัดไว้แล้วนั้น จะเป็นภูมิภาคที่หยุดอยู่นิ่งไม่มีการ

เคลื่อนที่ ลำดับต่อมาเป็นลำดับการแทนที่ของหน่วยเล็กๆ ลำดับถัดไปตั้งรูปย่อย ข วิทยาศาสตร์ ละลายจะไหลเคลื่อนย้ายตำแหน่งไปข้างหน้า 1 ตำแหน่งปริมาตรและความเข้มข้นของสารในแต่ละ หน่วยเล็กๆ จะถูกย้ายตำแหน่งเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหนึ่งขั้นตอนตามลำดับ จากรูปพิจารณาหน่วย เล็กๆ ของวิทยาศาสตร์ละลายในลำดับที่  $i$  ซึ่งจะสมดุลกับหน่วยเล็กๆ ของวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวใน ลำดับที่  $i$  ในรูปย่อย ก จะเคลื่อนย้ายตำแหน่งขึ้นไปหนึ่งตำแหน่งซึ่งจะตรงกับหน่วยเล็กๆ ของ วิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวในลำดับที่  $i+1$  ในรูปย่อย ข โดยที่หน่วยเล็กๆ ของวิทยาศาสตร์ละลายในลำดับ ที่  $i-1$  จะไหลเคลื่อนย้ายตำแหน่งขึ้นมาแทนที่หน่วยเล็กๆ ของวิทยาศาสตร์ละลายในลำดับที่  $i$  ตาม ลำดับเป็นต้น ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายเท่ากับ  $y(i, j-1)$  ที่เริ่มต้น อยู่ในตำแหน่ง  $i$  จะเคลื่อนย้ายตำแหน่งไปแทนที่ตำแหน่ง  $i+1$  ซึ่งหลังจากนั้นจะเกิดสมดุลใหม่อย่าง รวดเร็ว และขั้นตอนสมดุลถัดไปของลำดับที่  $j$  (รูปย่อย ค) จะเริ่มดำเนินการเป็นลำดับต่อไป

สมดุลมวลของแต่ละองค์ประกอบที่  $i$  และ  $j$  สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2-4

$$V_{aq}y(i-1, j-1) + V_Mx(i, j-1) = V_{aq}y(i, j) + V_Mx(i, j) \quad \text{--- 2-4}$$

โดยที่  $V_{aq}$  และ  $V_M$  เป็นปริมาตรของวิทยาศาสตร์ละลายและปริมาตรของเชื่อมแผ่นเหลว ต่อหนึ่งหน่วยเล็กๆ ในแต่ละขั้นตอนตามลำดับและสมมุติให้มีค่าคงที่ นอกจากนี้เราต้องตั้งสมมุติฐาน เพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- 1) การกระจายตัวของไอออนโลหะระหว่างวิทยาศาสตร์ของเชื่อมแผ่นเหลวและวิทยาศาสตร์ของสารละลาย มีลักษณะเป็นเชิงเส้นดังสมการที่ 2-5 โดยที่  $k$  ขึ้นกับค่า pH

$$x = ky \quad \text{--- 2-5}$$

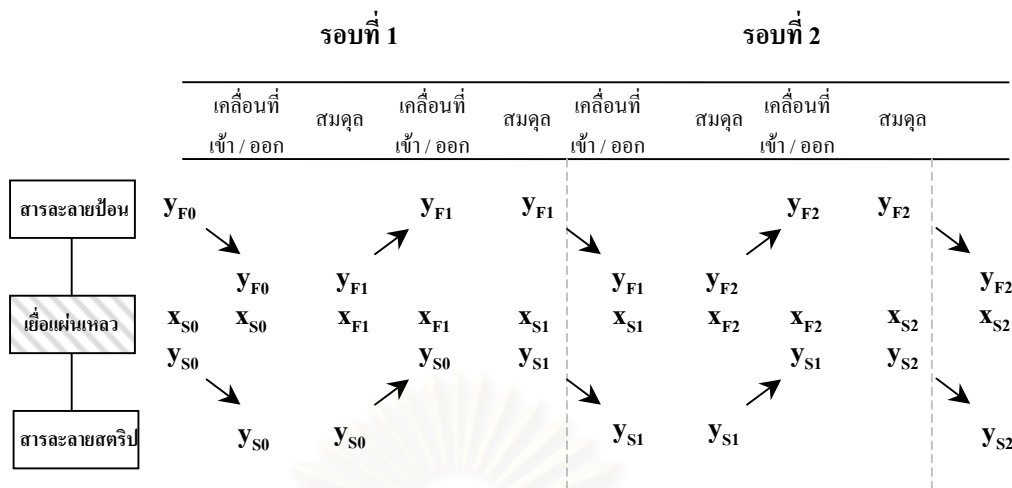
- 2) ปริมาตรของวิทยาศาสตร์ของเหลวเท่ากับปริมาตรของเชื่อมแผ่นเหลวต่อหนึ่งขั้นตอน
- 3) ปฏิกิริยาเกิดเร็วมาก ดังนั้นแต่ละหน่วยเล็กๆ จะเข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็ว
- 4) เชื่อมแผ่นเหลวมีขนาดบางมาก การแพร่ผ่านเชื่อมแผ่นเหลวจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

## 2.4 วิธีการสร้างกราฟสำหรับระบบหอสกัดเดี่ยว

### (Graphical solution for one-column system)

จากการศึกษาของ Chen และคณะ (1980) พบเกี่ยวกับวิธีการหาจำนวนขั้นตอนสมดุลในกระบวนการกลั่น (Distillation Process) จากทฤษฎีของแมคเคป (McCabe Theory) (Smith et. al., 2000) เป็นจุดเริ่มต้นของแนวความคิดในการประยุกต์วิธีการสร้างกราฟความสัมพันธ์ ของสมดุลระหว่างวัฏภาคต่างๆ ในกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยผลที่ได้ก็นำมาซึ่งวิธีการสำหรับใช้ทำนายการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวด้วยวิธีการสร้างกราฟ ซึ่งแผนผังการดำเนินการและวิธีการเขียนกราฟสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

พิจารณาจากรูปที่ 2.2 ในส่วนของรูปย่อย ก กระบวนการทั้งหมดจะประกอบไปด้วยหอสกัดที่บรรจุเส้นใยกลวง ที่ได้รับการยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวให้อยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงไว้แล้ว โดยที่ปลายด้านหนึ่งของหอสกัดจะต่อเข้ากับถังพักส่วนล่าง ซึ่งเป็นถังพักสารละลายป้อนเริ่มต้นเข้า ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อเส้นใยกลวงในหอสกัด ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของหอสกัดจะต่อเข้ากับถังพักสารละลายป้อนส่วนบน ซึ่งเป็นถังพักสารละลายป้อนขาออกจากหอสกัดตามลำดับ บริเวณด้านข้างของหอสกัดจะเป็นช่องทางไหลเข้าและไหลออกจากหอสกัดของสารละลายสตรีป ซึ่งจะไหลอยู่ภายนอกท่อเส้นใยกลวง โดยบริเวณต้นทางไหลเข้าจะต่อเข้ากับถังพักสารละลายสตรีปขาเข้า และที่ปลายทางไหลออกจะต่อเข้ากับถังพักสารละลายสตรีปขาออก โดยทั้งสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปจะป้อนเข้าสู่หอสกัดด้วยเครื่องสูบ ที่อัตราการไหลคงที่และเท่ากัน แต่มีลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกัน โดยกระบวนการจะดำเนินไปเป็นไปตามกลไกการสกัดตามขั้นตอนต่างๆ และสอดคล้องกับแผนผังการดำเนินการตามรูปแบบสมดุลการไหลในท่อดังที่กล่าวมาแล้วในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นแผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการปฏิบัติการต่างๆ ในแต่ละรอบของการปฏิบัติการได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนผังขั้นตอนการสกัดไอออนโลหะด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว

จากรูปที่ 2.3 แสดงแผนผังขั้นตอนการปฏิบัติการ การสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พ่วงด้วยเส้นใยกลวงในระบบหอสกัดเดี่ยว สารละลายป้อนและสารละลายสตรีปในถังพักก่อนเริ่มดำเนินการจะควบคุมให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างหรือ pH เท่ากับ  $pH_1$  และ  $pH_2$  ตามลำดับ การปฏิบัติการจะเริ่มจากป้อนสารละลายป้อนที่มีไอออนโลหะความเข้มข้น  $y_{F0}$  ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงในหอสกัด ไอออนโลหะในสารละลายป้อนจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่บริเวณผิวสัมผัส เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัดอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการสกัด ในเวลาเดียวกันจะป้อนสารละลายสตรีปความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ  $y_{S0}$  ให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวงในหอสกัด สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัดที่เกิดขึ้นในฝั่งสารละลายป้อนจะแพร่มายังฝั่งสารละลายสตรีปและเกิดปฏิกิริยาการนำกลับกับสารละลายสตรีป ทำให้ไอออนโลหะได้รับการปลดปล่อยออกจากสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ออกไปสู่วัฏภาคสารละลายสตรีปโดยที่หน่วยเล็กๆ ของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปที่ไหลเข้าสู่หอสกัดกำหนดให้มีปริมาตรเท่ากัน ( $V_F = V_S$ ) กำหนดให้  $x$  และ  $y$  เป็นความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และเป็นความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายตามลำดับ พิจารณาสมการที่ 2-5 สามารถสร้างเส้นสมดุลได้ 2 เส้นบนระนาบ  $x$ - $y$  เดียวกันนั่นคือเส้นสมดุลการสกัด ซึ่งมีค่าความชัน

เท่ากับ  $k_F$  และเส้นสมดุลการนำกลับ ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ  $k_S$  ความเข้มข้นเริ่มต้นในหอสกัด ( $y_o, x_o$ ) แสดงได้ด้วยจุด  $y_{F0}$  โดยที่หนึ่งรอบของการปฏิบัติการประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนป้อนสารละลายเข้าสู่หอสกัด : จะดำเนินการป้อนสารละลายป้อนเริ่มต้น ( $F_o$ ) ซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนโลหะเท่ากับ  $y_o$  ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงในหอสกัด พร้อมกันกับป้อนสารละลายสตรีปเริ่มต้น ( $S_o$ ) ให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวงในหอสกัด

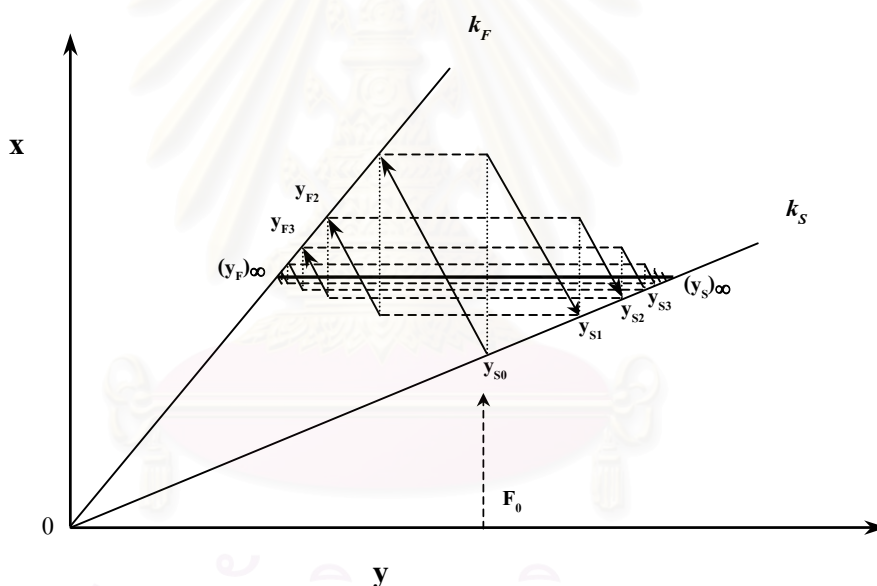
ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการเกิดสมดุลในเยื่อแผ่นเหลว : ทันทีที่ไอออนโลหะในสารละลายป้อนสัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลว จะเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว โดยปฏิกิริยาการสกัดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดสมดุลขึ้นทันทีกับเยื่อแผ่นเหลว บนเส้นสมดุลการสกัดที่ความเข้มข้น ( $y_{F1}, x_{F1}$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยจุด  $y_{F1}$  บนเส้นสมดุล  $k_F$  โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคในฝั่งสารละลายสตรีป และเกิดปฏิกิริยาการนำกลับกับสารละลายสตรีป โดยไอออนโลหะในสารประกอบเชิงซ้อนจะได้รับการนำกลับออกจากวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปสู่วัฏภาคสารละลายสตรีป จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลการนำกลับซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกับสารละลายสตรีป บนเส้นสมดุลการนำกลับที่ความเข้มข้น ( $y_{S1}, x_{S1}$ ) (Chaudry, 1996) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยจุด  $y_{S1}$  บนเส้นสมดุล  $k_S$  โดยเมื่อลากเส้นต่อจุดระหว่างจุด  $y_{F1}$  กับจุด  $y_{S1}$  จะได้เส้นปฏิบัติการ (Operating line) มีค่าความชันเท่ากับ  $(-V_{aq}/V_M)$

ขั้นตอนที่ 3 สารละลายไหลออกจากหอสกัด : หลังจากสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปเกิดปฏิกิริยาตามกลไกและเข้าสู่สภาวะสมดุลกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวแล้ว สารละลายป้อนความเข้มข้น ( $y_{F1}, x_{F1}$ ) จะไหลออกจากภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงในหอสกัดกลับไปสู่ถังพักสารละลายป้อน พร้อมกันกับสารละลายสตรีปความเข้มข้น ( $y_{S1}, x_{S1}$ ) ซึ่งไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้น



ใยกลวงในหอสกัดจะไหลกลับไปสู่ถังพักสารละลายสตรีป และพร้อมจะดำเนินการสกัดในรอบการปฏิบัติการต่อไป

การปฏิบัติการในรอบที่สองจะเริ่มจากการป้อนสารละลายป้อนจากถังพักสารละลายป้อนให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อเส้นใยกลวงในหอสกัด พร้อมกันกับป้อนสารละลายสตรีปจากถังพักสารละลายสตรีปให้ไหลอยู่ภายนอกท่อเส้นใยกลวงในหอสกัด หลังจากนั้นกระบวนการจะดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2 และ 3 ตามลำดับดังรูปที่ 2.3 โดยวิธีหาผลลัพท์ด้วยวิธีการสร้างกราฟของกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบหอสกัดเดี่ยว แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วิธีการสร้างกราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว

เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ จนครบรอบการปฏิบัติการอย่างสมบูรณ์ และได้ดำเนินการในรอบถัดๆ มาสิ่งที่สังเกตเห็นได้จากผลของการดำเนินการคือ จำนวนรอบของการปฏิบัติการ ( $N$ ) จะมีค่ามากขึ้นและความเข้มข้นของไอออนโลหะในถังพักจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งในถังพักสารละลายป้อนจะมีค่าความเข้มข้นเท่ากับ  $[y_F]_\infty$  และในถังพักสารละลายสตรีปจะมีค่าความเข้มข้นเท่า

กับ  $[y_s]_\infty$  ตามลำดับ โดยที่สภาวะคงตัวนี้ ภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวจะมีองค์ประกอบของไอออนโลหะคงที่ ซึ่งอยู่ในสมดุลทั้งกับสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเท่ากับ  $[y_F]_\infty$  และสมดุลกับสารละลายสตรีปที่ความเข้มข้นเท่ากับ  $[y_S]_\infty$  และเป็นไปตามสมการที่ 2-4 โดยวิธีการคำนวณสามารถแสดงได้เท่ากับ  $x = k_F[y_F]_\infty = k_S[y_S]_\infty$  ดังนั้นเมื่อลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ  $[y_F]_\infty$  เข้ากับจุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ  $[y_S]_\infty$  แล้ว จะได้เส้นขนานกับแกน  $x$  นั้นเอง

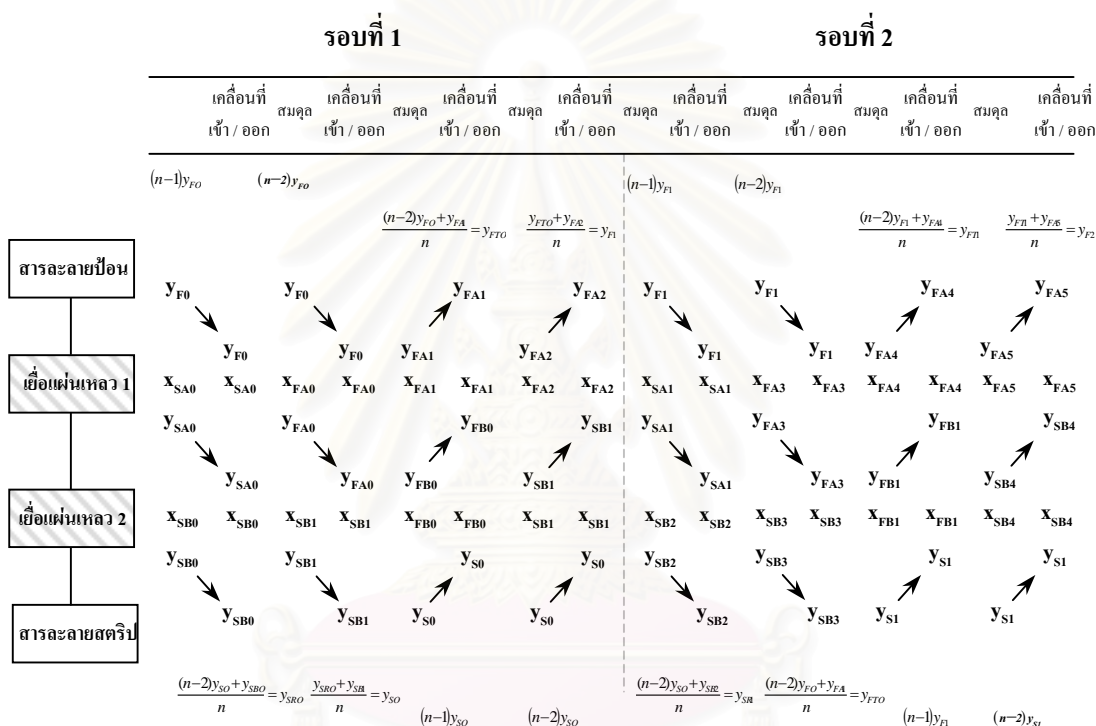
## 2.5 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางในระบบสองหอสกัด

### (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane System with Two Columns)

กระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พุงด้วยเส้นใยกลางในระบบสองหอสกัดนั้น กระบวนการจะประกอบไปด้วยโมดูลเส้นใยกลาง (หอสกัด) จำนวนสองโมดูลต่ออนุกรมกัน และถังพักสองถังดังรูปที่ 2.5 ถังพักส่วนบนเป็นถังพักสารละลายป้อน ส่วนถังพักส่วนล่างเป็นถังพักสารละลายสตรีป โดยระดับค่า pH ของถังพักสารละลายป้อนจะควบคุมไว้ที่  $pH_1$  ส่วนถังพักสารละลายสตรีปจะควบคุมไว้ที่  $pH_2$  การปฏิบัติการเริ่มต้นด้วยการป้อนสารละลายป้อนความเข้มข้น  $y_0$  จากถังพักส่วนบนเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลางของหอสกัดที่ 1 ซึ่งปริมาตรของสารละลายป้อนที่ป้อนเข้าไปนั้น จะเข้าไปแทนที่ปริมาตรของสารละลายป้อนที่มีอยู่ก่อนแล้วภายในหอสกัดที่ 1 ทำให้สารละลายป้อนที่มีอยู่ก่อนแล้วในหอสกัดที่ 1 ไหลออกไปสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลางของหอสกัดที่ 2 ซึ่งจะเข้าไปแทนที่ปริมาตรของสารละลายป้อนที่มีอยู่ก่อนแล้วภายในหอสกัดที่ 2 และสารละลายป้อนที่มีอยู่ก่อนแล้วในหอสกัดที่ 2 นั้นจะไหลกลับไปยังถังพักส่วนบนตามลำดับ

ในเวลาเดียวกันเมื่อเริ่มป้อนสารละลายป้อน จะดำเนินการป้อนสารละลายสตรีปในทำนองเดียวกันกับการป้อนสารละลายป้อน แต่จะป้อนสารละลายสตรีปให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลาง โดยการปฏิบัติการจะทำการป้อนสารละลายสตรีปจากถังพักส่วนล่างให้ไหลเข้าสู่หอสกัดที่ 2 โดยให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลางของหอสกัดที่ 2 ซึ่งปริมาตรของสารละลาย

สตรีปที่ป้อนเข้าไปนั้น จะไหลเข้าไปแทนที่สารละลายสตรีปที่มีอยู่ก่อนแล้วในหอสกัดที่ 2 ทำให้สารละลายสตรีปที่มีอยู่ก่อนแล้วในหอสกัดที่ 2 ไหลออกไปสู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวงในหอสกัดที่ 1 ซึ่งจะเข้าไปแทนที่ปริมาตรของสารละลายสตรีปที่มีอยู่ก่อนแล้วภายในหอสกัดที่ 1 และสารละลายสตรีปที่มีอยู่ก่อนแล้วในหอสกัดที่ 1 นั้นจะไหลกลับคืนสู่ถังพักส่วนล่างตามลำดับ เป็นอันครบหนึ่งรอบการปฏิบัติการ ซึ่งขั้นตอนการปฏิบัติการสามารถนำมาเขียนเป็นแผนผังการปฏิบัติการได้ดังรูปที่ 2.5 และสามารถอธิบายได้พอสังเขปเป็นลำดับดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 แผนผังขั้นตอนการสกัดไอออนโลหะด้วย HFSLM ในระบบสองหอสกัด

ก) การถ่ายเทเข้าสู่หอสกัด : เป็นขั้นตอนซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อยสองขั้นตอน ซึ่งทั้งสองขั้นตอนย่อยนี้จะเกิดขึ้น ณ เวลาเดียวกันโดยที่

ขั้นตอนย่อยแรก : สารละลายป้อนในถังพักส่วนบนจะถูกถ่ายเทเข้าสู่หอสกัดที่ 1 โดยให้ไหลอยู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวง ทำให้สารละลายป้อนที่มีอยู่เดิมในหอสกัดที่ 1 จะถ่ายเทออกไปยังหอสกัดที่ 2 โดยให้ไหลอยู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวง และสารละลายป้อนที่มีอยู่เดิมในหอสกัดที่ 2 จะไหลกลับไปยังถังพักส่วนบนตามลำดับ



