

การสกัดนี้โอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นายนิสิต สุไลมาน

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

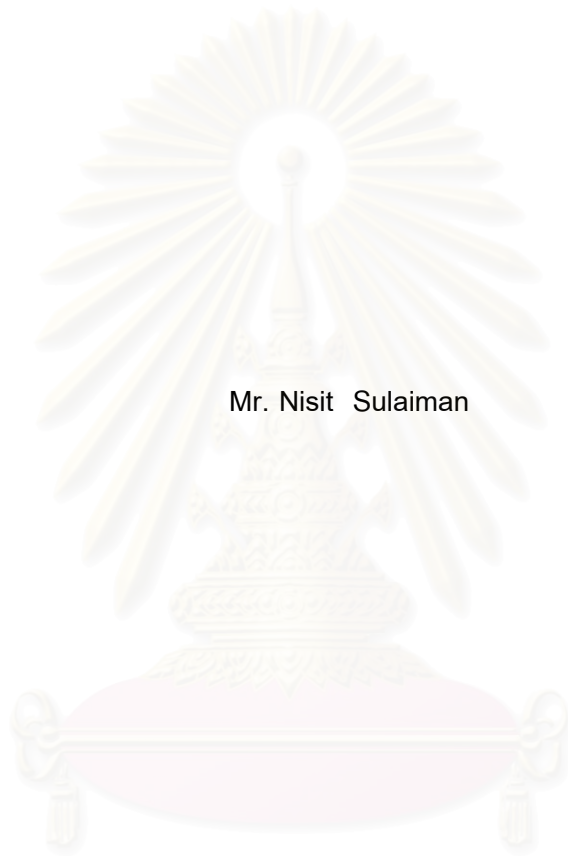
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0314-9

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EXTRACTION OF NEODYMIUM  
VIA A HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



Mr. Nisit Sulaiman

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0314-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง  
โดย                              นายนิสิต สุไลมาน  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย สุกาญจน์จที)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

สภามหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นิสิต สุไลมาน : การสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

(EXTRACTION OF NEODYMIUM VIA A HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID

MEMBRANE) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร.อุรา ปานเจริญ, 142 หน้า ISBN 974-13-0314-9

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการสกัดนีโอดีเมียมโดยใช้กรดไดเอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (D2EHPA) ละลายในเคโรซีนเป็นสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งถูกพุงไว้ในรูปทรงหลอดภาชนะของเส้นใยกลวงชนิดไม่ชอบน้ำ และได้ศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนในช่วงที่มีความเป็นกรด, ความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนอยู่ในช่วง 20 ถึง 120 ส่วนในล้านส่วน, ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA อยู่ในช่วงความเข้มข้น 3 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปในช่วงความเข้มข้น 0.01 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร

ผลการศึกษาแสดงว่าค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อร้อยละการสกัดโดยได้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 และอัตราการถ่ายโอนมวลของนีโอดีเมียมไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนใน สารละลายป้อนมีค่าสูงกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน สำหรับความเข้มข้นของสารสกัดในช่วงความเข้มข้น 3 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด อย่างไรก็ตามอัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นอกจากนี้ยังพบว่าไม่มีผลกระทบต่ออัตราการสกัดเมื่อใช้กรดไนตริกที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.1 โมลต่อลิตร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี ..... ลายมือ นิสิต .....

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

ปีการศึกษา.....2542 .....

## 4070319921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD:

NEODYMIUM/EXTRACTION/SUPPORTED LIQUID MEMBRANE/HOLLOW FIBER

NISIT SULAIMAN : EXTRACTION OF NEODYMIUM VIA A HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS ADVISOR: ASSO. PROF. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc. 142 pp. ISBN 974-13-0314-9

This research studied the extraction of neodymium by using di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid (D2EHPA) which is an extractant dissolved in kerosene as membrane solution. The membrane solution was carried out using a microporous hydrophobic hollow fiber membrane extractor. The effect of this process were also studied including the pH of feed solutions within the acidic-pH range, the concentration of neodymium ion in feed solutions in the range of 20 to 120 ppm, the concentration of D2EHPA in membrane solutions in the range of 3 to 20 percent by volume and the concentration of nitric acid in strip solution in the range of 0.01 to 