สองตามลำดับ ในขณะที่  $k_s$  เป็นค่าคงที่สมดุลไอออนโลหะของปฏิกิริยาการนำกลับในหอสกัดแรก และหอสกัดที่สองตามลำดับ การนำเสนอวิธีการสร้างกราฟทำนายผลการสกัดแยกไอออนโลหะ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งโครงสร้างของกราฟจะมีลักษณะคล้ายกับวิธีการสร้างกราฟสำหรับกระบวนการสกัดในระบบหอสกัดเดี่ยวดังที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น นั่นคือสารละลายป้อนเริ่มต้นซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ  $[y_{F0}]$  และสารละลายสตรีปเริ่มต้นซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ  $[y_{S0}]$  จะป้อนเข้าสู่หอสกัดทั้งสองโดยองค์ประกอบของไอออนโลหะในสารละลายป้อนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยที่เส้นปฏิบัติการเป็นผลลัพท์จากการจัดรูปสมการที่ 2-4 มีค่าความชันเท่ากับ  $(-V_{aq} / V_M)$  จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลการสกัดบนเส้นสมดุล  $k_F$  ที่จุด  $y_{F1}$  ลำดับต่อมาสารละลายป้อนหลังจากเข้าสู่สถานะสมดุลในหอสกัดที่ 1 แล้วจะถ่ายเทและเข้าไปแทนที่สารละลายป้อนในหอสกัดที่ 2 ซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นประในแนวดิ่ง โดยทันทีที่สารละลายป้อนเข้าสู่หอสกัดที่ 2 แล้วจะสัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวที่สมดุลเริ่มต้นในลำดับก่อนหน้านั้น ซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นประแนวระดับผ่านค่าความเข้มข้นเริ่มต้น  $[y_{F0}]$  โดยจุดตัดที่เกิดขึ้นแสดงได้ด้วยจุด F1 จะเป็นจุดเริ่มต้นของสารละลายป้อนในหอสกัดที่ 2 เกิดการสกัดจนเข้าสู่สมดุลใหม่ มีเส้นปฏิบัติการซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ  $(-V_{aq} / V_M)$  เช่นเดียวกันกับหอสกัดที่ 1 และสมดุลใหม่ที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ด้วยจุด  $y_{F2}$  บนเส้นสมดุลการสกัด  $k_F$  หลังจากนั้นสารละลายป้อนในหอสกัดที่ 2 จะถ่ายเทออกจากหอสกัดที่ 2 กลับไปยังถังพักสารละลายป้อนและดำเนินการซ้ำดังเช่นที่กล่าวมาแล้ว จนกระทั่งกระบวนการเข้าสู่สถานะคงตัวต่อไป

ในขณะเดียวกันนั้น สารละลายสตรีปจะป้อนเข้าสู่หอสกัดที่ 2 โดยสมดุลการนำกลับสามารถแสดงได้ด้วยจุด  $y_{S1}$  บนเส้นสมดุลการนำกลับ  $k_S$  ลำดับต่อมาสารละลายสตรีปหลังจากเกิดสมดุลกับหอสกัดที่ 2 แล้วจะถ่ายเทออกจากหอสกัดที่ 2 ให้ไหลเข้าไปแทนที่สารละลายสตรีปในหอสกัดที่ 1 ซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นประแนวดิ่ง โดยวัฏภาคสารละลายสตรีปจะสัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดที่ 1 ซึ่งเกิดสมดุลกับสารละลายป้อนโดยสามารถแสดงได้ด้วยเส้นประแนวระดับ จุดตัดที่เกิดขึ้นแสดงได้ด้วยจุด S1 จะเป็นจุดเริ่มต้นของสารละลายสตรีปในหอสกัดที่ 1 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับจนกระทั่งเข้าสู่สถานะสมดุลการนำกลับ โดยที่เส้นปฏิบัติการจะมีค่าความชันเท่ากับ  $(-V_{aq} / V_M)$  เช่นเดียวกันกับขั้นตอนการสกัด เนื่องมาจากกระบวนการมีขั้นตอนการ

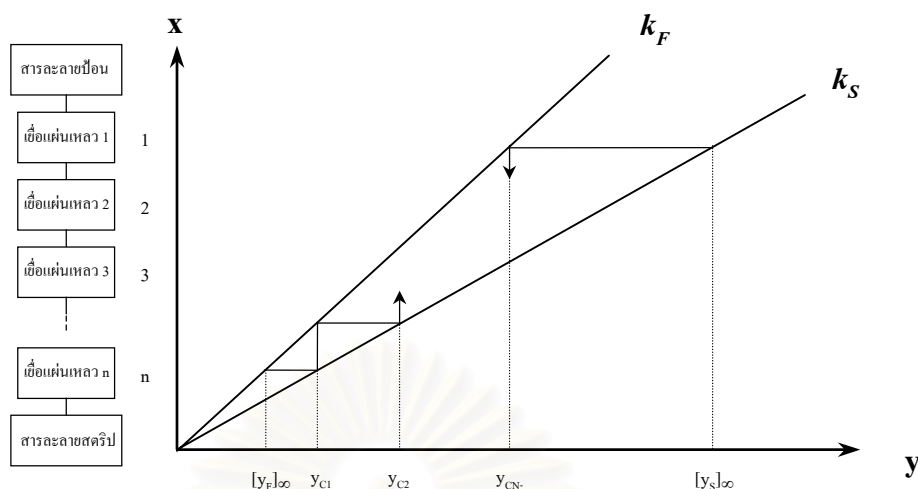
สกัดและขั้นตอนการนำกลับ เกิดขึ้นพร้อมกันภายในโมดูลเส้นใยกลวงเดียวกันนั่นเอง ซึ่งสมมูลที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ด้วยจุด  $y_{S2}$  บนเส้นสมมูลการนำกลับ  $k_S$  หลังจากนั้นสารละลายสตรีปในหอสกัดที่ 1 จะถ่ายเทออกจากหอสกัดกลับไปยังถังพักสารละลายสตรีป และกระบวนการจะพร้อมสำหรับเริ่มต้นในรอบการปฏิบัติการลำดับต่อไป และเมื่อกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วพิจารณาจากรูปที่ 2.6 จะพบว่าค่า  $[y_F]_{\infty}$  และ  $[y_S]_{\infty}$  จะแสดงค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะที่สภาวะคงตัว ในถังพักสารละลายป้อนและในถังพักสารละลายสตรีปตามลำดับ

## 2.6 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบหลายหอสกัด

### (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane System with Multi Columns)

กระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบสองหอสกัดดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นแล้วนั้น ระบบสามารถพัฒนาขยายกระบวนการออกไปได้โดยเพิ่มจำนวนหอสกัดให้มากขึ้น กลายเป็นระบบหลายหอสกัด (Multi-Column) ได้ด้วยดังวิธีการตามรูปที่ 2.7 กระบวนการจะประกอบไปด้วยถังพักสารละลายส่วนบนซึ่งเป็นถังพักสารละลายป้อน โดยต่อเข้ากับช่องทางไหลเข้าสู่ภายในท่อเส้นใยกลวงของหอสกัดที่ 1 ในฝั่งสารละลายป้อนขาเข้า ส่วนในฝั่งสารละลายป้อนขาออกจะเชื่อมต่อกับช่องทางไหลเข้าสู่ภายในท่อเส้นใยกลวงในฝั่งสารละลายป้อนขาเข้าของหอสกัดที่ 2 เรียงต่อกันเป็นลำดับไปเรื่อย ๆ และในหอสกัดสุดท้ายบริเวณช่องทางสารละลายป้อนขาออกจะต่อกลับมายังถังพักสารละลายป้อนส่วนบนตามลำดับ ในส่วนของถังพักสารละลายส่วนล่างซึ่งเป็นถังพักสารละลายสตรีปจะต่อเข้ากับช่องทางไหลภายนอกท่อเส้นใยกลวงขาเข้าของหอสกัดลำดับสุดท้าย โดยในช่องทางสารละลายสตรีปขาออกของหอสกัดลำดับสุดท้ายจะเชื่อมต่อกับช่องทางไหลสารละลายสตรีปขาเข้าของหอสกัดลำดับก่อนหน้านั้น และเรียงลดลำดับไปเรื่อยๆ จนกระทั่งออกจากหอสกัดแรก ซึ่งจะต่อกลับมายังถังพักส่วนล่าง โดยถังพักสารละลายป้อนและถังพักสารละลายสตรีปจะควบคุมและรักษาให้มีค่า pH อยู่ที่  $pH_1$  และ  $pH_2$  ตามลำดับเช่นเดียวระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด





รูปที่ 2.7 วิธีการสร้างกราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะด้วย HFSLM ในระบบหลายหอสกัด

ในกระบวนการทันทีที่ของเหลวถ่ายเทผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค จะเกิดปฏิกิริยาตามกลไกการสกัดผ่านเยื่อแผ่นเหลว และเข้าสู่สมดุลการสกัดและสมดุลการนำกลับภายในหอสกัดอย่างรวดเร็ว ซึ่งการสร้างกราฟนั้นสามารถกระทำได้เช่นเดียวกับระบบหนึ่งและสองหอสกัด โดยหลักการสำหรับการสร้างกราฟในระบบหลายหอสกัดนั้นสามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.6 ซึ่งจะพบว่าทิศทางของเส้นกราฟระหว่างจุด  $[y_F]_\infty$  และ จุด  $[y_S]_\infty$  จะมีลักษณะเป็นขั้นบันได 2 ชั้น ซึ่งเป็นหลักสำคัญของวิธีการสร้างกราฟเพื่อทำนายผลการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ของกระบวนการสกัดในระบบหลายหอสกัด โดยเมื่อจำนวนหอสกัดเพิ่มขึ้นเป็น 3 หอสกัด สามารถสร้างกราฟได้ตามขั้นตอนดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในระบบสองสกัด และจะพบว่าทิศทางของเส้นกราฟระหว่างจุด  $[y_F]_\infty$  และ จุด  $[y_S]_\infty$  จะมีลักษณะเป็นขั้นบันได 3 ชั้น ดังนั้นเมื่อกระบวนการมีจำนวนหอสกัดเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน  $N$  หอสกัดแล้ว ทิศทางของเส้นกราฟระหว่างจุด  $[y_F]_\infty$  และ จุด  $[y_S]_\infty$  จะพบว่ามีลักษณะเป็นขั้นบันได  $N$  ชั้นนั่นเอง

โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ได้สารคดีวิธีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษากระบวนการสกัดแยกไอออน

ซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ต่อมาจะทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อันได้แก่ค่าคงที่การสกัดและค่าคงที่การนำกลับของกระบวนการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายผลการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอมาแล้วข้างต้น

โดยทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้จากการทดลองกับผลการทำนายการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟ นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาการสกัดแยกไอออนของโลหะธาตุตัวอื่นๆ อาทิเช่น แลนทานัมไอออน นีโอดีเมียมไอออน ซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มโลหะหายาก ร่วมกับแพลเลเดียมไอออน ซึ่งเป็นธาตุโลหะมีตระกูล โดยผลการเปรียบเทียบการสกัดแยกไอออนโลหะแต่ละชนิดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง กับวิธีการทำนายผลด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอไว้แล้วนั้น จะแสดงถึงผลสัมฤทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสร้างกราฟเพื่อใช้ในการทำนายผลการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ดังที่ได้นำเสนอ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ สามารถแสดงได้เป็นลำดับต่อไป

## บทที่ 3

### การทดลอง

บทนี้กล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง เครื่องมือที่ใช้ในการสกัดแยก ไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ รวมถึงวิธีการทดลองในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของไอออนซีเรียมเริ่มต้นที่เหมาะสมในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมในสารละลายสตริป ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ที่เหมาะสมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในสารละลายป้อน และ อัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลายในกระบวนการเป็นต้น โดยนำผลการทดลองที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทำนายการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟ นอกจากนี้ยังแสดงผลการสกัดแยก ไอออนโลหะอื่นๆ อาทิเช่น แลนทานัมไอออน นีโอดีเมียมไอออน และแพลเลเดียมไอออน ด้วยกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ในสภาวะที่เหมาะสมของไอออนโลหะแต่ละธาตุ ซึ่งเป็นสภาวะที่ได้จากการศึกษาวิจัยของนักวิจัยท่านอื่น เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการสกัดกับผลการทำนายการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองศึกษาการสกัดแยกไอออนโลหะต่างๆ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองศึกษานั้นเป็นสารเคมีที่มีคุณภาพในระดับเชิงวิเคราะห์ (Analytical Reagent Grade) ยกเว้นแพลเลเดียมคลอไรด์ และน้ำมัน Kerosene Jet A-1 ซึ่งมีระดับคุณภาพในเชิงการค้า (Commercial Reagent Grade) โดยสารเคมีทั้งสองได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทเกรทเทสโกลด์ แอนด์ รีไฟเนอรี จำกัด และบริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ตามลำดับ

ตาราง 3.1 แสดงรายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อทางเคมี	สูตรเคมี	บริษัทผู้ผลิต
สารละลายป้อน	Cerium sulphate	$Ce(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Merck
	Lanthanum chloride	$LaCl_3 \cdot 4H_2O$	Merck
	Neodymium oxide	$Nd_2O_3$	AnalaR <sup>®</sup> BHD
	Palladium chloride	$PdCl_2$	Greatest Gold & Refinery Ltd.
สารละลายสตริป	Sulphuric acid	$H_2SO_4$	Merck
	Nitric acid	$HNO_3$	AnalaR <sup>®</sup> BHD
	Sodium nitrite	$NaNO_2$	APS Chemical Ltd.
สารสกัด	Tri-n-octylamine	$C_{24}H_{51}N$	Fluka
	Di (2-Ethylhexyl) phosphate	$C_{16}H_{35}O_4P$	Sigma Chemical
	Thioridazine-HCl	$C_{21}H_{26}N_2S_2 \cdot HCl$	Sigma Chemical
	Oleic acid	$CH_3(CH_2)_7CHCH(CH_2)_7COOH$	Carlo Erba
ตัวทำละลายอินทรีย์	Kerosene Jet A-1	Complex hydrocarbon mixture	Thaioil Co. Ltd.
	Chloroform	$CHCl_3$	APS Chemical Ltd.
สารตรวจสอบ	Urea	$CO(NH_2)_2$	APS Chemical Ltd.
น้ำกลั่น	Double distillation water	$H_2O$	องค์การเภสัชกรรม กรุงเทพฯ
สารทำความสะอาด	Isopropanol	$CH_3CH(OH)CH_3$	Merck

การศึกษากระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัดนั้น ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด โดยทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากผลลัพท์จากวิธีการสร้างกราฟ ซึ่งจะเป็นอย่างการสาธิตวิธีการดำเนินการต่างๆ ของงานวิจัยนี้ซึ่งผลสัมฤทธิ์ของกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยวิธีการสร้างกราฟนั้น จำเป็นต้องเปรียบเทียบผลที่ได้กับการสกัดแยกไอออนโลหะชนิดอื่นๆ อีกด้วย ดังนั้นผลลัพท์จากกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะชนิดอื่นๆ นั้น จะนำสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะชนิดนั้นๆ จากผลการศึกษานักวิจัยท่านอื่นที่ได้ทำการศึกษามาแล้ว นำมาทำการศึกษาเปรียบเทียบกับผลลัพท์

ที่ได้จากวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอไปแล้วข้างต้น ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาไอออนโลหะแต่ละชนิด โดยแสดงรายละเอียดสารเคมีในแต่ละวัฏภาคของแต่ละกระบวนการได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดสารเคมีแต่ละชนิดที่ใช้ในแต่ละกระบวนการ

วัฏภาคสารละลายป้อน	วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว		วัฏภาคสารละลายสตริป
	สารสกัดที่ใช้	ตัวทำละลายอินทรีย์	
Cerium sulphate	Tri-n-octylamine, TOA	น้ำมันก๊าด	สารละลายกรดซัลฟิวริก
Lanthanum chloride	Di (2-Ethylhexyl) phosphate, D2EHPA	น้ำมันก๊าด	สารละลายกรดซัลฟิวริก
Neodymium oxide	Di (2-Ethylhexyl) phosphate, D2EHPA	น้ำมันก๊าด	สารละลายกรดไนตริก
Palladium chloride	Thioridazine-HCl & Oleic acid, TRHCl-OA	กลอโรฟอร์ม	สารละลายโซเดียมไนไตรต์

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ ชุดทดลอง และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาการสกัดแยกไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และไอออนโลหะชนิดอื่นๆ สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วย ชุดทดลองศึกษาที่ใช้ในการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ และเครื่องมือตรวจวัดค่าต่างๆ สามารถแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยได้เป็นลำดับดังต่อไปนี้

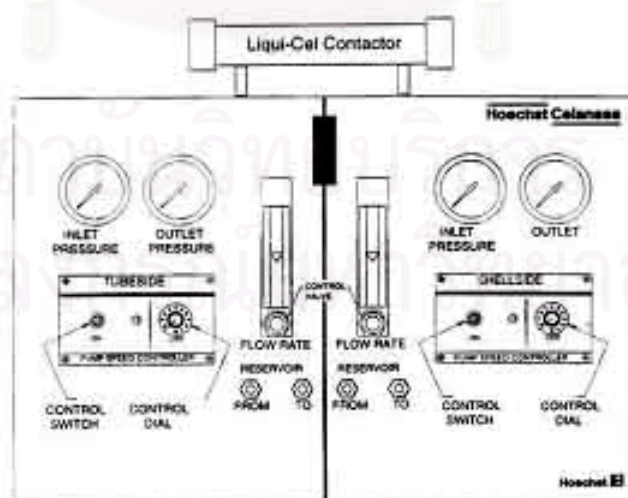
#### 3.2.1 ชุดทดลองศึกษา

ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการสกัดแยกไอออนโลหะ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สำหรับศึกษาการสกัดแยกไอออนโลหะแต่ละชนิดนั้นจะใช้ชุดทดลองศึกษาชุดเดียวกันทั้งหมด โดยใช้ชุดทดลอง Liqui-Cel<sup>®</sup> Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat.#5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของชุดทดลองศึกษาได้ดังรูป

ที่ 3.1 โดยรายละเอียดตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ บนชุดทดลอง Liqui-Cel<sup>®</sup> Liquid/Liquid Extraction System สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งชุดทดลองดังกล่าวนี้จะใช้โมดูลเส้นใยกลวง Celgard<sup>®</sup> (X-30) 240 Microporous Polypropylene Hollow Fiber ทรงกระบอกขนาด 2.5×8 นิ้ว Liqui-Cel<sup>®</sup> Membrane Contactor ซึ่งมีรายละเอียดข้อมูลคุณสมบัติของชุดโมดูลเส้นใยกลวงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงชุดทดลองการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ บนชุดทดลอง HFSLM



### 3.2.2 เครื่องมือตรวจวัด

สำหรับเครื่องมือตรวจวัดที่ใช้ในกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงนั้น ใช้เครื่องมือตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) รุ่น HI 8417 Microprocessor Bench pH/ °C Meter ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Hanna Instruments ในทุกการทดลองที่ทำการศึกษา ส่วนเครื่องมือสำหรับตรวจวัดค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะต่างๆ นั้นจะทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) Spectroflame Model M จากบริษัท Spectroanalytical Instruments (Germany) โดยนีโอดีเมียมไอออนจะทำการตรวจวัดซ้ำด้วยเครื่อง UV Visible Spectrophotometer รุ่น 6450 จากบริษัท Labquip International Limited และเครื่องมือสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของยูเรีย ซึ่งเป็นสารที่ใช้สำหรับตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวนั้น จะทำการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatograph (HPLC) รุ่น Waters 717 จากบริษัท Millipore (USA)

ตาราง 3.3 แสดงรายละเอียดของคุณลักษณะของชุด โมดูลเส้นใยกลวง

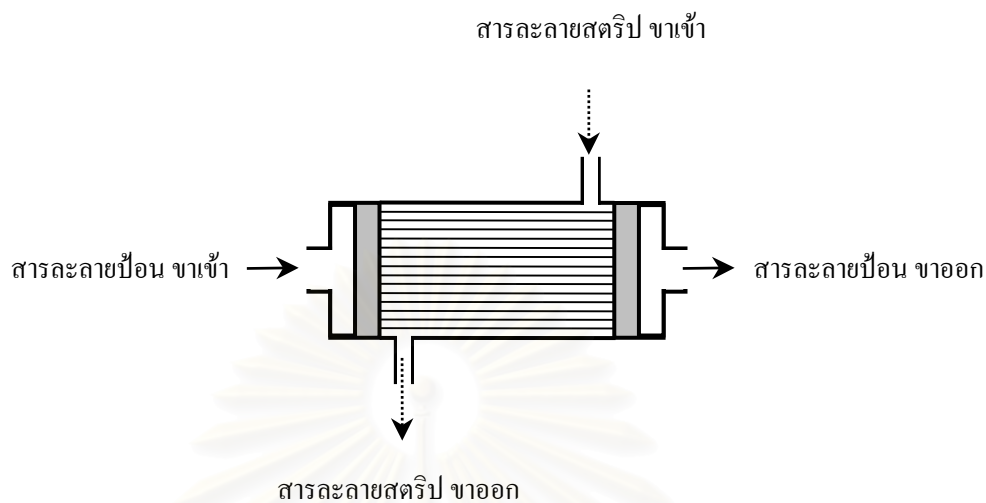
ลักษณะ	คุณลักษณะ
วัสดุเส้นใยกลวง	พอลิโพรไพลีน (Polypropylene)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลวง	30 %
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 Kg/cm <sup>2</sup> ( 60 psi )
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m <sup>2</sup> (15.2 ft <sup>2</sup> )
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> (74.4 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1°C ถึง 60°C
มิติของชุดเส้นใยกลวง (DXL)	8×28 cm ( 2.5×8 inch)

### 3.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมืออื่นๆ

สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมืออื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ อาทิเช่น ปีกเกอร์ กระจบอกรวด ขวดวัดปริมาตร ขวดรูปชมพู เป็นต้น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากบริษัท Pyrex<sup>®</sup> เครื่องชั่งสารเคมี ความละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น TC-254 ค่าความผิดพลาด  $\pm 0.0001$  กรัม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากบริษัท Denver Instrument Company อุปกรณ์วัดปริมาตรด้วย ไมโครปิเปตขนาดต่างๆ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากบริษัท Gilson สำหรับเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปตรวจสอบค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะกับเครื่องมือตรวจวัดชนิดต่างๆ

### 3.3 ลักษณะการปฏิบัติการ

รูปแบบ (Mode) ในการปฏิบัติการของชุดทดลองการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้น สามารถแบ่งรูปแบบตามลักษณะการป้อนสารเข้าสู่ชุดทดลองได้เป็น 2 รูปแบบดังนี้คือ รูปแบบที่ 1 เป็นรูปแบบชนิดไหลตามกัน (Co-current flow) การปฏิบัติการของรูปแบบการไหลนี้จะทำการป้อนสารเข้าสู่ชุดทดลองให้ไหลตามกัน และรูปแบบที่ 2 คือรูปแบบชนิดไหลสวนทางกัน (Counter-current flow) การปฏิบัติการของรูปแบบการไหลนี้จะทำการป้อนสารเข้าสู่ชุดทดลองให้ไหลสวนทางกันนั่นเอง ซึ่งจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมารูปแบบการไหลทั้งสองรูปแบบสำหรับชุดทดลองชุดนี้นั้น ให้ผลการศึกษาที่ไม่แตกต่างกัน (ไพศาล, 2541) ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า รูปแบบการปฏิบัติการทั้งสองไม่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในชุดทดลองนี้ (อิสรา, 2541) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รูปแบบการไหลแบบที่ 2 นั่นคือเป็นชนิดไหลสวนทางกัน ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการดังรูปที่ 3.3

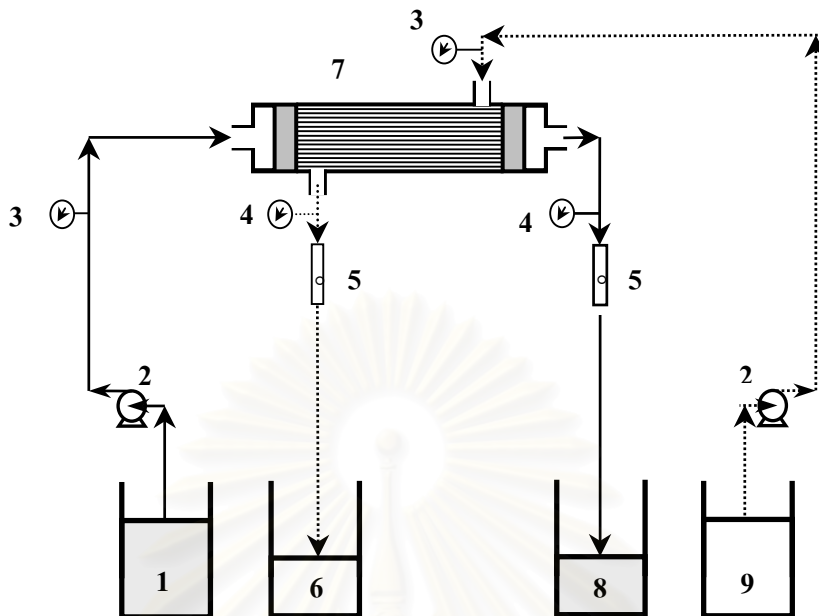


รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบการไหลแบบไหลสวนทางกัน ในโมดูลเส้นใยกลาง

ซึ่งรูปแบบการไหลทั้งสองแบบนี้ ยังสามารถออกแบบการปฏิบัติการได้หลายลักษณะ อาทิเช่น ลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว (One Through Mode) ลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบ (Circulating Mode) ลักษณะการปฏิบัติการแบบผสม (Semi-Circulating Mode) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ลักษณะการไหลเพียง 2 แบบนั่นคือ ลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว และลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 3.3.1 ลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว (One Through Mode)

ลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว เป็นลักษณะการปฏิบัติการที่จะดำเนินการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปให้ไหลผ่านชุดโมดูลเส้นใยกลางเพียงครั้งเดียว ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.4

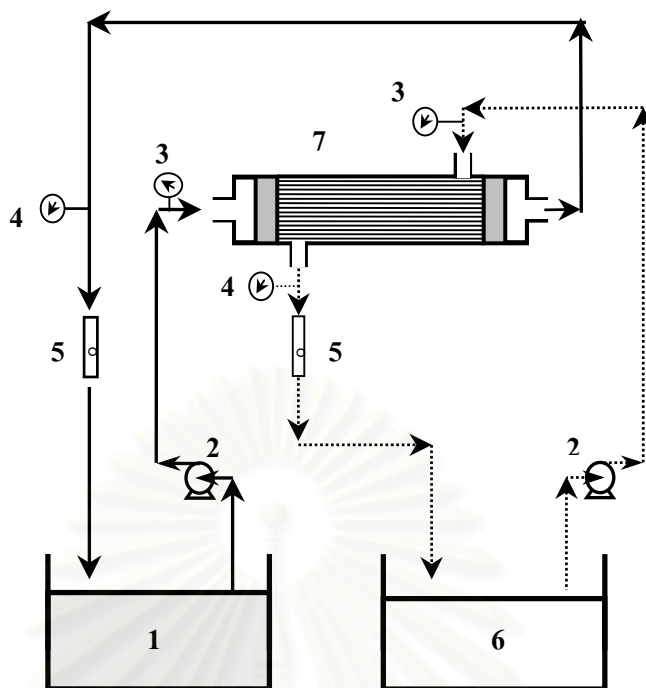


รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว (One Through Mode)

จากรูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวโดยที่หมายเลข 1 แสดงถึงของสารละลายป้อนขาเข้า หมายเลข 2 แสดงเครื่องสูบลม หมายเลข 3 แสดงมาตรวัดความดันขาเข้า หมายเลข 4 แสดงมาตรวัดความดันขาออก หมายเลข 5 แสดงมาตรวัดอัตราการไหล หมายเลข 6 แสดงถึงของสารละลายสรีปขาออก หมายเลข 7 แสดงโมดูลเส้นใยกลวง หมายเลข 8 แสดงถึงของสารละลายป้อนขาออก และหมายเลข 9 แสดงถึงของสารละลายสรีปขาเข้าตามลำดับ

### 3.3.2 ลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบ (Circulating Mode)

ลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบ จะดำเนินการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสรีปให้ไหลผ่านชุดโมดูลเส้นใยกลวงแบบไหลเวียนรอบ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบ (Circulating Mode)

จากรูปที่ 3.5 แสดงลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบ โดยที่หมายเลข 1 แสดงถึงของสารละลายป้อน หมายเลข 2 แสดงเครื่องสูบสารเคมี หมายเลข 3 แสดงมาตรวัดความดันขาเข้า หมายเลข 4 แสดงมาตรวัดความดันขาออก หมายเลข 5 แสดงมาตรวัดอัตราการไหล หมายเลข 6 แสดงถึงของสารละลายสตริป หมายเลข 7 แสดงโมดูลเส้นใยกลวงตามลำดับ

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารละลายป้อน

1. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนซีเรียมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีความเข้มข้นของยูเรีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 1.4428 กรัมละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.50 โมลต่อลิตรปริมาตร 20 มิลลิลิตรและเตรียม

สารละลายยูเรียโดยชั่งยูเรียน้ำหนัก 50 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ผสมสารละลายทั้งสองและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตร เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายป้อนให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

2. เตรียมสารละลายสตริปปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตรและมีความเข้มข้นของซีเรียมไอออนเริ่มต้นเท่ากับสารละลายป้อน โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 1.4428 กรัมและดวงกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 27.20 มิลลิลิตรเจือจางผสมกันและปรับปริมาตรของสารละลายให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายสตริปให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

3. เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวปริมาตร 500 มิลลิลิตรมีความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร ซึ่งสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัด กับตัวทำละลายอินทรีย์ เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวได้โดยผสมสารสกัด TOA ความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 22.25 มิลลิลิตรผสมกับตัวทำละลายน้ำมันก๊าด (Kerosene Jet A-1) และปรับปริมาตรด้วยน้ำมันก๊าดให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

4. เตรียมชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยเคลือบฝังสารละลายเชื้อแผ่นเหลวให้ยึดตรึงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงของชุดทดลองเส้นใยกลวง ซึ่งดำเนินการโดยป้อนสารละลายเชื้อแผ่นเหลวที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3 ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงของชุดทดลอง โดยปรับให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบไหลเวียนรอบ ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 40 นาที



5. ป้อนน้ำปราศจากไอออนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง ให้ไหลเข้าสู่ชุดทดลองทั้งภายในและภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง เพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวส่วนเกินที่ค้างอยู่ภายในชุดทดลองออก

6. ป้อนสารละลายป้อนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับดำเนินการป้อนสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง กำหนดให้มีรูปแบบการไหลของสารละลายทั้งสองเป็นแบบไหลสวนทางกัน โดยมีลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวดังรูปที่ 3.4 และมีอัตราการไหลเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งครบปริมาตรที่กำหนด

7. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปปริมาตรอย่างละ 10 มิลลิลิตร เมื่อผ่านกระบวนการตามเวลาที่กำหนดแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของไอออนซีเรียมในสารละลายป้อนเป็น 150, 200, 250, 300, 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

### 3.4.2 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายสตริป

1. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนซีเรียมเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีความเข้มข้นของยูเรีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 3.6069 กรัมละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.50 โมลต่อลิตรปริมาตร 20 มิลลิลิตรและเตรียมสารละลายยูเรียโดยชั่งยูเรียน้ำหนัก 50 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ผสมสารละลายทั้งสองและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตร เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายป้อนให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

2. เตรียมสารละลายสตริปปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.05 โมลต่อลิตรและมีความเข้มข้นของซีเรียมไอออนเริ่มต้นเท่ากับสารละลายป้อน โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 3.6069 กรัมและตวงกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 13.60 มิลลิลิตรเจือจางผสมกันและปรับปริมาตรของสารละลายให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายสตริปให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

3. เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวปริมาตร 500 มิลลิลิตรมีความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร ซึ่งสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัด กับตัวทำละลายอินทรีย์ เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวได้โดยผสมสารสกัด TOA ความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 22.25 มิลลิลิตรผสมกับตัวทำละลายน้ำมันก๊าด (Kerosene Jet A-1) และปรับปริมาตรด้วยน้ำมันก๊าดให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

4. เตรียมชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยเคลือบฝังสารละลายเชื้อแผ่นเหลวให้ยึดตรึงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงของชุดทดลองเส้นใยกลวง ซึ่งดำเนินการโดยป้อนสารละลายเชื้อแผ่นเหลวที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3 ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงของชุดทดลอง โดยปรับให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบไหลเวียนรอบ ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 40 นาที

5. ป้อนน้ำปราศจากไอออนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง ให้ไหลเข้าสู่ชุดทดลองทั้งภายในและภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง เพื่อไล่สารละลายเชื้อแผ่นเหลวส่วนเกินที่ค้างอยู่ในชุดทดลองออก

6. ป้อนสารละลายป้อนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ในท่อโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับดำเนินการป้อนสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่

ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง กำหนดให้มีรูปแบบการไหลของสารละลายทั้งสองเป็นแบบไหลสวนทางกัน โดยมีลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวดังรูปที่ 3.4 และมีอัตราการไหลเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งครบปริมาตรที่กำหนด

7. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปปริมาตรอย่างละ 10 มิลลิลิตร เมื่อผ่านกระบวนการตามเวลาที่กำหนดแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายสตริปเป็น 0.10, 0.20, 0.30, 0.50 และ 1.00 โมลต่อลิตรตามลำดับ

### 3.4.3 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในเยื่อแผ่นเหลว

1. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนซีเรียมเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีความเข้มข้นของยูเรีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 3.6069 กรัมละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.50 โมลต่อลิตรปริมาตร 20 มิลลิลิตรและเตรียมสารละลายยูเรียโดยชั่งยูเรียน้ำหนัก 50 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ผสมสารละลายทั้งสองและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตร เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายป้อนให้อิมตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

2. เตรียมสารละลายสตริปปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตรและมีความเข้มข้นของซีเรียมไอออนเริ่มต้นเท่ากับสารละลายป้อน โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 3.6069 กรัมและดวงกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 27.20 มิลลิลิตร เจือจางผสมกันและปรับปริมาตรของสารละลายให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตรด้วยน้ำปราศจาก

ไอออน เดิมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายสไตริปให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ และเก็บตัวอย่างสารละลายสไตริปเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวปริมาตร 500 มิลลิลิตรมีความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 0.05 โมลต่อลิตร ซึ่งสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัด กับตัวทำละลายอินทรีย์ เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้โดยผสมสารสกัด TOA ความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 11.125 มิลลิลิตรผสมกับตัวทำละลายน้ำมันก๊าด (Kerosene Jet A-1) และปรับปริมาตรด้วยน้ำมันก๊าดให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

4. เตรียมชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยเคลือบฝังสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้ยึดตรึงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงของชุดทดลองเส้นใยกลวง ซึ่งดำเนินการโดยป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3 ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงของชุดทดลอง โดยปรับให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบไหลเวียนรอบ ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

5. ป้อนน้ำปราศจากไอออนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง ให้ไหลเข้าสู่ชุดทดลองทั้งภายในและภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง เพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวส่วนเกินที่ค้างอยู่ในชุดทดลองออก

6. ป้อนสารละลายป้อนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับดำเนินการป้อนสารละลายสไตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง กำหนดให้มีรูปแบบการไหลของสารละลายทั้งสองเป็นแบบไหลสวนทางกัน โดยมีลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวดังรูปที่ 3.4 และมีอัตราการไหลเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งครบปริมาตรที่กำหนด

7. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปปริมาณอย่างละ 10 มิลลิลิตร เมื่อผ่านกระบวนการตามเวลาที่กำหนดแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็น 0.10, 0.15, 0.20, 0.30 และ 0.50 โมลต่อลิตรตามลำดับ

#### 3.4.4 การทดลองศึกษาหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของสารละลายป้อน

1. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนซีเรียมเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีความเข้มข้นของยูเรีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 3.6069 กรัมละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.50 โมลต่อลิตรปริมาตร 20 มิลลิลิตรและเตรียมสารละลายยูเรียโดยชั่งยูเรียน้ำหนัก 50 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ผสมสารละลายทั้งสองและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตร เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายป้อนให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

2. เตรียมสารละลายสตรีปปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตรและมีความเข้มข้นของซีเรียมไอออนเริ่มต้นเท่ากับสารละลายป้อน โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 3.6069 กรัมและดวงกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 27.20 มิลลิลิตร เจือจางผสมกันและปรับปริมาตรของสารละลายให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายสตรีปให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ และเก็บตัวอย่างสารละลายสตรีปเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวปริมาตร 500 มิลลิลิตรมีความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร ซึ่งสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัด กับตัวทำ

ละลายอินทรีย์ เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้โดยผสมสารสกัด TOA ความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 22.25 มิลลิลิตรผสมกับตัวทำละลายน้ำมันก๊าด (Kerosene Jet A-1) และปรับปริมาตรด้วยน้ำมันก๊าดให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

4. เตรียมชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยเคลือบฝั่งสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้ยึดตรึงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงของชุดทดลองเส้นใยกลวง ซึ่งดำเนินการโดยป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3 ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงของชุดทดลอง โดยปรับให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบไหลเวียนรอบ ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

5. ป้อนน้ำปราศจากไอออนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง ให้ไหลเข้าสู่ชุดทดลองทั้งภายในและภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง เพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวส่วนเกินที่ค้างอยู่ในชุดทดลองออก

6. ป้อนสารละลายป้อนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับดำเนินการป้อนสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง กำหนดให้มีรูปแบบการไหลของสารละลายทั้งสองเป็นแบบไหลสวนทางกัน โดยมีลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวดังรูปที่ 3.4 และมีอัตราการไหลเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งครบปริมาตรที่กำหนด

7. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปปริมาตรอย่างละ 10 มิลลิลิตร เมื่อผ่านกระบวนการตามเวลาที่กำหนดแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเท่ากับ 5.00, 5.50, 6.00, 6.50 และ 7.00 ตามลำดับ



### 3.4.5 การทดลองศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย

1. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนซีเรียมเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีความเข้มข้นของยูเรีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้โดยชั่งซีเรียมซัลเฟต น้ำหนัก 3.6069 กรัมละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.50 โมลต่อลิตรปริมาตร 20 มิลลิลิตรและเตรียมสารละลายยูเรียโดยชั่งยูเรียน้ำหนัก 50 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ผสมสารละลายทั้งสองและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตร พร้อมทั้งปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 6.50 เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อปรับสารละลายป้อนให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

2. เตรียมสารละลายสตรีปปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตรและมีความเข้มข้นของซีเรียมไอออนเริ่มต้นเท่ากับสารละลายป้อน โดยชั่งซีเรียมซัลเฟต น้ำหนัก 3.6069 กรัมและดวงกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 27.20 มิลลิลิตร เจือจางผสมกันและปรับปริมาตรของสารละลายให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายสตรีปให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ และเก็บตัวอย่างสารละลายสตรีปเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

3. เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวปริมาตร 500 มิลลิลิตรมีความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร ซึ่งสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัด กับตัวทำละลายอินทรีย์ เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวได้โดยผสมสารสกัด TOA ความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 22.25 มิลลิลิตรผสมกับตัวทำละลายน้ำมันก๊าด (Kerosene Jet A-1) และปรับปริมาตรด้วยน้ำมันก๊าดให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

4. เตรียมชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยเคลือบฝัองสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้ยึดตรึงอยู่ภายในรูปทรงหลอดอากาศของเส้นใยกลวงของชุดทดลองเส้นใยกลวง ซึ่งดำเนินการโดยป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3 ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงของชุดทดลอง โดยปรับให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบไหลเวียนรอบ ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 40 นาที

5. ป้อนน้ำปราศจากไอออนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง ให้ไหลเข้าสู่ชุดทดลองทั้งภายในและภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง เพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวส่วนเกินที่ค้างอยู่ภายในชุดทดลองออก

6. ป้อนสารละลายป้อนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับดำเนินการป้อนสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง กำหนดให้มีรูปแบบการไหลของสารละลายทั้งสองเป็นแบบไหลสวนทางกัน โดยมีลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวดังรูปที่ 3.4 และมีอัตราการไหลเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งครบปริมาตรที่กำหนด

7. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปปริมาตรอย่างละ 10 มิลลิลิตร เมื่อผ่านกระบวนการตามเวลาที่กำหนดแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากับ 100, 200, 300, 500, 800 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อลิตรตามลำดับ

### 3.4.6 การทดลองศึกษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัด

1. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนซีเรียมเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีความเข้มข้นของยูเรีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้โดยชั่งซีเรียมซัลเฟต น้ำหนัก 3.6069 กรัมละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.50 โมลต่อลิตรปริมาตร 20 มิลลิลิตรและเตรียมสารละลายยูเรียโดยชั่งยูเรีน้ำหนัก 50 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ผสมสารละลายทั้งสองและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตร พร้อมทั้งปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 6.50 เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อปรับสารละลายป้อนให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

2. เตรียมสารละลายสตริปปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตรและมีความเข้มข้นของซีเรียมไอออนเริ่มต้นเท่ากับสารละลายป้อน โดยชั่งซีเรียมซัลเฟต น้ำหนัก 3.6069 กรัมและดวงกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 27.20 มิลลิลิตร เจือจางผสมกันและปรับปริมาตรของสารละลายให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายสตริปให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวปริมาตร 500 มิลลิลิตรมีความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร ซึ่งสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัด กับตัวทำละลายอินทรีย์ เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้โดยผสมสารสกัด TOA ความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 22.25 มิลลิลิตรผสมกับตัวทำละลายน้ำมันก๊าด (Kerosene Jet A-1) และปรับปริมาตรด้วยน้ำมันก๊าดให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

4. เตรียมชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยเคลือบฝังสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้ยึดตรึงอยู่ภายในรูปทรงหลอดอากาศของเส้นใยกลวงของชุดทดลองเส้นใยกลวง ซึ่งดำเนินการโดยป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3 ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงของชุดทดลอง โดยปรับให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบไหลเวียนรอบ ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 40 นาที

5. ป้อนน้ำปราศจากไอออนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง ให้ไหลเข้าสู่ชุดทดลองทั้งภายในและภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง เพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวส่วนเกินที่ค้างอยู่ภายในชุดทดลองออก

6. ป้อนสารละลายป้อนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับดำเนินการป้อนสารละลายสตรีปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง กำหนดให้มีรูปแบบการไหลของสารละลายทั้งสองเป็นแบบไหลสวนทางกัน โดยมีลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบดังรูปที่ 3.5 และมีอัตราการไหลเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งครบปริมาตรที่กำหนด

7. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปปริมาตรอย่างละ 10 มิลลิลิตร เมื่อผ่านกระบวนการตามเวลาที่กำหนดแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 โดยสลับกับการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่โมดูลเส้นใยกลวง ณ เวลา 40, 60, 80, 100 และ 120 นาทีตามลำดับ

โดยผลที่ได้จากการทดลองศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งได้แก่ความเข้มข้นของไอออนซีเรียมที่เหมาะสมในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมในสารละลายสตรีป ความเข้มข้นของสาร

สกัด TOA ที่เหมาะสมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของสารละลายป้อน และอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลายในกระบวนการ ดังรายละเอียดการทดลองศึกษาตามลำดับดังกล่าวข้างต้น โดยสถานะที่เหมาะสมที่ได้ทั้งหมดนำมาทำการทดลองศึกษาการสกัดแยกที่สถานะคงตัว เพื่อหาค่าคงที่สมดุลการสกัดของกระบวนการซึ่งผลที่ได้จากการศึกษา จะนำไปใช้ในการทำนายผลการสกัดแยกด้วยวิธีการสร้างกราฟ ซึ่งรายละเอียดของการทดลองศึกษาที่สถานะคงตัวสามารถแสดงได้ดังนี้

### 3.4.7 การทดลองศึกษาการสกัดที่สถานะคงตัว

1. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนซีเรียมเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีความเข้มข้นของยูเรีย 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมได้โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 3.6069 กรัมละลายด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.50 โมลต่อลิตรปริมาตร 20 มิลลิลิตรและเตรียมสารละลายยูเรียโดยชั่งยูเรียน้ำหนัก 50 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตรผสมสารละลายทั้งสองและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตร พร้อมทั้งปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 6.50 เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายป้อนให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

2. เตรียมสารละลายสตริปปริมาตร 5 ลิตรซึ่งมีความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตรและมีความเข้มข้นของซีเรียมไอออนเริ่มต้นเท่ากับสารละลายป้อน โดยชั่งซีเรียมซัลเฟตน้ำหนัก 3.6069 กรัมและตวงกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 27.20 มิลลิลิตรเจือจางผสมกันและปรับปริมาตรของสารละลายให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 5 ลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เติมน้ำมันก๊าดปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อปรับสารละลายสตริปให้อิ่มตัวไปด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้นปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล

3. เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวปริมาตร 500 มิลลิลิตรมีความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร ซึ่งสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัด กับตัวทำละลายอินทรีย์ เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวได้โดยผสมสารสกัด TOA ความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนักปริมาตร 22.25 มิลลิลิตรผสมกับตัวทำละลายน้ำมันก๊าด (Kerosene Jet A-1) และปรับปริมาตรด้วยน้ำมันก๊าดให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

4. เตรียมชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยเคลือบฝังสารละลายเชื้อแผ่นเหลวให้ยึดตรึงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงของชุดทดลองเส้นใยกลวง ซึ่งดำเนินการโดยป้อนสารละลายเชื้อแผ่นเหลวที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3 ให้ไหลเข้าสู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวงของชุดทดลอง โดยปรับให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบไหลเวียนรอบ ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที

5. ป้อนน้ำปราศจากไอออนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง ให้ไหลเข้าสู่ชุดทดลองทั้งภายในและภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง เพื่อไล่สารละลายเชื้อแผ่นเหลวส่วนเกินที่ค้างอยู่ในชุดทดลองออก

6. ป้อนสารละลายป้อนเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายในท่อโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับดำเนินการป้อนสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยให้ไหลอยู่ภายนอกท่อโมดูลเส้นใยกลวง กำหนดให้มีรูปแบบการไหลของสารละลายทั้งสองเป็นแบบไหลสวนทางกัน โดยมีลักษณะการปฏิบัติการแบบไหลเวียนรอบดังรูปที่ 3.5 และมีอัตราการไหลเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งครบปริมาตรที่กำหนด

7. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปปริมาตรอย่างละ 10 มิลลิลิตร เมื่อผ่านกระบวนการตามเวลาที่กำหนดแล้ว เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล



8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1-7 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของไอออนซีเรียมในสารละลายป้อนเป็น 100, 150, 200, 300, 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

ลำดับสุดท้ายจะนำสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดแยกไอออนโลหะอื่นๆ อาทิเช่น แลนทานัมไอออน นีโอดีเมียมไอออนและแพลเลเดียมไอออน จากผลการศึกษาของนักวิจัยท่านอื่น (วิทยา, 2542 ; นิสิต, 2541 และณัฐพล, 2545) ซึ่งได้ทำการศึกษาการสกัดแยกไอออนโลหะเหล่านี้ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และใช้เครื่องมือและชุดทดลองเดียวกัน ซึ่งสามารถแสดงสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดแยกไอออนโลหะแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดแยกไอออนโลหะแต่ละชนิดด้วย HFSLM

โลหะ	เยื่อแผ่นเหลว		สารละลายป้อน		สารละลายสตรีป	
	สารสกัด	ความเข้มข้น	ความเข้มข้น (mg/l)	pH	ความเข้มข้น (mg/l)	pH
Ce	TOA	0.10 mol/l	250	6.50	0.10	1.00
La	D2EHPA	0.50 mol/l	150	2.50	0.50	0.30
Nd	D2EHPA	10% v/v	100	3.00	0.10	1.00
Pd	TRHCl-OA	$5 \times 10^{-3}$ mol/l	50	2.00	0.03	6.00

โดยนำสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกไอออนโลหะแต่ละชนิดดังตารางที่ 3.4 ทำการศึกษาค้นคว้าทดลองศึกษาการสกัดแยกที่สภาวะคงตัว เพื่อหาค่าคงที่สมดุลการสกัดของกระบวนการซึ่งผลที่ได้จากการศึกษา จะนำไปใช้ในการทำนายผลการสกัดแยกด้วยวิธีการสร้างกราฟ และนำผลมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง เพื่อประเมินผลสัมฤทธิ์ของวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอ ซึ่งผลจากการทดลองทั้งหมดจะแสดงไว้เป็นลำดับต่อไป

## บทที่ 4

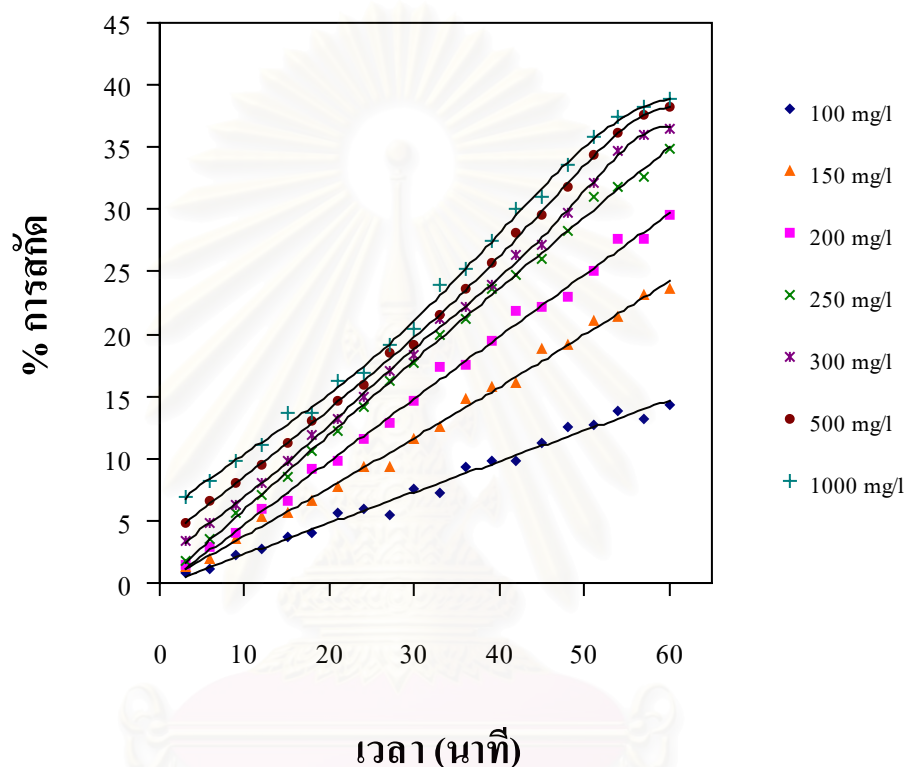
### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

บทนี้กล่าวถึง ผลที่ได้จากการทดลองศึกษาการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งได้แก่ความเข้มข้นของไอออนซีเรียมในสารละลายป้อนเริ่มต้นที่เหมาะสม ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมในสารละลายสตรีป ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ที่เหมาะสมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในสารละลายป้อน และอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลายในกระบวนการเป็นต้น โดยนำผลการทดลองที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทำนายการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟ นอกจากนี้ยังแสดงผลการสกัดแยกไอออนโลหะอื่นๆ อาทิเช่น แลนทานัม ไอออน นีโอดีเมียม ไอออน และแพลเลเดียม ไอออน ด้วยกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยดำเนินการสกัดในสภาวะที่เหมาะสมของไอออนโลหะแต่ละธาตุ ซึ่งเป็นสภาวะที่ได้จากการศึกษาวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นที่ได้ทำการศึกษาดำเนินการทดลองนี้ไว้ก่อนแล้ว เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการสกัดกับผลการทำนายการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยผลการทดลองศึกษาดังกล่าวสามารถแสดงได้เป็นลำดับดังนี้

#### 4.1 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารละลายป้อน

การทำนายผลการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอข้างต้นนั้น กระบวนการจะอาศัยหลักทฤษฎีสมดุล ซึ่งพบว่ากระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะเกิดปฏิกิริยาการสกัดดังสมการที่ 1-1 และเกิดปฏิกิริยานำกลับดังสมการที่ 1-4 นั้นจะมีผลการสกัดแยกสอดคล้องกับทฤษฎีและมีพฤติกรรมเป็นไปตามสมการที่ 2-4 ได้นั้น จะมีพฤติกรรมดังกล่าวได้ที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนมีค่าต่ำๆ หรือเจือจาง (Van Ness et al, 1982) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาไอออนโลหะหายาก ซึ่งมีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบ

เทียบกับไอออนโลหะพื้นฐานทั่วไป โดยเลือกศึกษาซีเรียมไอออนและทำการทดลองสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาความเข้มข้นของไอออนซีเรียมเริ่มต้นในสารละลายป้อนซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.1 (ข้อมูลผลการทดลองได้จากภาคผนวก ก-1)



รูปที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่ค่าต่างๆ เปรียบเทียบกับเวลา โดยทำการทดลองที่สภาวะเริ่มต้นดังนี้ [TOA] = 0.10 โมลต่อลิตร,  $[H_2SO_4] = 0.10$  โมลต่อลิตร, ค่า pH ของสารละลายป้อน = 3.95,  $Q = 80$  มิลลิลิตรต่อนาทีและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบไหลสวนทางกัน

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยที่ประสิทธิภาพของกระบวนการจะพิจารณาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การสกัด (ตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก ข) ซึ่งจากผลการทดลองศึกษาที่ได้พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของ

กระบวนการจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยเส้นแนวโน้มการสกัดจะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่างเวลาในการสกัดกับเปอร์เซ็นต์การสกัด เมื่อปริมาณความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และเส้นแนวโน้มจะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนสูงกว่าหรือเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผลการทดลองที่ได้ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการสกัดเพิ่มสูงขึ้นเสมือนหนึ่งเป็นการเพิ่มเวลาให้กับกระบวนการ หรือเป็นการเพิ่มเวลาการเกิดปฏิกิริยาในหอสกัด (Residence time) ทำให้เกิดการสกัดมากขึ้นเป็นผลให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงขึ้นนั่นเอง

พิจารณาเส้นแนวโน้มการสกัดแยกซีเรียมไอออน เมื่อความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนต่ำกว่าหรือเท่ากับ 250.00 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัดกับเปอร์เซ็นต์การสกัดเป็นแบบเชิงเส้นนั้น สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนมีปริมาณต่ำกว่าปริมาณสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในชุด HFSLM (อิศรา เกษมเศรษฐ, 2541) ดังนั้นประสิทธิภาพในการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM จึงมีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการสกัดเป็นแบบเชิงเส้น ส่วนผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยชุด HFSLM เมื่อความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนสูงกว่าหรือเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้นจะมีความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสกัดกับเปอร์เซ็นต์การสกัดเป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าปริมาณซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนมีปริมาณสูงกว่าปริมาณสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ยึดตรึงอยู่ในหอสกัด ทำให้เกิดปรากฏการณ์สะสมตัวของสาร (Concentration Polarization) หรือ CP (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ซีเรียมไอออนเกิดการสะสมบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นเหลว มีผลทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพลดต่ำลง จึงเป็นเหตุให้เส้นแนวโน้มการสกัดมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นนั่นเอง

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ทำให้สามารถพิจารณาเลือกความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนที่เหมาะสม ได้เท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นค่าความเข้มข้นของซีเรียม

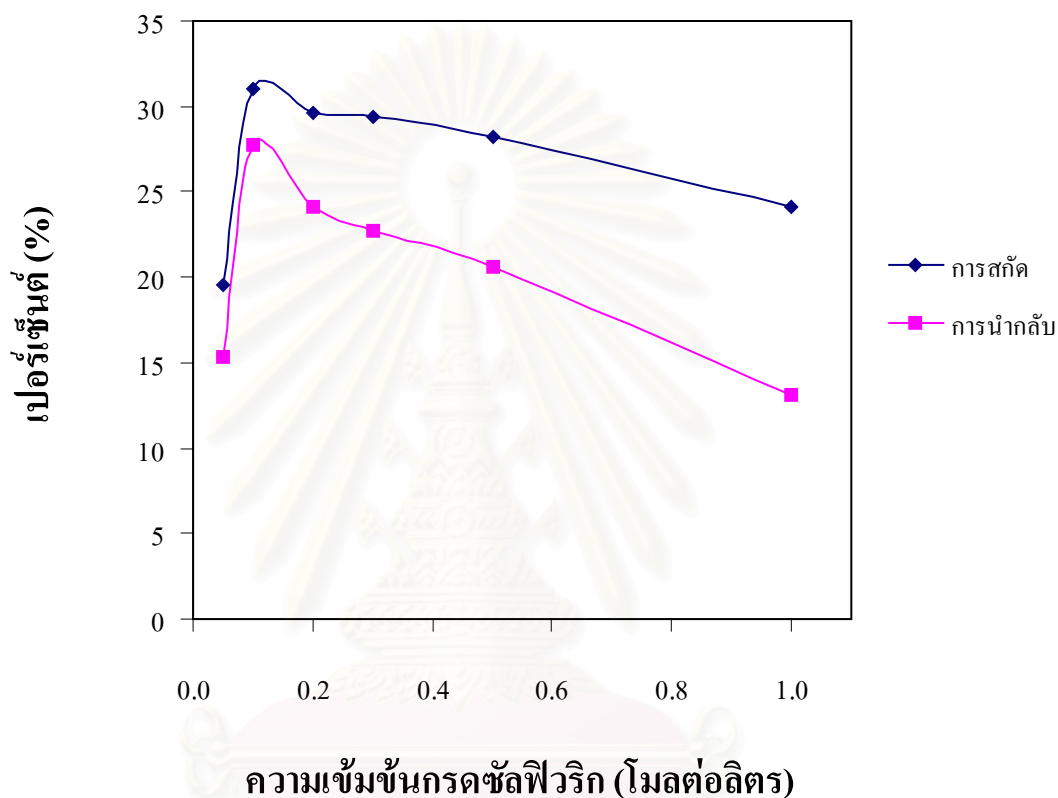
ไอออนสูงสุดในสารละลายป้อน ที่กระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับ สมการที่ 2-4 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยจะนำความเข้มข้นของซีเรียมไอออนที่เหมาะสมนี้ ไปศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย กลวงต่อไป

#### 4.2 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายสตริป

การนำกลับซีเรียมไอออนด้วยสารละลายสตริปซึ่งเป็นสารละลายกรดซัลฟิวริก ตาม ปฏิกิริยาการนำกลับซีเรียมไอออนดังสมการที่ 2-2 นั้น ทำให้ทราบได้ว่าปริมาณไฮโดรเนียมไอออน ในสารละลายสตริป เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่น เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยปริมาณไฮโดรเนียมไอออนนั้นจะพิจารณาได้จากความเข้มข้นของ กรดซัลฟิวริกที่ใช้เป็นสารละลายสตริป ซึ่งได้ทำการทดลองที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกต่างๆ ได้ผลการทดลองศึกษาดังรูปที่ 4.2 (ข้อมูลผลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-2)

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลวง ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกค่าต่างๆ ซึ่งพบว่าทั้งเปอร์เซ็นต์การสกัดและเปอร์เซ็นต์ การนำกลับของกระบวนการให้ผลสอดคล้องซึ่งกันและกัน โดยปริมาณความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้เป็นสารละลายสตริปมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกซีเรียมไอออนอย่างมาก โดย เมื่อสารละลายกรดซัลฟิวริกมีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการสกัดแยกซีเรียมไอออนมี แนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน พิจารณาผลดังกล่าวได้ในช่วงความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกมีค่าอยู่ ระหว่าง 0.05 – 0.10 โมลต่อลิตร โดยเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.05 โมลต่อลิตร กระบวนการจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับเท่ากับ 19.5% และ 15.4% ตามลำดับ และเมื่อ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตรแล้วกระบวนการจะมี เปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 31.0% และ 27.7% ตามลำดับ แต่เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกมีค่าสูงกว่า 0.10 โมลต่อลิตรแล้ว การสกัดแยกกลับมีประสิทธิภาพ

ภาพลดต่ำลง พิจารณาผลที่ได้ดังกล่าวเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.200, 0.30, 0.50 และ 1.00 โมลต่อลิตรแล้วกระบวนการจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดลดต่ำลง โดยมีค่าเท่ากับ 29.6%, 29.4%, 29.4% และ 24.1% ตามลำดับและมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับลดต่ำลงด้วย โดยมีค่าเท่ากับ 24.1%, 22.7%, 20.6% และ 13.1% ตามลำดับ



**รูปที่ 4.2** แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายสตริปที่ค่าต่างๆ โดยทำการทดลองที่สภาวะเริ่มต้นดังนี้  $[Ce] = 250$  มิลลิกรัมต่อลิตร,  $[TOA] = 0.10$  โมลต่อลิตร, ค่า pH ของสารละลายป้อน = 3.95,  $Q = 80$  มิลลิตรต่อนาทีและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบไหลสวนทางกัน

ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 – 0.10 โมลต่อลิตรและให้ผลการสกัดแยกมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเพิ่มสูงขึ้นนั้น พิจารณาได้จากสมการที่ 2-2 ซึ่งเป็นสมการ

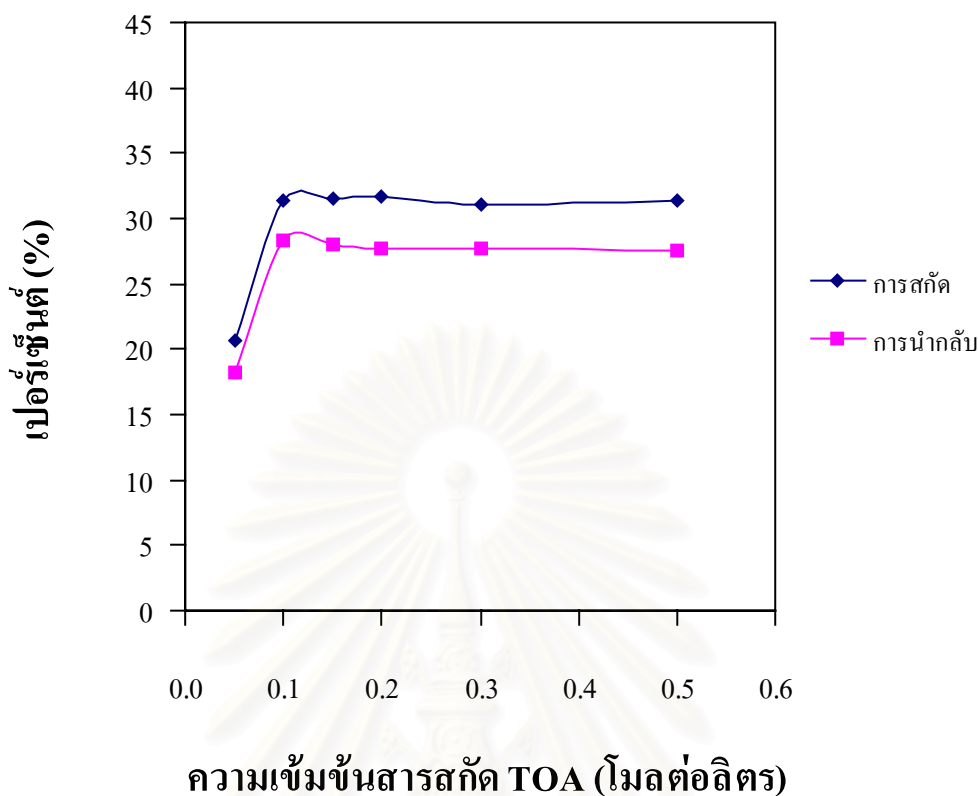


ปฏิกิริยาการนำกลับซีเรียมไอออนจากสมการพบว่าปริมาณไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายสตรีปจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการสัคแตกซีเรียมไอออน โดยเมื่อปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ปฏิกิริยาการนำกลับดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น มีผลทำให้เกิดการนำกลับซีเรียมไอออนเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง ซึ่งผลที่ได้ดังกล่าวเป็นไปตามหลักการของเลอชาเตอริเยอร์ (Henry Louis Le Chatelier) และกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate Law) แต่เมื่อพิจารณาในช่วงความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่มีค่าสูงกว่า 0.10 โมลต่อลิตรแล้ว กลับให้ผลในทางตรงข้ามกัน โดยเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ปริมาณไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายป้อนเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งถ้าหากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณสูงเกินกว่าสมดุลปฏิกิริยาแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์สะสมตัวของไฮโดรเนียมไอออน (ไพศาล อภินิหพัฒน์, 2541) โดยผลของปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดการสะสมตัวของไฮโดรเนียมไอออนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคในฝั่งสารละลายสตรีป ทำให้การถ่ายเทมวลมีประสิทธิภาพลดต่ำลงนั่นเอง ดังนั้นความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารละลายสตรีปในกระบวนการสัคแตกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในงานวิจัยนั้น จะมียค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร ซึ่งจะนำไปใช้เป็นสภาวะเริ่มต้นสำหรับศึกษาปัจจัยอื่นๆ ในลำดับต่อไป

#### 4.3 การทดลองศึกษาหาความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในเยื่อแผ่นเหลว

การทดลองศึกษาลำดับต่อมาเป็นการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดซึ่งใช้เป็นเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการ โดยพิจารณาเลือกปัจจัยที่ดีที่สุดที่ได้ทำการศึกษามาแล้วข้างต้น เป็นสภาวะเริ่มต้นของกระบวนการ ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายสตรีปมีค่าเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ที่ค่าต่างๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองศึกษาสามารถแสดงดังรูปที่

4.3 (ข้อมูลผลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-3)



รูปที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ที่ความเข้มข้นของสารสกัด

TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดที่ค่าต่างๆ โดยทำการทดลองที่สภาวะเริ่มต้นดังนี้  $[Ce] = 250$  มิลลิกรัมต่อลิตร,  $[H_2SO_4] = 0.10$  โมลต่อลิตร, ค่า pH ของสารละลายป้อน = 3.95,  $Q = 80$  มิลลิลิตรต่อนาทีและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบไหลสวนทางกัน

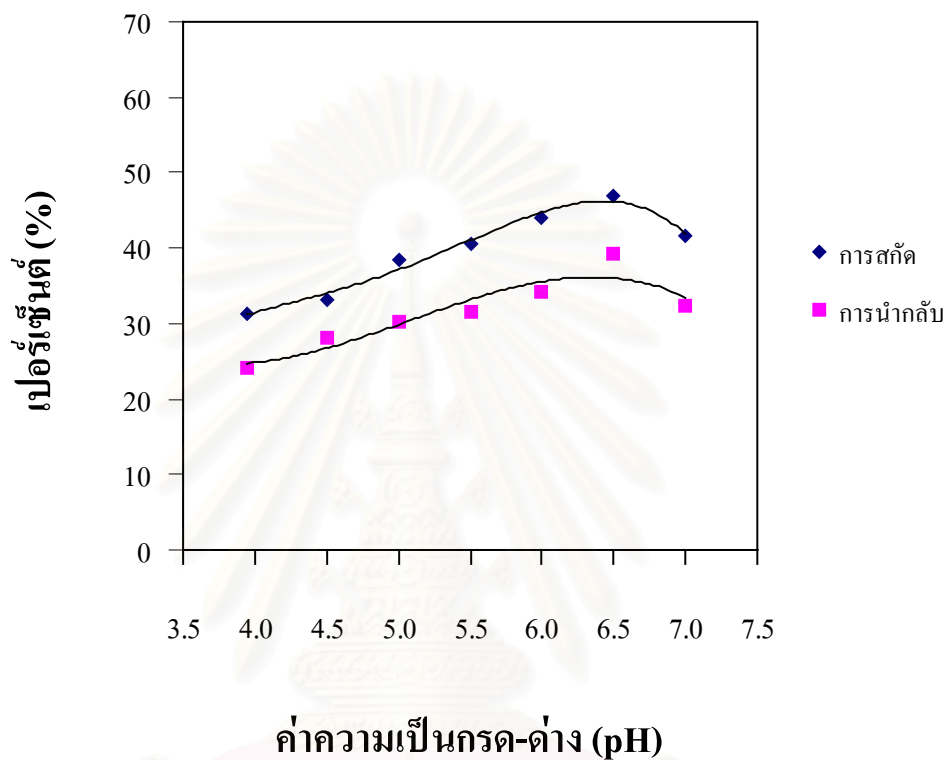
จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดซึ่งมีค่าต่างๆ โดยพบว่าทั้งเปอร์เซ็นต์การสกัดและเปอร์เซ็นต์การนำกลับของกระบวนการให้ผลสอดคล้องซึ่งกันและกัน โดยเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดเพิ่มสูงขึ้น กระบวนการจะประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นด้วย พิจารณาผลที่ได้ดังกล่าวเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.05 – 0.10 โมลต่อลิตร โดยเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดเท่ากับ 0.05 โมลต่อลิตรกระบวนการจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับ

เท่ากับ 20.6% และ 18.2% ตามลำดับ และเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมัน ก๊าซเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตรแล้วกระบวนการจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำ กลับเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันโดยมีค่าเท่ากับ 31.4% และ 28.2% ตามลำดับ แต่เมื่อความเข้มข้นของสาร สกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าซสูงกว่า 0.10 โมลต่อลิตรแล้ว กระบวนการกลับมีประสิทธิภาพ โดดเด่นยิ่งขึ้น พิจารณาผลที่ได้ดังกล่าวเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าซ เพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 0.15, 0.20, 0.30 และ 0.50 โมลต่อลิตรแล้วกระบวนการจะมีเปอร์เซ็นต์การ สกัดใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 31.5%, 31.8%, 31.1% และ 31.3% ตามลำดับและมีเปอร์เซ็นต์การ นำกลับใกล้เคียงกันด้วยโดยมีค่าเท่ากับ 28.0%, 27.7%, 27.6% และ 27.5% ตามลำดับ

ผลการทดลองศึกษาที่ได้ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ว่า เมื่อปริมาณสารสกัดเพิ่มสูงขึ้นแล้ว ทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นด้วยนั้น เป็นผลอันเนื่องมาจากสารสกัดเป็นสารพาหะ นำพาซีเรียมไอออนจากวัฏภาคสารละลายป้อนไปสู่วัฏภาคสารละลายสตรีป ดังนั้นถ้าสารสกัดมี ปริมาณมากจะสามารถนำพาซีเรียมไอออนจากวัฏภาคสารละลายป้อนไปสู่วัฏภาคสารละลายสตรีป ได้มากขึ้นด้วยนั่นเอง แต่ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารสกัดมากกว่า 0.10 โมลต่อลิตรแล้วกระบวนการกลับมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันนั้น เป็นผลอันเนื่องมาจากชุดโมดูลเส้นใยกลวงสำหรับการ ทดลองศึกษา HFSLM นั้นภายในโมดูลจะมีเส้นใยกลวงที่มีจำนวนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นพื้นที่ ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่างๆ จึงมีพื้นที่คงที่ด้วยเช่นกัน ดังนั้นปริมาณสารสกัด TOA ที่จะถ่ายเท ซีเรียมไอออนจากวัฏภาคต่างๆ จึงมีข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคภายในโมดูลเส้น ใยกลวง ดังนั้นถ้าหากสารสกัด TOA มีปริมาณมากขึ้นแต่ไม่สอดคล้องกับพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีขนาด จำกัดนี้แล้ว ปริมาณสารสกัด TOA ที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นจะไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ นั้นเอง

จากผลการทดลองศึกษาที่ได้นี้ ทำให้สามารถพิจารณาเลือกความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าซที่เหมาะสม สำหรับใช้เป็นเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัดแยกซีเรียม ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงได้ โดยความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำ

ละลายน้ำมันก๊าดที่เหมาะสมนั้นมีค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร โดยการทดลองศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกล้วย จะเลือกใช้ค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด



**รูปที่ 4.4** แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่ค่าต่างๆ โดยทำการทดลองที่สภาวะเริ่มต้นดังนี้  $[Ce] = 250$  มิลลิกรัมต่อลิตร,  $[H_2SO_4] = 0.10$  โมลต่อลิตร,  $[TOA] = 0.10$  โมลต่อลิตร,  $Q = 80$  มิลลิลิตรต่อนาที และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบไหลสวนทางกัน

#### 4.4 การทดลองศึกษาหาความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมของสารละลายป้อน

พิจารณากระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกล้วย ซึ่งกระบวนการจะมีปฏิริยาการสกัดและการนำกลับดังสมการที่ 2-1 และ 2-2 พนวกกับผลการศึกษา

ปริมาณความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายสตรีปแล้ว พบว่าปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ จึงเป็นเหตุให้ต้องทำการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายป้อน โดยผลการทดลองศึกษาที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 (ข้อมูลผลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-4)

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีค่าต่างๆ โดยพบว่าทั้งเปอร์เซ็นต์การสกัดและเปอร์เซ็นต์การนำกลับของกระบวนการให้ผลสอดคล้องซึ่งกันและกัน โดยเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น กระบวนการจะประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นด้วย พิจารณาผลที่ได้ดังกล่าวเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 3.95 – 6.50 โดยเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 3.9, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 แล้วกระบวนการจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 31.4%, 33.2%, 38.3%, 40.7%, 44.1% และ 46.8% ตามลำดับ และจะมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับเพิ่มสูงขึ้นด้วยโดยมีค่าเท่ากับ 24.1%, 28.2%, 30.3%, 31.5%, 34.1% และ 39.2% ตามลำดับ แต่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีค่าสูงกว่า 6.5 แล้ว กระบวนการกลับมีประสิทธิภาพลดต่ำลง พิจารณาผลที่ได้ดังกล่าวเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 7.0 แล้วกระบวนการจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดและเปอร์เซ็นต์การนำกลับลดต่ำลงโดยมีค่าเท่ากับ 41.7% และ 32.3% ตามลำดับ

ซึ่งจากผลการทดลองศึกษาที่ได้ดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 3.9 – 6.5 และให้ผลการสกัดแยกมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั้น พิจารณาได้จากสมการที่ 2-1 ซึ่งเป็นสมการปฏิกิริยาการสกัดซีเรียมไอออน โดยจากสมการพบว่าปริมาณไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายป้อนนั้นจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการสกัดแยกซีเรียมไอออน โดยเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเพิ่มสูงขึ้น จะมีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนลดต่ำลงซึ่งจะส่งผลให้ปฏิกิริยาการสกัดดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ทำให้กระบวนการเกิดการสกัดซีเรียมไอออนเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

ซึ่งผลที่ได้ดังกล่าวเป็นไปตามหลักการของเลอชาเตอริเยอร์ และกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่อพิจารณาในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่มีค่าสูงกว่า 6.5 แล้ว กระบวนการกลับให้ผลในทางตรงข้ามกัน โดยเหตุที่เป็นเช่นนี้สืบเนื่องมาจากเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น เกิดจากการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนด้วยด่างเข้มข้น (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับซีเรียมไอออนในสารละลายป้อน มีผลทำให้ซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนลดต่ำลงด้วย (นิสิต สุโสมาน, 2543) ซึ่งการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนนั้นสามารถปรับค่าความเป็นกรด-ด่างได้ไม่เกิน 7.12 เนื่องจากเกิดตะกอนสีเหลืองอ่อนของซีเรียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงได้ต่อไป ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่เหมาะสมในกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในงานวิจัยนี้นั้น จะมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.5 และจะเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้นสำหรับศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

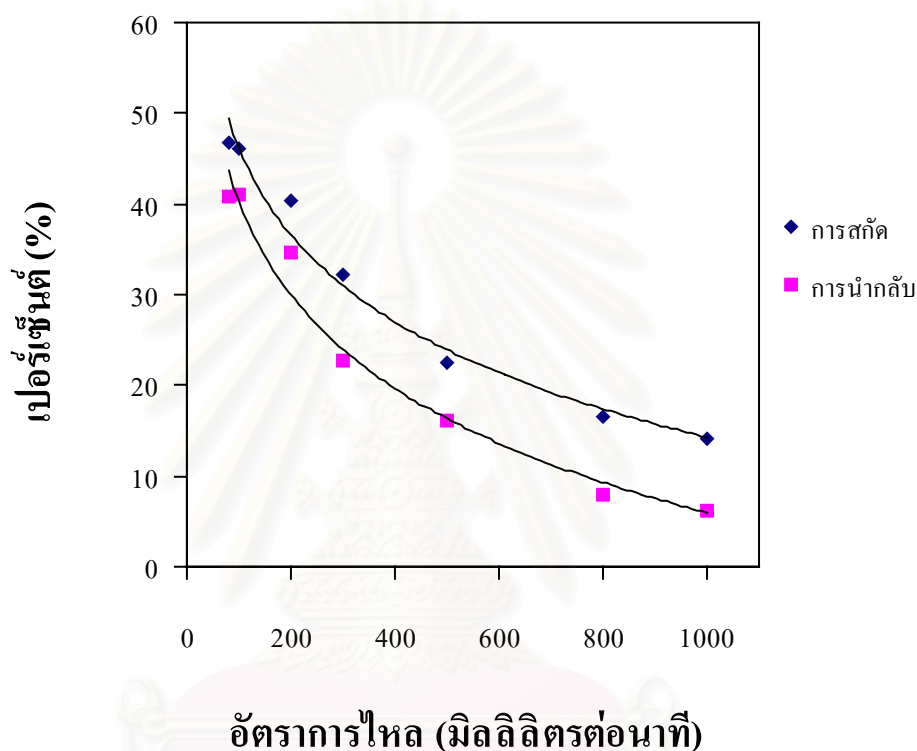
#### 4.5 การทดลองศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย

ปัจจัยลำดับต่อมาที่มีอิทธิพลต่อการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงคือ เวลาที่สารละลายอยู่ในหอสกัดเพื่อเกิดปฏิกิริยา (Residence Time) โดยในงานวิจัยนี้สามารถศึกษาเวลาที่สารละลายอยู่ในหอสกัดเพื่อเกิดปฏิกิริยาได้จากการทดลองศึกษาอัตราการไหลของสารละลายที่ใช้ในกระบวนการ HFSLM โดยผลการทดลองศึกษาที่ได้นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 (ข้อมูลผลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-5)

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ค่าอัตราการไหลต่างๆ โดยพบว่าทั้งเปอร์เซ็นต์การสกัดและเปอร์เซ็นต์การนำกลับของกระบวนการให้ผลสอดคล้องซึ่งกันและกัน โดยเมื่อค่าอัตราการไหลของสารละลายมีค่าเพิ่มสูงขึ้น กระบวนการกลับมีประสิทธิภาพลดต่ำลง พิจารณาผลที่ได้ดังกล่าวเมื่อค่าอัตราการไหลของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น



โดยมีค่าเท่ากับ 80, 100, 200, 300, 500 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาทีแล้ว กระบวนการจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 46.8%, 46.2%, 40.4%, 32.1%, 22.5%, 16.6% และ 14.0% ตามลำดับ และจะมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับลดลงด้วยเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 40.9%, 41.0%, 34.7%, 22.7%, 16.1%, 8.0% และ 6.2% ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ที่อัตราการไหลของสารละลายค่าต่างๆ โดยทำการทดลองที่สภาวะเริ่มต้นดังนี้  $[Ce] = 250$  มิลลิกรัมต่อลิตร,  $[H_2SO_4] = 0.10$  โมลต่อลิตร,  $[TOA] = 0.10$  โมลต่อลิตร, ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน = 6.5 และเป็นกรไหลผ่านครั้งเดียวแบบไหลสวนทางกัน

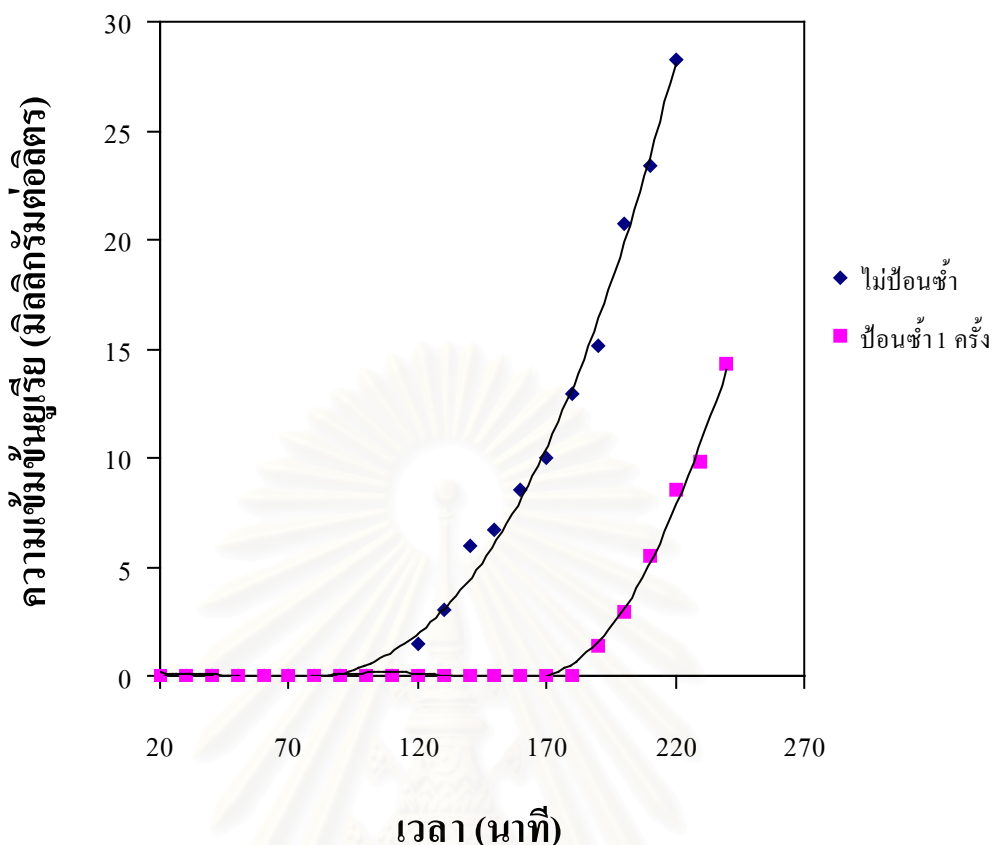
จากผลการทดลองศึกษาที่ได้ดังกล่าวนี้สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2-1 และ 2-2 ซึ่งเป็นสมการปฏิกิริยาการสกัดและสมการปฏิกิริยาการนำกลับของกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าของ

กระบวนการจะเป็นไปตามกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 1-2 และ 1-5 ซึ่งพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับนั้น นอกจากจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ แล้ว ยังขึ้นอยู่กับเวลาที่องค์ประกอบนั้นๆ อยู่ในหอสกัดเพื่อเกิดปฏิกิริยาหรือ Resident Time อีกด้วยโดยในการทดลองศึกษาหอสกัดหรือโมดูลเส้นใยกลวงที่ใช้ศึกษานั้นมีปริมาตรคงที่ มีผลทำให้อัตราการไหลของสารละลายเมื่อไหลผ่านโมดูลเส้นใยกลวงแปรผกผันกับเวลาที่สารละลายอยู่ในหอสกัด ดังนั้นเมื่อกระบวนการมีอัตราการไหลสูงขึ้นส่งผลให้สารละลายมีเวลาอยู่ในหอสกัดเพื่อเกิดปฏิกิริยาลดลง จึงทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพลดต่ำลงนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองศึกษาโดยพิจารณาอาศัยหลักสมดุลการสกัดและการนำกลับของกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง กอปรกับการพิจารณาส่วนย่อยเล็กๆ ของหอสกัด ดังนั้นเพื่อให้การทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีและสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ จึงเลือกอัตราการไหลของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้เท่ากับ 80 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้เป็นค่าอัตราการไหลเพื่อศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

#### 4.6 การทดลองศึกษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัด

ข้อจำกัดที่สำคัญอย่างมากของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวนั้นคือ ข้อจำกัดทางด้านเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งนอกจากกระบวนการจะไม่สามารถดำรงอยู่เป็นเยื่อแผ่นเหลวแล้ว ยังมีอาจล่วงรู้ได้เลยว่าเมื่อใดที่เยื่อแผ่นเหลวสูญเสียเสถียรภาพไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารที่มีคุณสมบัติที่สามารถตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว และเลือกใช้วิธีป้อนซ้ำเพื่อรักษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวให้ดำรงอยู่สืบนานเท่านาน ซึ่งสารที่ใช้เป็นสารตรวจสอบเยื่อแผ่นเหลวคือ สารละลายยูเรียโดยผลการทดลองศึกษาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (ข้อมูลผลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-6)



รูปที่ 4.6 แสดงปริมาณยูเรเนียมที่ตรวจพบในกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ที่เวลาต่างๆ โดยทำการทดลองที่สภาวะเริ่มต้นดังนี้  $[Ce] = 250$  มิลลิกรัมต่อลิตร,  $[H_2SO_4] = 0.10$  โมลต่อลิตร,  $[TOA] = 0.10$  โมลต่อลิตร, ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน  $= 6.5$ ,  $Q = 80$  มิลลิกรัมต่อนาที และเป็นการไหลเวียนรอบแบบสวนทางกัน

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลองศึกษาการตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว โดยใช้สารละลายยูเรเนียมเป็นสารตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว โดยเติมสารละลายยูเรเนียมลงในสารละลายป้อน และทำการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายยูเรเนียมในสารละลายสตรีป ทำการตรวจสอบ ณ เวลาต่างๆ ซึ่งจากผลการทดลองศึกษาจะเริ่มตรวจพบสารละลายยูเรเนียมในสารละลายสตรีป เมื่อทำการทดลองศึกษาผ่านไปแล้วเป็นเวลา 90 นาที และตรวจพบปริมาณยูเรเนียมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการทดลองศึกษาที่เวลามากกว่า 90 นาที โดยการทดลองศึกษาลำดับต่อไปได้ทำการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซ้ำ เข้าสู่โมดูลเส้นใยกลวงปริมาตร 500 มิลลิกรัม ณ เวลา 80 นาที ซึ่งพบว่า

กระบวนการจะเริ่มตรวจพบสารละลายยูเรียในสารละลายสตริป เมื่อทำการทดลองศึกษาผ่านไป  
แล้วเป็นเวลา 170 นาที

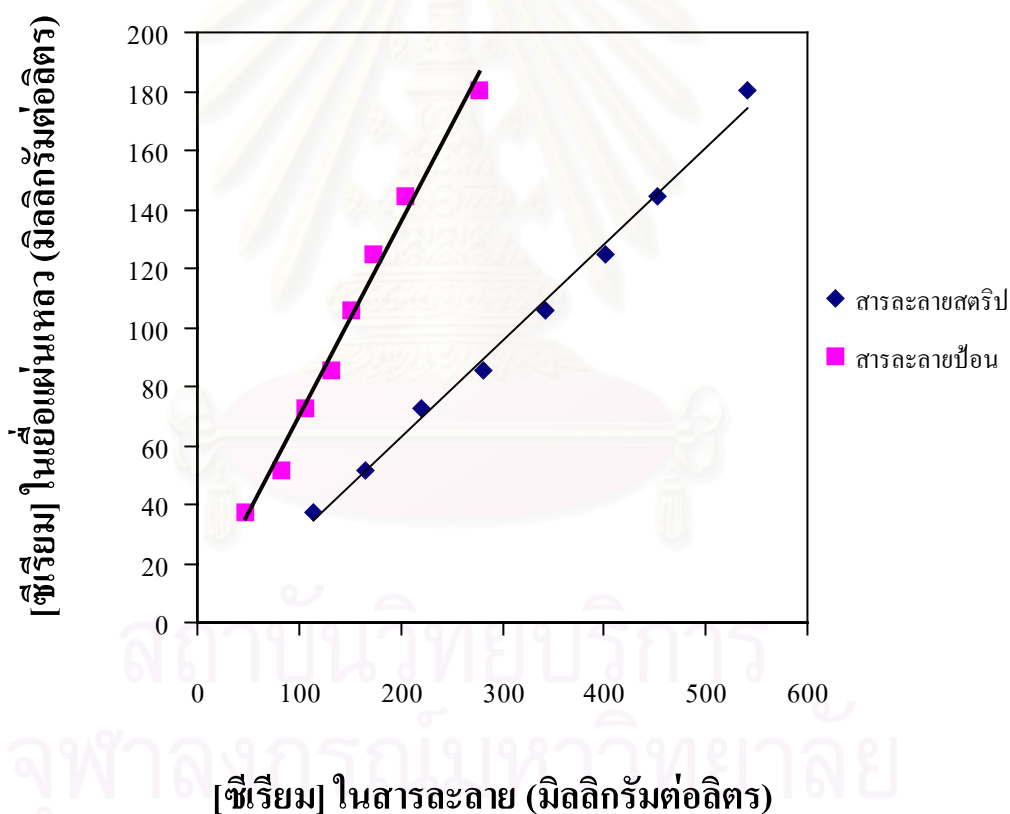
จากผลการทดลองศึกษาที่ได้กล่าวข้างต้นนั้น สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2-1 และ  
สมการที่ 2-2 ซึ่งเป็นสมการปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับไอออนซีเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุง  
ด้วยเส้นใยกลวง โดยพบว่าคุณสมบัติประการหนึ่งที่สำคัญของสารสกัด TOA นั้นคือจะไม่เกิดเป็น  
สารประกอบเชิงซ้อนกับองค์ประกอบที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนในน้ำ (นภกร ชัมพิพิธ, 2539) ดังนั้น  
จึงเลือกใช้ยูเรียเป็นสารตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว นอกจากนั้นแล้วยังเลือกใช้วิธีการ  
ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่โมดูลเส้นใยกลวง ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับกระบวนการสกัด  
แบบต่อเนื่องเพื่อรักษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวจะหลุดออกจากรูพรุน  
จุลภาคของเส้นใยกลวงอันเนื่องมาจากแรงเฉือน (Shear Force) ที่เกิดจากการไหลผ่านผิวสัมผัสของ  
สารละลายในโมดูลเยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่โมดูลเส้นใยกลวง  
จะเป็นการเติมเต็มสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้ดำรงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงนั่นเอง

โดยการทดลองศึกษาในงานวิจัยนี้ทั้งหมด ได้ทำการตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่น  
เหลวในระหว่างการปฏิบัติการ ซึ่งพบว่าเยื่อแผ่นเหลวยังมีเสถียรภาพตลอดการปฏิบัติการ และนอก  
จากนี้ทุกการทดลองศึกษาใช้เวลาในการปฏิบัติการน้อยกว่า 90 นาที ดังนั้นจึงมั่นใจได้ว่าเสถียรภาพ  
ของเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการยังดำรงอยู่ตลอดเวลาการปฏิบัติการอีกด้วย ดังนั้นการป้อนสาร  
ละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่โมดูลเส้นใยกลวงจึงไม่จำเป็น สำหรับงานวิจัยนี้

#### 4.7 การทดลองศึกษาการสกัดที่สภาวะคงตัว เพื่อหาค่าคงที่สมดุลการสกัด

จากผลการทดลองศึกษาการสกัดแยกซีเรียมไอออน ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้น  
ใยกลวง โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการซึ่งได้ผลการทดลองศึกษาดังที่ได้  
กล่าวมาแล้วเป็นลำดับข้างต้นนั้น ทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อ

ประสิทธิภาพของกระบวนการ ดังนั้นจึงได้นำสภาวะที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดดังกล่าว นำมาทำการทดลองศึกษาการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงที่สภาวะคงตัว เพื่อหาค่าคงที่สมดุลของกระบวนการ และนำไปใช้กับวิธีการทำนายผลการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟที่ได้นำเสนอตั้งที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นอกจากนี้ยังได้นำสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกแลนทานัมไอออน นีโอดีเมียมไอออนและพลูโตเนียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเครื่องเดียวกันนี้ ซึ่งเป็นผลการทดลองศึกษาของนักวิจัยท่านอื่น นำมาศึกษาถึงผลสัมฤทธิ์ของวิธีการทำนายผลการสกัดแยกด้วยวิธีการสร้างกราฟ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองศึกษาได้ผลดังรูปที่ 4.7 (ข้อมูลผลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-7)



รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณซีเรียมไอออนในวัฏภาคต่างๆ ของกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM โดยทำการทดลองที่สภาวะเริ่มต้นดังนี้ [Ce] ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ,  $[H_2SO_4] = 0.10$  โมลต่อลิตร,  $[TOA] = 0.10$  โมลต่อลิตร, ค่า pH ของสารละลายป้อน = 6.5,  $Q = 80$  มิลลิตรต่อนาที และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบสวนทางกัน

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองศึกษาการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่สภาวะคงตัว โดยทำการทดลองศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าเท่ากับ 100, 150, 200, 250, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จากผลการทดลองศึกษาที่สภาวะคงตัวพบว่ากระบวนการมีพฤติกรรมสอดคล้องกับสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ และสอดคล้องกับสมการที่ 2-4 ซึ่งเป็นสมการการกระจายตัวของไอออนซีเรียมในวัฏภาคต่างๆ ทำให้สามารถคำนวณค่าคงที่สมดุลกระบวนการได้ (วิธีการคำนวณสามารถดูได้จากภาคผนวก ข) โดยสำหรับการสกัดแยกซีเรียมไอออนของกระบวนการนี้มีสมดุลการสกัดเท่ากับ 0.658 และสำหรับการนำกลับซีเรียมไอออนของกระบวนการนี้มีสมดุลการสกัดเท่ากับ 0.327 และทำการทดลองศึกษาเช่นเดียวกันกับการสกัดแยกแลนทานัมไอออน นีโอดีเมียมไอออนและแพลเลเดียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สามารถคำนวณค่าคงที่สมดุลของกระบวนการได้ ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่สมดุลของกระบวนการสกัดแยกไอออนชนิดต่างๆ

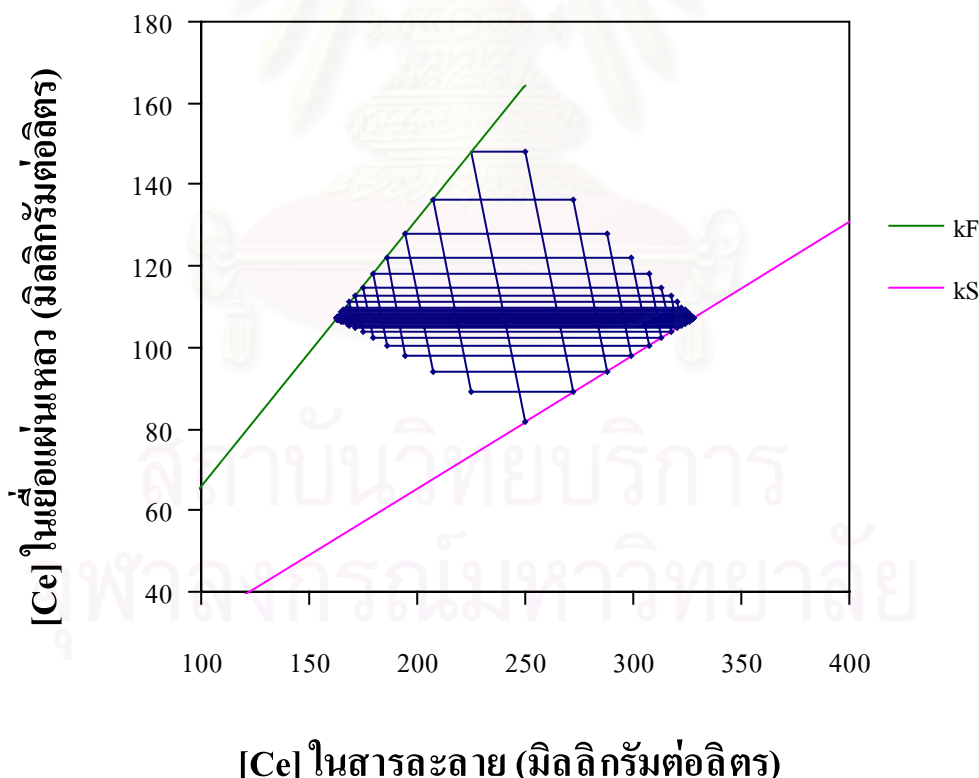
ไอออน	เยื่อแผ่นเหลว		สารละลายป้อน		สารละลายสตริป		$k_F$	$k_S$
	สารสกัด	Conc.	Conc. (mg/l)	pH	Conc. (mg/l)	pH		
Ce	TOA	0.10 mol/l	250	6.5	0.10	1.0	0.658	0.327
La	D2EHPA	0.50 mol/l	150	2.5	0.50	0.3	1.096	0.411
Nd	D2EHPA	10.00 % v	100	3.0	0.10	1.0	0.958	0.350
Pd	TRHCl-OA	0.0005 mol/l	50	2.0	0.03	6.0	0.553	0.253

โดยรายละเอียดของสารเคมีที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดสามารถดูได้จากตารางที่ 3.1 ส่วนรายละเอียดของสารเคมีที่ใช้ในแต่ละกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะแต่ละชนิด สามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 3.2 ตามลำดับ



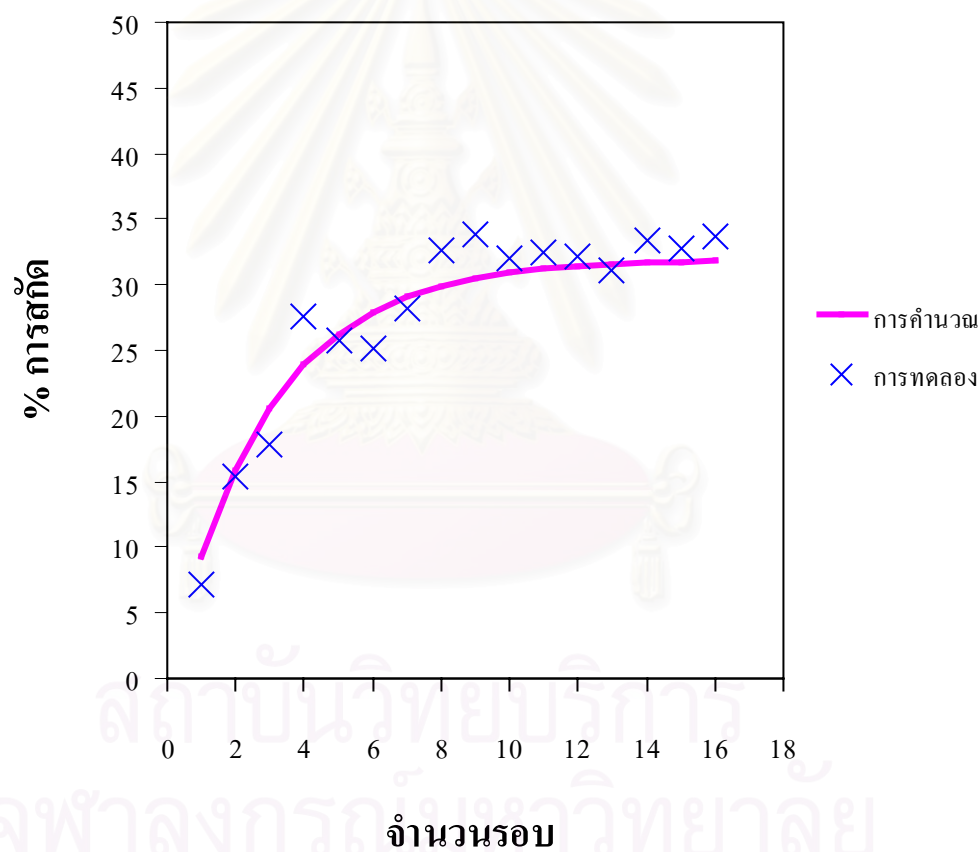
#### 4.8 ผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัด (Graphical Solution for Single & Double Column System)

จุดเด่นของการทำนายผลการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟที่ได้นำเสนอข้างต้นนั้นคือ การใช้เพียงค่าปัจจัยบางประการที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของกระบวนการ สามารถนำมาคำนวณและทำนายผลการสกัดของกระบวนการได้ ทั้งนี้กระบวนการต้องมีเงื่อนไขที่สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้โดยในงานวิจัยนี้ได้นำค่าคงที่สมดุลกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะแต่ละชนิด แทนค่าในวิธีการทำนายผลการสกัดแยกด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 และใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลช่วยในการคำนวณที่จำนวนรอบต่างๆ โดยสามารถแสดงตัวอย่างกราฟที่ได้จากการคำนวณการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟดังรูปที่ 4.8 (ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลคู่ได้จากภาคผนวก ก-8)



รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างผลการทำนายการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM โดยวิธีการสร้างกราฟในระบบหอสกัดเดี่ยว

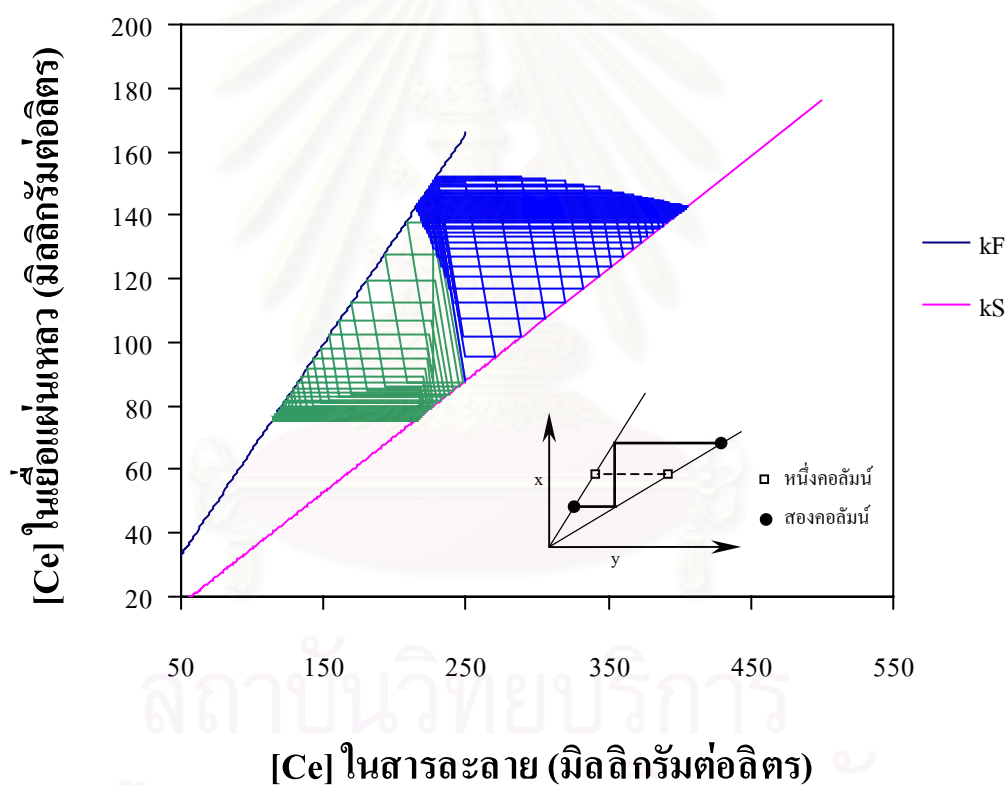
จากรูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างกราฟทำนายผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่ พยุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบหอสกัดเดี่ยว โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลคำนวณและสร้าง กราฟเพื่อคำนวณองค์ประกอบของสารที่สภาวะคงตัวของกระบวนการ ทำการคำนวณโดยใช้ สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าสามารถสร้างกราฟแสดงผลการ คำนวณได้เช่นเดียวกับวิธีการสร้างกราฟในหัวข้อที่ 2.4 โดยมีแผนผังการถ่ายเทมวลต่างดังเช่นรูปที่ 2.3 และสอดคล้องกับขั้นตอนการสร้างกราฟดังรูปที่ 2.4 ผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟที่ได้ นี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 (ผลที่ได้จากการคำนวณด้วย โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล และผลที่ได้จากการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-9)



รูปที่ 4.9 แสดงผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยวเปรียบเทียบ

ระหว่างผลจากการทดลองกับผลจากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอ

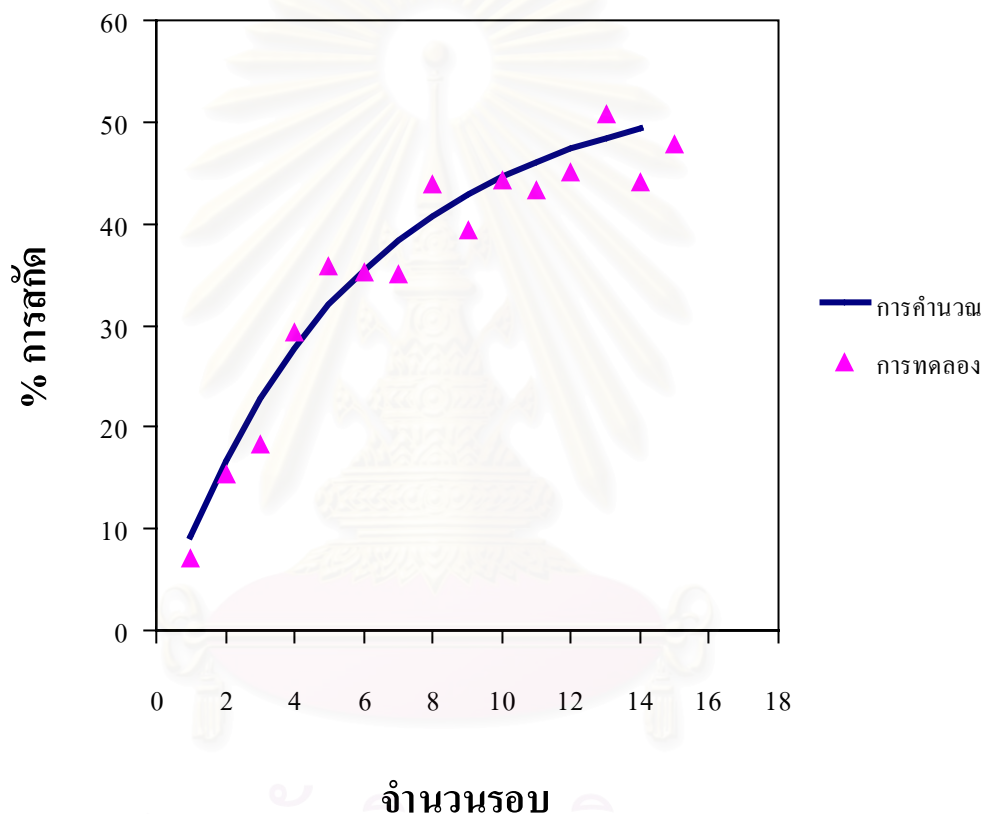
จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยว เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองศึกษากับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟ ดังที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.4 โดยพบว่าแนวโน้มของรูปกราฟการคำนวณจากวิธีการสร้างกราฟมี ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการแสดงถึงสัมฤทธิ์ของวิธีการทำนายผลการสกัด แยกซีเรียมไอออนในกระบวนการ HFSLM ด้วยวิธีการสร้างกราฟ และสำหรับตัวอย่างกราฟที่ได้ จากการคำนวณการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟในระบบสองหอสกัด สามารถ แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 (ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลดูได้จากภาค ผนวก ก-10)



รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างผลการทำนายผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ด้วยวิธีการสร้าง กราฟในระบบสองหอสกัด

จากรูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างกราฟทำนายผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเชื้อแผ่นเหลวที่ พยุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบสองหอสกัด โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลคำนวณและสร้าง

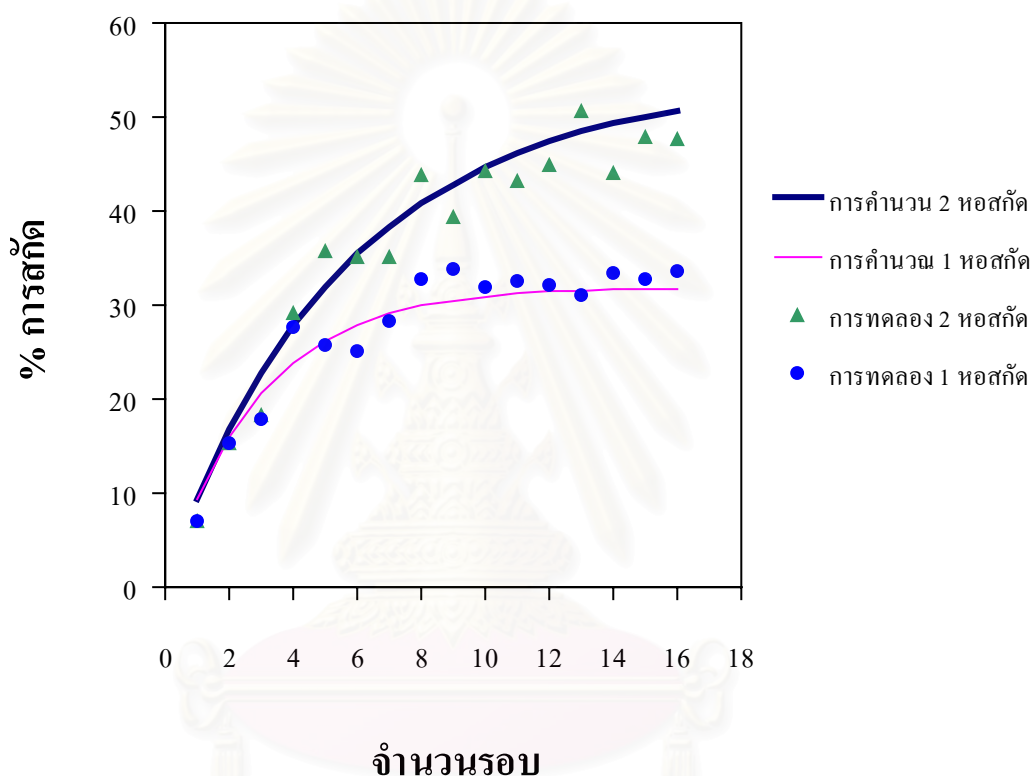
กราฟเพื่อคำนวณองค์ประกอบของสารที่สภาวะคงตัวของกระบวนการ ทำการคำนวณโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองศึกษาที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าสามารถสร้างกราฟแสดงผลการคำนวณได้เช่นเดียวกับวิธีการสร้างกราฟในหัวข้อที่ 2.5 โดยมีแผนผังการถ่ายเทมวลต่างดังเช่นรูปที่ 2.5 และสอดคล้องกับขั้นตอนการสร้างกราฟดังรูปที่ 2.6 ผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 (ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล และผลที่ได้จากการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-11)



รูปที่ 4.11 แสดงผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ในระบบสองหอสกัดเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองกับผลจากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอ

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ในระบบสองหอสกัดเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองศึกษากับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.5 โดยพบว่าแนวโน้มของรูปกราฟการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟมีผล

ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการแสดงถึงผลสัมฤทธิ์ของวิธีการทำนายผลการสกัด แยกซีเรียมไอออนในกระบวนการ HFSLM ด้วยวิธีการสร้างกราฟในระบบสองหอสกัด โดยผลการเปรียบเทียบระหว่างระบบหอสกัดเดี่ยวกับระบบสองหอสกัดของกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 (ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไมโคร ซอร์ฟเอ็กซ์เซล และผลที่ได้จากการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-9 และ ก-11)



รูปที่ 4.12 ผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยวกับระบบสองหอสกัด

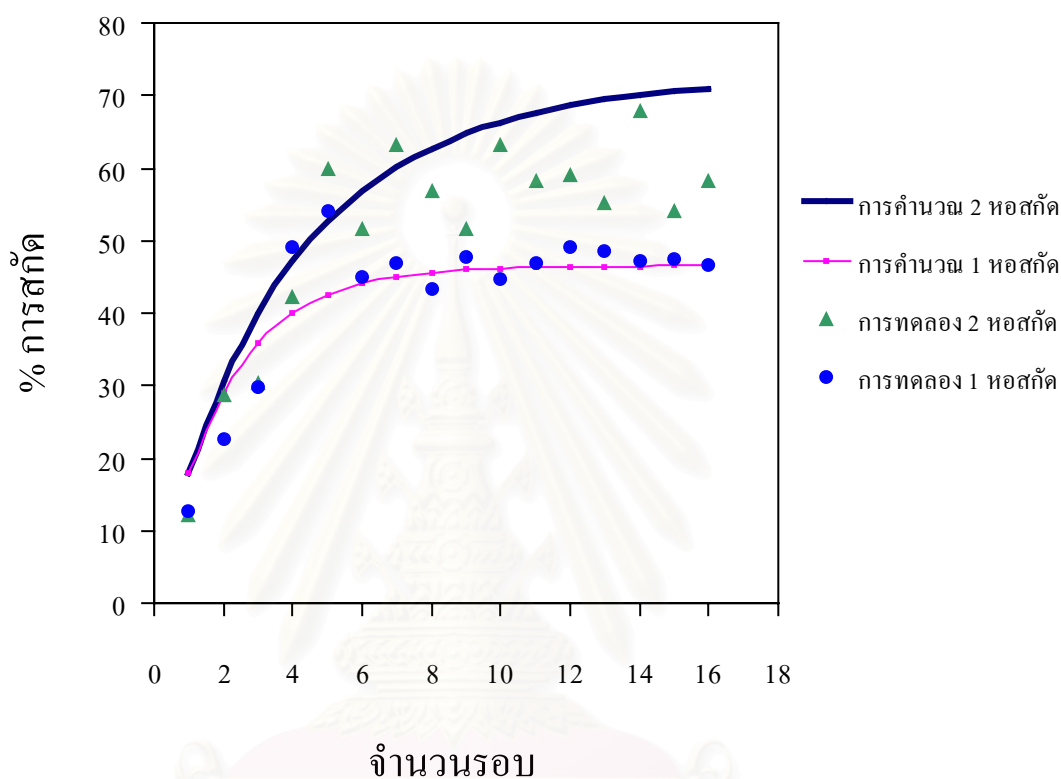
จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองศึกษากับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอมาแล้วในบทที่ 2 โดยผลที่ได้จากการทดลองศึกษาการสกัดแยกซีเรียมไอออนทั้งในระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด พบว่ากระบวนการมีเปอร์เซ็นต์การสกัดและเปอร์เซ็นต์การนำกลับมีทิศทางสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการได้จากเปอร์เซ็นต์การสกัดของกระบวนการเป็นหลัก

และทั้งระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัดพบว่าเมื่อจำนวนรอบในการสกัดแยกเพิ่มสูงขึ้น กระบวนการจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน และเปอร์เซ็นต์การสกัดจะมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่งๆ โดยในระบบหอสกัดเดี่ยวเมื่อจำนวนรอบในการปฏิบัติการมากขึ้นแล้วผลที่ได้จากการทดลองในกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM จะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 33.71% และในระบบสองหอสกัดการทดลองจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 47.73% และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟซึ่งได้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองศึกษา โดยผลที่ได้จากการคำนวณในระบบหอสกัดเดี่ยวมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 31.90% และในระบบสองหอสกัดมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 54.33% เส้นแนวโน้มของรูปภาพที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟมีผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการแสดงถึงผลสัมฤทธิ์ของวิธีการทำนายการสกัดแยกซีเรียมไอออนในกระบวนการ HFSLM ด้วยวิธีการสร้างกราฟในระบบสองหอสกัดที่ได้นำเสนอ ในกรณีของการทำนายผลการสกัดแยก แลนทานัม ไอออนและเปรียบเทียบผลในทำนองเดียวกันกับการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วย HFSLM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 (ข้อมูลผลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-12)

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลการสกัดแยกแลนทานัม ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใย กลวงในระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองศึกษากับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟดังเช่นการสกัดแยกซีเรียมไอออน โดยผลที่ได้จากการทดลองศึกษาการสกัดแยกแลนทานัม ไอออนทั้งในระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด ได้ผลการศึกษาเช่นเดียวกันกับการสกัดแยกซีเรียมไอออน โดยในระบบหอสกัดเดี่ยวเมื่อจำนวนรอบในการปฏิบัติการมากขึ้นแล้วผลที่ได้จากการทดลองในกระบวนการสกัดแยก แลนทานัม ไอออนด้วย HFSLM จะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 47.51% และในระบบสองหอสกัดการทดลองจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 63.18% และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟซึ่งได้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองศึกษา โดยผลที่ได้จากการคำนวณในระบบหอสกัดเดี่ยวมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 46.49% และในระบบสองหอสกัดมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 72.35% เส้นแนวโน้มของรูปภาพที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี

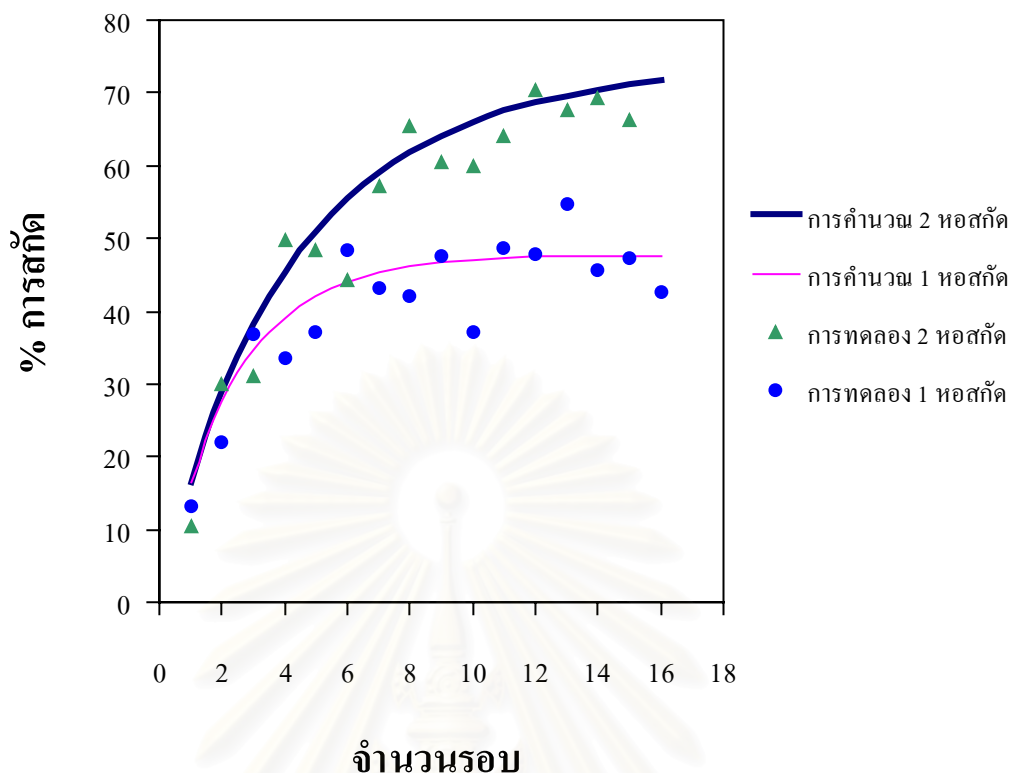


การสร้างกราฟมีผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการแสดงถึงผลสัมฤทธิ์ของวิธีการ  
 ทำนายการสกัดแยกแลนทานัมไอออนในกระบวนการ HFSLM ด้วยวิธีการสร้างกราฟในระบบสอง  
 หอสกัดที่ได้นำเสนอ และในกรณีของการทำนายผลการสกัดแยกนีโอดีเมียมไอออน สามารถแสดง  
 ได้ดังรูปที่ 4.14 (ข้อมูลผลการทดลองคู่ได้จากภาคผนวก ก-13)



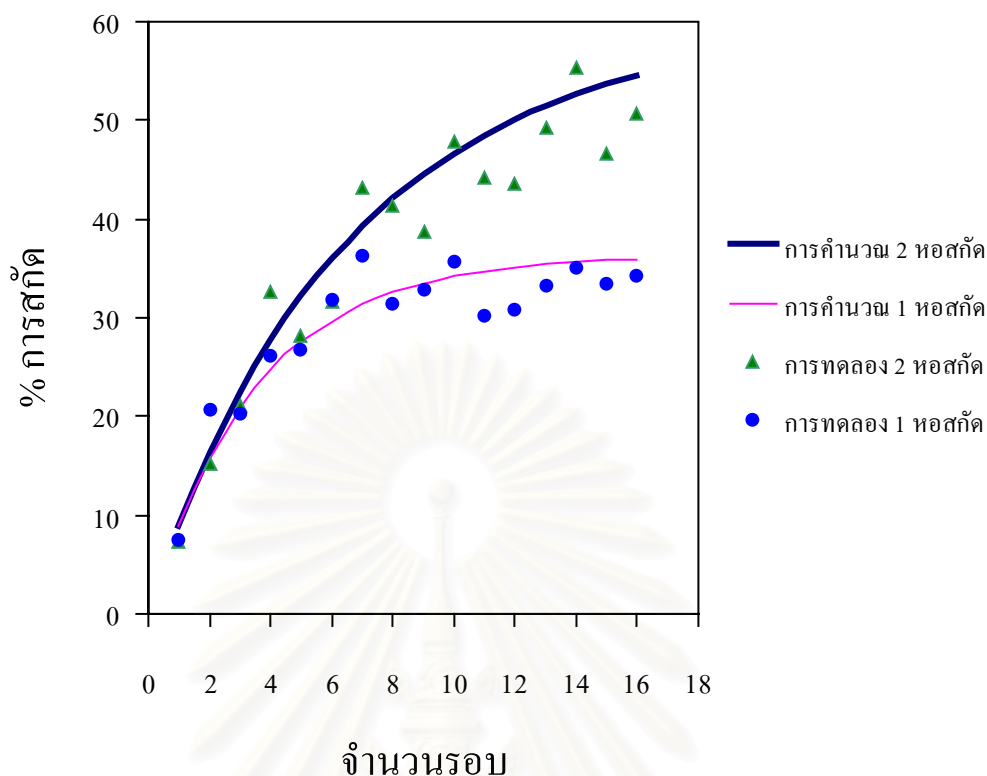
รูปที่ 4.13 ผลการสกัดแยกแลนทานัมไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดียวกับระบบสองหอสกัด

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการสกัดแยกนีโอดีเมียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใย  
 กลวงในระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการ  
 ทดลองศึกษากับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟดังเช่นการสกัดแยกซีเรียมไอออน  
 และแลนทานัมไอออน โดยผลที่ได้จากการทดลองศึกษาการสกัดแยกนีโอดีเมียมไอออนทั้งใน  
 ระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด ได้ผลการศึกษาเช่นเดียวกันกับการสกัดแยกซีเรียม  
 ไอออนและแลนทานัมไอออน



รูปที่ 4.14 ผลการสกัดแอกนีโอดีเมียมไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดียวกับระบบสองหอสกัด

โดยในระบบหอสกัดเดียวเมื่อจำนวนรอบในการปฏิบัติการมากขึ้นแล้วผลที่ได้จากการทดลองในกระบวนการสกัดแอกนีโอดีเมียมไอออนด้วย HFSLM จะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 48.54% และในระบบสองหอสกัดการทดลองจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 70.27% และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟซึ่งได้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองศึกษา โดยผลที่ได้จากการคำนวณในระบบหอสกัดเดียวมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 47.68% และในระบบสองหอสกัดมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 73.80% เส้นแนวโน้มของรูปภาพที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟมีผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการแสดงถึงผลสัมฤทธิ์ของวิธีการทำนายการสกัดแอกนีโอดีเมียมไอออนในกระบวนการ HFSLM ด้วยวิธีการสร้างกราฟในระบบสองหอสกัดที่ได้นำเสนอ และในกรณีของการทำนายผลการสกัดแอกนีโอดีเมียมไอออน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 (ข้อมูลผลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก-14)



**รูปที่ 4.15** ผลการสั กัดแยกแพลเลเดียมไอออนด้วย HFSLM ในระบบหอ สั กัดเดี่ยวกับระบบสองหอ สั กัด

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการสั กัดแยกแพลเลเดียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบหอ สั กัดเดี่ยวและระบบสองหอ สั กัด โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองศึกษา กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟดังเช่นการสั กัดแยกซีเรียมไอออน แลนทานัมไอออนและนีโอเดียมไอออน โดยผลที่ได้จากการทดลองศึกษาการสั กัดแยกแพลเลเดียมไอออนทั้งในระบบหอ สั กัดเดี่ยวและระบบสองหอ สั กัด ได้ผลการศึกษาเช่นเดียวกันกับการสั กัดแยกซีเรียมไอออน แลนทานัมไอออนและนีโอเดียมไอออน โดยในระบบหอ สั กัดเดี่ยวเมื่อจำนวนรอบในการปฏิบัติการมากขึ้นแล้ว ผลที่ได้จากการทดลองในกระบวนการสั กัดแยกแพลเลเดียมไอออนด้วย HFSLM จะมีเปอร์เซ็นต์การสั กัดเข้าใกล้ค่า 35.76% และในระบบสองหอ สั กัดการทดลองจะมีเปอร์เซ็นต์การสั กัดเข้าใกล้ค่า 55.32% และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟซึ่งได้ผลการคำนวณสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองศึกษา โดยผลที่ได้

จากการคำนวณในระบบหอสกัดเดี่ยวมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 36.24% และในระบบสองหอสกัดมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเข้าใกล้ค่า 60.50% เส้นแนวโน้มของรูปกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟมีผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการแสดงถึงผลสัมฤทธิ์ของวิธีการทำนายการสกัดแยกแพลเลเดียมไอออนในกระบวนการ HFSLM ด้วยวิธีการสร้างกราฟในระบบสองหอสกัดที่ได้นำเสนอ โดยผลการเปรียบเทียบทั้งหมดสามารถแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสกัดของไอออนชนิดต่างๆ

ไอออน	% การสกัดในระบบหอสกัดเดี่ยว		% การสกัดในระบบสองหอสกัด	
	การคำนวณ	การทดลอง	การคำนวณ	การทดลอง
Ce	31.90%	33.71%	54.33%	47.73%
La	46.49%	47.51%	72.35%	63.18%
Nd	47.68%	48.54%	73.80%	70.27%
Pd	36.24%	35.76%	60.50%	55.32%

จากผลสรุปการสกัดแยกซีเรียมไอออน แลนทานัมไอออน นีโอดีเมียมไอออนและแพลเลเดียมไอออนดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นตารางสรุปแสดงผลของกระบวนการสกัดด้วย HFSLM ในระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด โดยเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองศึกษากับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ พบว่าเมื่อพิจารณากระบวนการที่ในระบบเดียวกันแล้ว ผลการคำนวณด้วยวิธีการสร้างกราฟมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณากระบวนการเปรียบเทียบระหว่างระบบหอสกัดเดี่ยวกับระบบสองหอสกัดแล้ว เปอร์เซ็นต์การสกัดของกระบวนการในระบบสองหอสกัดจะมีค่าสูงกว่าระบบหอสกัดเดี่ยว โดยเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในระบบสองหอสกัดซึ่งเป็นระบบที่ต่อหอสกัดอนุกรมกัน เปรียบเสมือนเป็นหอสกัดเดี่ยวแต่มีความยาวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้สารละลายเมื่อไหลผ่านหอสกัดในระบบสองหอสกัดแล้วจะมีเวลาอยู่ในหอสกัดยาวนานมากขึ้น ทำให้เกิดการสกัดและการนำกลับดังกล่าวการสกัดของกระบวนการ HFSLM มากขึ้นกระบวนการ

จึงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยนั่นเอง โดยผลการทดลองศึกษาที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่า กระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง ที่มีเงื่อนไขของ กระบวนการเป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ กอปรกับมีพฤติกรรมสอดคล้องกับสมการดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 แล้วนั้น วิธีการทำนายผลการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟ (Graphical Solution Method) ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณและแสดงผลการสกัดแยกไอออนโลหะด้วย กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางได้เป็นอย่างดี



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นบทสรุปผลการศึกษาวิจัยการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอันได้แก่ ความเข้มข้นที่เหมาะสมของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายสตรีปที่เหมาะสม ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในเยื่อแผ่นเหลว ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้นที่เหมาะสม อัตราการไหลของสารละลายที่เหมาะสมกับกระบวนการ และนำสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ไปศึกษาหาค่าคงที่ของกระบวนการที่สภาวะคงตัว เพื่อนำค่าที่ได้นำไปใช้กับวิธีการทำนายผลการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ และนอกจากนี้ยังได้นำสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดแยกไอออนโลหะชนิดอื่นที่นักวิจัยท่านอื่นได้ทำการศึกษาไว้แล้ว ไปทำการทดลองหาค่าคงที่สมดุลกระบวนการ เพื่อทำนายผลการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองของนักวิจัยท่านอื่น ซึ่งผลการวิจัยทั้งหมดที่ได้ดำเนินการนั้นสามารถสรุปได้เป็นลำดับดังต่อไปนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ซีเรียมไอออนในสารละลายซีเรียมซัลเฟตที่ใช้เป็นสารละลายป้อนสามารถสกัดแยกได้ด้วยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด Kerosene Jet A-1 เป็นเยื่อแผ่นเหลว และใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายสตรีป
2. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบหอสกัดเดี่ยวสามารถแสดงได้เป็นลำดับดังต่อไปนี้



2.1 ค่าความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สำหรับงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายสตริปที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สำหรับงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร

2.3 ค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สำหรับงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.10 โมลต่อลิตร

2.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้นที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สำหรับงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 6.50

2.5 อัตราการไหลของสารละลายที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สำหรับงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 80 มิลลิตรต่อนาที

3. เยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในระบบหอสกัดเดี่ยว ดำรงเสถียรภาพอยู่ได้ไม่เกิน 90 นาที (1 ชั่วโมง 30 นาที) ที่อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 80 มิลลิตรต่อนาที และเมื่อทำการป้อนเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่โมดูลเส้นใยกลวง ที่เวลา 80 นาทีแล้ว ทำให้สามารถขยายเวลาการดำรงเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวไว้ได้ไม่เกิน 170 นาที (2 ชั่วโมง 50 นาที)

4. กระบวนการสกัดแยกซีเรียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในระบบหอสกัดเดี่ยวที่สภาวะคงตัวมีค่าคงที่ของสมดุลการสกัดในกระบวนการเท่ากับ 0.658 และมีค่าคงที่ของสมดุลการนำกลับในกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.327

5. ค่าคงที่สมดุลของกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะชนิดอื่นๆ (แลนทานัมไอออน นิโอดีเมียมไอออน และพลูโตเนียมไอออน) ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางโดยนำสภาวะที่เหมาะสมจากผลการศึกษานักวิจัยท่านอื่นที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องมือชุดนี้มาแล้ว มาทำการศึกษาค่าคงที่สมดุลกระบวนการเพื่อนำไปใช้กับการทำนายผลการสกัดด้วยวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณ โดยวิธีการสร้างกราฟกับผลที่ได้จากการทดลองทั้งในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัดซึ่งสามารถสรุปผลทั้งหมดและการเปรียบเทียบดังกล่าวได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปค่าคงที่สมดุลกระบวนการ และแสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดของไอออนชนิดต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการในระบบหอสกัดเดี่ยว กับระบบสองหอสกัด

ไอออน	$k_F$	$k_S$	% การสกัดในระบบหอสกัดเดี่ยว		% การสกัดในระบบสองหอสกัด	
			การคำนวณ	การทดลอง	การคำนวณ	การทดลอง
Ce	0.658	0.327	31.90%	33.71%	54.33%	47.73%
La	1.096	0.411	46.49%	47.51%	72.35%	63.18%
Nd	0.958	0.35	47.68%	48.54%	73.80%	70.27%
Pd	0.553	0.253	36.24%	35.76%	60.50%	55.32%

6. เมื่อกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง มีเงื่อนไขต่างๆ พฤติกรรมของกระบวนการสอดคล้องกับสมการและสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ในบทที่ 2 แล้วนั้น ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าวิธีการทำนายผลการสกัดโดยใช้วิธีการสร้างกราฟ (Graphical Solution Method) ซึ่งเป็นไปตามวิธี หลักการ และขั้นตอนต่างๆ ดังที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 2 นั้นสามารถทำนายผลการสกัดแยกไอออนโลหะ ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางทั้งในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัดได้เป็นอย่างดี

7. วิธีการสร้างกราฟที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนา เพื่อใช้กับกระบวนการสกัดในระบบหลายหอสกัดได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาไอออนโลหะอื่นๆ ในหลายๆ กลุ่มเช่นกลุ่มโลหะอัลคาไลด์ กลุ่มโลหะทรานซิชัน เป็นต้นเพื่อสนับสนุนวิธีการสร้างกราฟดังที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ให้สามารถใช้เป็นวิธีการศึกษาได้อย่างแพร่หลาย

2. ควรศึกษาวิธีการรักษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ให้ดำรงอยู่ในรูปพหุคูณของเส้นใยกลวงโดยใช้เวลาให้ยาวนานกว่านี้ เพื่อประโยชน์ในการพัฒนากระบวนการให้เป็นแบบต่อเนื่อง

3. ควรศึกษาสารสกัดชนิดอื่นๆ เพิ่มเติม อาทิเช่น TBP (Tributyl Phosphate) และ D2EHPA (Di (2-Ethylhexyl) phosphate) เป็นต้น

4. วิธีการสร้างกราฟ (Graphical Solution Method) ดังที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธี หลักการและขั้นตอนต่างๆ ที่สอดคล้องกับกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยพิจารณาอาศัยหลักสมดุลกระบวนการเพียงเท่านั้น แต่สำหรับแนวคิดของวิธีการสร้างกราฟนี้สามารถพัฒนาใช้กับกระบวนการที่สภาวะไม่สมดุลได้อีกด้วย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์. การนำกลับแพลตฟอร์มเดียมจากกรดักทองใช้แล้วโดยเชื่อมต่อแพลตฟอร์มที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ทบวงมหาวิทยาลัย คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์สาขาเคมี. เคมี เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพมหานคร: อักษรเจริญทัศน์, 2541.

นิติต สุไลมาน. การสกัดนีโอดีเมียโดยเชื่อมต่อแพลตฟอร์มที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

บัญชา คำสิงห์. การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมออกจากแร่โมนาไซต์ โดยใช้จานหมุนแบบมีรู. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

ประกร รามกุล. การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดีเมียโดยเชื่อมต่อแพลตฟอร์มที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

ประพีร์ ผลอนันต์. เคมีวิเคราะห์ 1. พิมพ์ครั้งแรก. เชียงใหม่ : ศูนย์หนังสือเชียงใหม่, 2528.

ไพศาล อภินิหารพัฒน์. การสกัดแยกและนำกลับโครเมตด้วยเชื่อมต่อแพลตฟอร์มที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในหลอดเดียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

แม่น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2539.

รัตนา จิระรัตนานนท์. กระบวนการแยกด้วยเชื่อมต่อแพลตฟอร์มสังเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรงพิมพ์ไทยเส็ง, 2543.

- วิทยา นามสว่าง. การสกัดแยกไอออนแลนทานัมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- วีรวัฒน์ ปัตทีกองคา. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติกกับโซเดียมอะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. รายงานประจำปี 2539. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2540.
- สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก. เอกสารเผยแพร่ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2538.
- อิสรา เกษมเศรษฐ. การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายเจือจางมากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

## ภาษาอังกฤษ

- A. A. Elhassadi and D. D. Do. Modeling of the Mass Transfer Rates of Metal Ions across Supported Liquid membranes. II. Comparison between Theory and Experiment Separation Science & Technology 34, 3 (1999): 461-486.
- Allison B. Encyclopedia of Science and Technology. New York: McGraw-Hill., 1997.
- Chaudry M. A., Amin S. and Malik M. T. Tri-n-octylamine-Xylene-Based Supported Liquid Membranes and Transport of Ce(IV) Ions. Separation Science & Technology 31, 9 (1996): 1309-1326.
- Chen H. T., Pancharoen U., Yang W. T., Kerobo C. O. and Parisi R. J. Separation of Proteins via pH Parametric Pumping. Separation Science & Technology 15, 6 (1980): 1377-1391.

- Chen H. T., Yang W. T., Pancharoen U., and Parisi R. J. Separation of Proteins via Multicolumn pH Parametric Pumping. The American Institute of Chemical Engineers Journal 26, 5 (1980): 839-849.
- Ching Yeh Shiau and Pai Zon Chen. Theoretical Analysis of Copper-Ion Extraction through Hollow Fiber Supported Liquid Membranes. Separation Science & Technology 28, 13&14 (1993): 2149-2165.
- D. E. Barnes and G. D. Marshall. Rapid Optimization of Chemical Parameters Affecting Supported Liquid Membranes. Separation Science & Technology 30, 5 (1995): 751-776.
- El-Said N., Abdel Rahman N. and Emad H. Borai. Modification in Purex Process Using Supported Liquid Membrane Separation of Cerium(III) via Oxidation to Cerium(IV) From Fission Products From Nitrate Medium By SLM. Journal of Membrane Science 198 (2002): 23-31.
- Goto M., Yamamoto H., Kondo K., and Nakashio F.. Effect of new surfactants on zinc extraction with liquid surfactant membranes. Journal of Membrane Science 57, 2-3 (1991): 161-174.
- Goto M., Matsumoto M., Kondo K., Irie J., and Nakashio F. Role of surfactants in the behavior of emulsion liquid membranes – development of new surfactants\*1. Journal of Membrane Science 38, 3(1988): 249-260.
- H. K. Lonsdale. The growth of membrane technology, Journal of Membrane Science 10, 2-3 (1982): 81-181.
- H. Strathmann. Membrane separation processes. Journal of Membrane Science 9, 1-2 (1981): 121-189.
- Hendrick C. Van Ness, Michael M. Abbott Classical thermodynamics of nonelectrolyte solutions : with applications to phase equilibria. New York: McGraw-Hill., 1982.
- Ho, W. S. w, and Li, N. N. Emulsion liquid membranes: Definitions. In W. S. Winston Ho and K. K. Sirkar (eds.). Membrane Handbook : 597-610. New York: Van Nastrand Reinhold, 1992.



- Huang T. C. and Juang R. S. Extraction Equilibrium of Zinc from Sulfate media with Bis(2-ethylhexyl) Phosphoric Acid. Industrial Engineering Chemical Fundamental 25 (1986): 752-757.
- Huang T. C. and Juang R. S. Kinetics and Mechanism of Zinc extraction from Sulfate media with Di(2-ethylhexyl) Phosphoric Acid. Journal of Chemical Engineering of Japan 19, 5 (1986): 379-386.
- J. Fu, S. Nakamura, and K. Akiba. Extraction of Platinum(IV) with Trioctylamine and Its Application to Liquid Membrane Transport. Separation Science & Technology 30, 4 (1995): 609-619.
- J. S. Gill, U. R. Marwah and B. M. Misra. Transport of Samarium(III) and Uranium(VI) across a Silicone-Supported Liquid Membrane Using Di(2-ethylhexyl)phosphoric Acid and Tributyl Phosphate as Mobile Carriers. Separation Science & Technology 29, 2 (1994): 193-203.
- Jeong S.K. and Ju C. S. Extraction of Strontium Ion from Sea Water by Contained Liquid Membrane Permeator. Korean Journal of Chemical Engineering 19, 1 (2002): 93-98.
- K. Uezu, M. Goto, S. Irie, K. Ikemizu, and F. Nakashio. Extraction of Rare Earth Metals Using Liquid Surfactant Membranes Prepared by a Synthesized Surfactant. Separation Science & Technology 30, 17 (1995): 3325-3338.
- Lange, N. A. and Forker, G. M. Handbook of Chemistry. 10<sup>th</sup> Ed. New York: McGraw-Hill., 1967.
- Liacono, O., Drioli, E., and Molinari, R. Metal Ion Separation and Concentration with Supported Liquid Membranes. Journal of Membrane Science. 28 (1986): 123-138.
- Liu, X. and Zhang, X. Simplified model for extraction of rare earth ions using emulsion liquid membrane. Journal of Membrane Science 128 (1997): 223-229.
- Loiacono, O., Drioli, E., and Molinari, R. Metal ions separation and concentration with supported liquid membranes. Journal of Membrane Science. 28 (1986): 123-138.

- M. Milanova, T. Horozov, A. Nikolov and D. Todorovsky. On the Liquid Membrane Extraction of Lanthanum and Neodymium. Separation Science & Technology 28, 8(1993): 1641-1646.
- Mark C. Porter. Handbook of Industrial Membrane Technology. New Jersey: Noyes Publications, 1990.
- Marr R. J. and Kopp A. Liquid Membrane Technology a Survey of Phenomena, Mechanism and Models. International Chemical Engineering 22, 1 (1982): 44-59.
- Nopphakorn Thamphiphit. 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. 1996.
- Norman N. Li. Facilitated transport through liquid membranes – an extended abstract, Journal of Membrane Science 3, 2 (1978): 265-269.
- Norman N. Li, Cahn, R. P., Naden, D. and Lai, R. W. Liquid Membrane Process for Copper Extraction. Hydrometallurgy. 9 (1983) : 277-305.
- Norman N. Li. and Frankenfeld, J. W. Recent Advances in Liquid Membrane Technology. Handbook of Separation Process Technology. New York: John Wiley & Sons., 1987.
- Patthaveekongka W., Vijitchalermpong N. and Pancharoen U. Selective Recovery of Palladium from Used Aqua Regia by Hollow Fiber Supported With Liquid Membrane. Korean Journal of Chemical Engineering 20, 6 (2003): 1092-1096.
- Ramakul P. and Pancharoen U. Synergistic Extraction and Separation of Mixture of Lanthanum and Neodymium by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Korean Journal of Chemical Engineering 20, 4 (2003): 724-730.
- Richard W. Baker and Menlo Park. Membrane Technology and Applications. New York: McGraw-Hill., 2000.
- Scott, K. Handbook of Industrial Membranes. Oxford: Elsevier Science Publishers, 1995.

- Shiau C. Y. and Chen P. Z. Theoretical Analysis of Copper-Ion Extraction Through Hollow Fiber Supported Liquid membranes. Separation Science & Technology 28, 13&14 (1993): 2149-2165.
- Smith J. C., Harriott P., Warren L. and McCabe W. L. Unit Operations of Chemical Engineering. 6<sup>th</sup> edition. New York: McGraw-Hill., 2000.
- Tavlarides, L. L., Bae, J. H., and Lee, C. K. Solvent extraction, membranes and ion exchange in hydrometallurgical dilute metals separation. Separation Science and Technology 22, 2&3 (1987):581-617.
- Teramoto M., Sakaida Y., Fu S. S., Ohnishi N., Matsuyama H., Maki T., Fukui T. and Arai K. An Attempt for The Stabilization of Supported Liquid Membrane. Separation & Purification Technology 21, 1-2 (2000): 137-144.
- W. S. Winston Ho and Kamalesh K. Sirkar. Membrane Handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- Yi J. Effects of The Boundary Layer and Interfacial Reaction on The Time Lag in Supported Liquid Membranes. Korean Journal of Chemical Engineering 12, 3 (1995): 391-395.
- Yi M. H., Nam S.J. and Chung S.T. Separation of L-Valine by Anionic Carrier-Mediated Transport in a Supported Liquid Membrane. Korean Journal of Chemical Engineering 14, 4 (1997): 263-269.
- Z. M. Gu. A new liquid membrane technology-electrostatic pseudo liquid membrane. Journal of Membrane Science 582 (1990): 77-88.
- Z. M. Gu. Electrostatic Pseudo-Liquid-Membrane. In W. S. Winston Ho and K. K. Sirkar (eds.). Membrane Handbook : 867-884. New York: Van Nastrand Reinhold, 1992.
- Z. M. Gu, D. T. Wasan and N. N. Li. Ligand-accelerated liquid membrane extraction of metal ions. Journal of Membrane Science 26, 2 (1986): 129-142.



**ภาคผนวก**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลผลการทดลอง

ตาราง ก-1 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารละลายป้อน

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนซีเรียในสารละลายป้อนเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)						
	100.00	150.00	200.00	250.00	300.00	500.00	1,000.00
	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>
3.00	99.25	148.02	197.25	245.58	290.04	475.56	930.36
6.00	98.91	147.15	194.37	241.15	285.69	467.45	918.21
9.00	97.75	144.67	191.84	235.75	281.31	459.91	901.79
12.00	97.34	141.95	188.06	232.36	275.84	452.22	888.55
15.00	96.25	141.64	186.74	228.75	270.65	443.38	864.16
18.00	95.97	140.01	181.69	223.45	264.36	435.05	863.43
21.00	94.38	138.45	180.45	219.53	260.57	426.72	838.28
24.00	94.06	135.91	176.77	214.65	255.08	420.41	830.69
27.00	94.57	136.05	174.20	209.25	248.99	407.50	808.74
30.00	92.51	132.66	170.88	205.75	245.07	404.05	796.50
33.00	92.73	131.24	165.43	200.25	236.34	391.97	759.83
36.00	90.70	127.75	164.95	196.94	233.58	382.25	748.11
39.00	90.25	126.46	161.07	190.75	227.94	371.41	725.00
42.00	90.18	125.97	156.23	188.05	220.82	359.76	700.13
42.00	90.18	125.97	156.23	188.05	220.82	359.76	700.13

ตาราง ก-1 (ต่อ) ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารละลายป้อน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นของไอออนซีเรียมในสารละลายป้อนเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)						
	100.00	150.00	200.00	250.00	300.00	500.00	1,000.00
	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>	[Ce] <sub>out</sub>
45.00	88.75	121.88	155.67	185.08	218.69	352.53	690.01
48.00	87.44	121.42	153.93	179.27	210.66	341.04	664.45
51.00	87.25	118.38	149.75	172.51	203.51	327.75	642.36
54.00	86.23	118.02	144.81	170.35	196.04	318.86	625.58
57.00	86.81	115.35	144.63	168.54	191.76	312.34	617.90
60.00	85.64	114.66	140.98	162.96	190.35	309.12	611.64

ตาราง ก-2 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายสตริป

[H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ] (โมลต่อลิตร)	[Ce] <sub>Feed, out</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	[Ce] <sub>Strip, out</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% การสกัด	% การนำกลับ
0.05	201.12	288.47	19.552	15.388
0.10	172.53	319.25	30.988	27.700
0.20	175.97	310.36	29.612	24.144
0.30	176.41	306.81	29.436	22.724
0.50	179.38	301.53	28.248	20.612
1.00	189.67	282.79	24.132	13.116



ตาราง ก-3 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในเยื่อแผ่นเหลว

[TOA] (โมลต่อลิตร)	[Ce] <sub>Feed, out</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	[Ce] <sub>Strip, out</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% การสกัด	% การนำกลับ
0.05	198.49	295.47	20.604	18.188
0.10	171.53	320.62	31.388	28.248
0.15	171.17	319.89	31.532	27.956
0.20	170.62	319.25	31.752	27.700
0.3	172.34	319.08	31.064	27.632
0.50	171.65	318.74	31.340	27.496

ตาราง ก-4 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของสารละลายป้อน

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	[Ce] <sub>Feed, out</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	[Ce] <sub>Strip, out</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% การสกัด	% การนำกลับ
3.95	171.53	310.19	31.388	24.076
4.50	166.99	320.53	33.204	28.212
5.00	154.16	325.67	38.336	30.268
5.50	148.35	328.75	40.660	31.500
6.00	139.64	335.24	44.144	34.096
6.50	132.97	347.96	46.812	39.184
7.00	145.82	330.81	41.672	32.324

ตาราง ก-5 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาหาอัตราการใช้ที่เหมาะสมของสารละลาย

อัตราการใช้ (มิลลิเมตรต่อนาที)	[Ce] <sub>Feed, out</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	[Ce] <sub>Strip, out</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	% การสกัด	% การนำกลับ
80.00	132.97	352.25	46.812	40.900
100.00	134.48	352.46	46.208	40.984
200.00	148.92	336.79	40.432	34.716
300.00	169.71	306.85	32.116	22.740
500.00	193.64	290.31	22.544	16.124
800.00	208.58	269.94	16.568	7.976
1,000.00	214.91	265.52	14.036	6.208

ตาราง ก-6 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัด

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของยูเรีย ในสารละลายสตริป (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ไม่ได้ป้อนซ้ำ	ป้อนซ้ำ 1 ครั้ง
10.00	0.010	0.017
20.00	0.010	0.015
30.00	0.015	0.010
40.00	0.020	0.012
50.00	0.010	0.010
60.00	0.019	0.025
70.00	0.010	0.013
80.00	0.018	0.021
90.00	0.028	0.017
100.00	0.019	0.031

ตาราง ก-6 (ต่อ) ข้อมูลผลการทดลองศึกษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัด

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของยูเรีย ในสารละลายสตริป (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ไม่ได้ป้อนซ้ำ	ป้อนซ้ำ 1 ครั้ง
110.00	0.011	0.019
120.00	1.500	0.035
130.00	3.000	0.017
140.00	6.000	0.027
150.00	6.700	0.011
160.00	8.500	0.032
170.00	10.000	0.028
180.00	12.900	0.044
190.00	15.100	1.420
200.00	20.700	2.900
210.00	23.400	5.500
220.00	28.300	8.500
230.00	-	9.800
240.00	-	14.300

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก-7 ข้อมูลผลการทดลองศึกษาการสกัดที่สภาวะคงตัว เพื่อหาค่าคงที่สมดุลกระบวนการ

ซีเรียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			แลนทานัมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
Feed <sub>in</sub>	Feed <sub>Out</sub>	Strip <sub>Out</sub>	Feed <sub>in</sub>	Feed <sub>Out</sub>	Strip <sub>Out</sub>
100.00	47.91	114.67	100.00	36.67	120.53
150.00	82.76	165.43	150.00	65.91	174.68
200.00	106.32	221.17	200.00	78.19	231.79
250.00	132.54	281.78	250.00	102.45	283.18
300.00	151.61	342.53	300.00	125.77	332.95
350.00	173.25	401.82	350.00	142.53	406.53
400.00	203.72	451.74	-	-	-
500.00	278.12	541.87	-	-	-

ตาราง ก-7 (ต่อ) ข้อมูลผลการทดลองศึกษาการสกัดที่สภาวะคงตัว เพื่อหาค่าคงที่สมดุลกระบวนการ

นีโอดีเมียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			แพลเลเดียมไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
Feed <sub>in</sub>	Feed <sub>Out</sub>	Strip <sub>Out</sub>	Feed <sub>in</sub>	Feed <sub>Out</sub>	Strip <sub>Out</sub>
50.00	20.01	64.71	20.00	10.53	25.72
100.00	42.69	118.58	50.00	28.54	55.24
150.00	67.62	171.93	100.00	51.82	114.35
200.00	84.69	241.81	150.00	85.11	171.67
300.00	128.99	355.29	200.00	110.72	230.08
400.00	169.85	468.52	250.00	130.67	294.93

ตาราง ก-8 ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้  
โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลในระบบหอดสกัดเดียว

N	[Ce] <sub>Feed</sub> (mg/l)	[Ce] <sub>Strip</sub> (mg/l)	N	[Ce] <sub>Feed</sub> (mg/l)	[Ce] <sub>Strip</sub> (mg/l)
1	225.2097	250.0000	25	162.8636	327.6535
2	207.4706	272.0944	26	162.8537	327.6658
3	194.7771	287.9045	27	162.8508	327.6694
4	185.6941	299.2176	28	162.8487	327.6721
5	179.1946	307.3129	29	162.8472	327.6740
6	174.5437	313.1056	30	162.8461	327.6753
7	171.2157	317.2507	31	162.8453	327.6763
8	168.8344	320.2168	32	162.8448	327.6769
9	167.1303	322.3392	33	162.8444	327.6774
10	165.9110	323.8579	34	162.8441	327.6778
11	165.0384	324.9447	35	162.8439	327.6780
12	164.4141	325.7223	36	162.8437	327.6782
13	163.9673	326.2788	37	162.8436	327.6784
14	163.6476	326.6770	38	162.8435	327.6785
15	163.4189	326.9619	39	162.8435	327.6785
16	163.2552	327.1658	40	162.8435	327.6786
17	163.138	327.3117	41	162.8434	327.6786
18	163.0542	327.4161	42	162.8434	327.6786
19	162.9942	327.4908	43	162.8434	327.6786
20	162.9513	327.5442	44	162.8434	327.6787
21	162.9206	327.5825	45	162.8434	327.6787
22	162.8986	327.6098	46	162.8434	327.6787
23	162.8829	327.6294	47	162.8434	327.6787
24	162.8717	327.6434	48	162.8434	327.6787

ตาราง ก-9 ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรม ไมโครซอฟท์เอ็กเซล และผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว

จำนวนรอบ	[Ce] <sub>Feed</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง
1	226.6727	232.21
2	210.0384	211.65
3	198.1767	205.34
4	189.7184	180.92
5	183.6869	185.67
6	179.3860	187.11
7	176.3190	179.49
8	174.1320	168.31
9	172.5726	165.55
10	171.4605	170.12
11	170.6675	168.87
12	170.1021	169.61
13	169.6988	172.35
14	169.4113	166.47
15	169.2063	168.24
16	169.0601	165.73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง ก-10 ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟด้วยโปรแกรม ไมโครซอฟท์เอ็กเซลในระบบสองหอสกัด

N	[Ce] <sub>Feed</sub> (mg/l)	[Ce] <sub>Strip</sub> (mg/l)	N	[Ce] <sub>Feed</sub> (mg/l)	[Ce] <sub>Strip</sub> (mg/l)
1	250.0000	250.0000	25	116.5912	401.8093
2	226.7424	270.5575	26	116.2236	402.2971
3	208.0974	289.2016	27	115.9118	402.7110
4	192.9224	305.7313	28	115.6473	403.0621
5	180.4288	320.1762	29	115.4229	403.3600
6	170.0548	332.6804	30	115.2325	403.6127
7	161.3871	343.4363	31	115.0710	403.8271
8	154.1126	352.6487	32	114.9339	404.0089
9	147.9878	360.5159	33	114.8177	404.1632
10	142.8194	367.2208	34	114.7191	404.2941
11	138.4511	372.9271	35	114.6354	404.4052
12	134.7548	377.7789	36	114.5644	404.4994
13	131.6247	381.9014	37	114.5042	404.5793
14	128.9727	385.4025	38	114.4531	404.6471
15	126.7247	388.3749	39	114.4098	404.7047
16	124.8189	390.8980	40	114.3730	404.7535
17	123.2027	393.0392	41	114.3418	404.7949
18	121.8320	394.8562	42	114.3153	404.8300
19	120.6694	396.3980	43	114.2929	404.8598
20	119.6833	397.7061	44	114.2739	404.8851
21	118.8468	398.8160	45	114.2577	404.9065
22	118.1371	399.7576	46	114.2440	404.9247
23	117.5351	400.5565	47	114.2324	404.9401
24	117.0244	401.2343	48	114.2225	404.9532

ตาราง ก-10 (ต่อ) ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟด้วยโปรแกรม  
ไมโครซอฟท์เอ็กเซลในระบบสองหอสกัด

N	[Ce] <sub>Feed</sub> (mg/l)	[Ce] <sub>Strip</sub> (mg/l)	N	[Ce] <sub>Feed</sub> (mg/l)	[Ce] <sub>Strip</sub> (mg/l)
49	114.2141	404.9644	69	114.1690	405.0242
50	114.2070	404.9738	70	114.1688	405.0245
51	114.2010	404.9818	71	114.1686	405.0248
52	114.1959	404.9886	72	114.1684	405.0251
53	114.1916	404.9943	73	114.1682	405.0253
54	114.1879	404.9992	74	114.1681	405.0255
55	114.1848	405.0033	75	114.1679	405.0256
56	114.1821	405.0068	76	114.1678	405.0258
57	114.1799	405.0098	77	114.1678	405.0259
58	114.1780	405.0124	78	114.1677	405.0260
59	114.1763	405.0145	79	114.1676	405.0261
60	114.1750	405.0163	80	114.1676	405.0261
61	114.1738	405.0179	81	114.1675	405.0262
62	114.1728	405.0192	82	114.1675	405.0262
63	114.1720	405.0203	83	114.1675	405.0263
64	114.1713	405.0212	84	114.1674	405.0263
65	114.1707	405.0220	85	114.1674	405.0263
66	114.1702	405.0227	86	114.1674	405.0264
67	114.1697	405.0233	87	114.1674	405.0264
68	114.1694	405.0238	88	114.1674	405.0264

ตาราง ก-11 ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟโดยใช้โปรแกรม ไมโครซอฟท์เอ็กเซล และผลที่ได้จากการทดลองในระบบสองหอสกัด

จำนวนรอบ	[Ce] <sub>Feed</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง
1	226.7424	232.29
2	208.0974	211.63
3	192.9224	204.37
4	180.4288	176.91
5	170.0548	160.67
6	161.3871	162.11
7	154.1126	162.49
8	147.9878	140.31
9	142.8194	151.55
10	138.4511	139.12
11	134.7548	141.87
12	131.6247	137.61
13	128.9727	123.35
14	126.7247	139.71
15	124.8189	130.34
16	123.2027	130.67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก-12 ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดซีเรียมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรม ไมโครซอฟท์เอ็กเซลและผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบ สองหอสกัด

จำนวนรอบ	[Ce] <sub>Feed</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ระบบหอสกัดเดี่ยว		ระบบสองหอสกัด	
	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง
1	225.2097	232.21	226.7424	232.29
2	207.4706	211.65	208.0974	211.63
3	194.7771	205.34	192.9224	204.37
4	185.6941	180.92	180.4288	176.91
5	179.1946	185.67	170.0548	160.67
6	174.5437	187.11	161.3871	162.11
7	171.2157	179.49	154.1126	162.49
8	168.8344	168.31	147.9878	140.31
9	167.1303	165.55	142.8194	151.55
10	165.9110	170.12	138.4511	139.12
11	165.0384	168.87	134.7548	141.87
12	164.4141	169.61	131.6247	137.61
13	163.9673	172.35	128.9727	123.35
14	163.6476	166.47	126.7247	139.71
15	163.4189	168.24	124.8189	130.34
16	163.2552	165.73	123.2027	130.67

ตาราง ก-13 ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดแลนทานัมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟ โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลและผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัด

จำนวนรอบ	[La] <sub>Feed</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ระบบหอสกัดเดี่ยว		ระบบสองหอสกัด	
	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง
1	82.0445	130.85	82.0445	131.65
2	71.0201	116.08	69.3006	106.89
3	64.2513	105.22	59.9213	104.32
4	60.0954	76.37	52.8406	86.71
5	57.5438	68.96	47.4043	60.26
6	55.9771	82.53	43.1849	72.45
7	55.0152	79.82	39.8879	55.38
8	54.4246	84.94	37.3006	64.94
9	54.0620	78.52	35.2652	72.52
10	53.8393	82.91	33.6614	55.23
11	53.7026	79.46	32.3964	62.79
12	53.6187	76.27	31.3982	61.27
13	53.5672	77.16	30.6101	67.16
14	53.5355	79.37	29.9878	48.37
15	53.5161	78.74	29.4964	68.74
16	53.5042	79.87	29.1083	62.87

ตาราง ก-14 ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดนีโอดีเมียมไปออนด้วยวิธีการสร้างกราฟโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล และผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัด

จำนวนรอบ	[Nd] <sub>Feed</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ระบบหอสกัดเดี่ยว		ระบบสองหอสกัด	
	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง
1	83.3838	86.85	83.3838	89.68
2	72.5517	78.08	71.1330	70.16
3	65.4903	63.22	61.8492	68.82
4	60.8870	66.37	54.6688	50.21
5	57.8861	62.96	49.0339	51.64
6	55.9298	51.53	44.5672	55.87
7	54.6545	56.82	41.0023	42.91
8	53.8232	57.94	38.1441	34.54
9	53.2812	52.52	35.8457	39.47
10	52.9279	62.91	33.9937	40.16
11	52.6976	51.46	32.4995	35.88
12	52.5475	52.27	31.2930	29.73
13	52.4496	45.16	30.3182	32.33
14	52.3858	54.37	29.5303	30.71
15	52.3442	52.74	28.8934	33.74
16	52.3171	57.32	28.3785	30.96



ตาราง ก-15 ข้อมูลผลการคำนวณการสกัดแพลเลเดียมไอออนด้วยวิธีการสร้างกราฟโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล และผลที่ได้จากการทดลองในระบบหอสกัดเดี่ยว และระบบสองหอสกัด

จำนวนรอบ	[Pd] <sub>Feed</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	ระบบหอสกัดเดี่ยว		ระบบสองหอสกัด	
	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง	ผลจากการคำนวณ	ผลจากการทดลอง
1	45.5192	46.21	45.5192	46.38
2	42.1433	39.65	41.8082	42.36
3	39.5999	39.84	38.7023	39.41
4	37.6836	36.92	36.0806	33.67
5	36.2400	36.67	33.8525	35.92
6	35.1523	34.11	31.9486	34.21
7	34.3328	31.83	30.3151	28.37
8	33.7154	34.31	28.9090	29.31
9	33.2503	33.55	27.6957	30.66
10	32.8998	32.12	26.6468	26.12
11	32.6358	34.87	25.7387	27.87
12	32.4369	34.61	24.9517	28.16
13	32.2870	33.35	24.2690	25.35
14	32.1741	32.47	23.6765	22.34
15	32.0891	33.24	23.1620	26.67
16	32.0250	32.87	22.7151	24.71

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### 1. ประสิทธิภาพในการสกัด (% Extraction)

$$\% \text{ การสกัด หรือ } (\% \text{ Extraction}) = \frac{\text{ปริมาณไอออนโลหะที่สกัดได้}}{\text{ปริมาณไอออนโลหะตั้งต้น}} \times 100$$

ข้อมูลจากตาราง ก-2 [TOA]	=	0.10 โมลต่อลิตร
ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก	=	0.05 โมลต่อลิตร
ความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนเริ่มต้น	=	250.00 มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายป้อนขาออก	=	201.12 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปริมาตรของสารป้อนขาเข้า	=	5.00 ลิตร
ปริมาตรของสารป้อนขาออก	=	5.00 ลิตร

$$\% \text{ การสกัด } (\% \text{ Extract}) = \left[ \frac{[(250.00 \text{ mg/l})(5.00 \text{ l}) - (201.12 \text{ mg/l})(5.00 \text{ l})]}{(250.00 \text{ mg/l})(5.00 \text{ l})} \right] \times 100$$

$$= 19.552 \%$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. ประสิทธิภาพในการนำกลับ (% Recovery)

$$\% \text{การนำกลับ หรือ } (\% \text{ Recovery}) = \frac{\text{ปริมาณไอออนโลหะที่นำกลับได้}}{\text{ปริมาณไอออนโลหะตั้งต้น}} \times 100$$

ข้อมูลจากตาราง ก-2 ที่ [TOA]	= 0.10 โมลต่อลิตร
ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก	= 0.05 โมลต่อลิตร
ความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายสตรีปเริ่มต้น	= 250.00 มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นของซีเรียมไอออนในสารละลายสตรีปขาออก	= 288.47 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปริมาตรของสารละลายสตรีปขาเข้า	= 5.00 ลิตร
ปริมาตรของสารละลายสตรีปขาออก	= 5.00 ลิตร

$$\% \text{การนำกลับ } (\% \text{ Recovery}) = \left[ \frac{[(288.47 \text{ mg/l} - 250 \text{ mg/l})(5.00 \text{ l})]}{(250 \text{ mg/l})(5.00 \text{ l})} \right] \times 100$$

$$= 15.388 \%$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวีรวัฒน์ ปัตทวิทงศา เกิดเมื่อวันที่ 7 เดือนพฤษภาคม ปีพุทธศักราช 2516 ณ จังหวัดสมุทรสาคร เป็นบุตรคนที่ 7 จากจำนวนบุตรทั้งสิ้น 8 คนของนายทวี ปัตทวิทงศา ผู้ซึ่งเป็นบิดา โดยมีนางวรรณ ปัตทวิทงศาเป็นมาดาผู้ให้กำเนิด สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนวัดบางหญ้าแพรก จังหวัดสมุทรสาคร ในปีพุทธศักราช 2527 และสำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเอกชัย จังหวัดสมุทรสาคร ในปีพุทธศักราช 2529 ต่อมาจึงเข้าศึกษาต่อในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนสุวรรณารามวิทยาคม กรุงเทพมหานคร จนสำเร็จการศึกษาในปีพุทธศักราช 2532 และเข้าศึกษาต่อในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนอานวยศิลป์ พระนคร กรุงเทพมหานคร จนสำเร็จการศึกษาในปีพุทธศักราช 2535 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในปีพุทธศักราช 2538 เข้าศึกษาต่อในรัฐจามจุรีโดยศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีพุทธศักราช 2539 และสำเร็จการศึกษาในปีพุทธศักราช 2542 ด้วยผลการสอบวิทยานิพนธ์ในระดับ “ดีมาก (Very Good)” ต่อจากนั้นในปีเดียวกันได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีพุทธศักราช 2547

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย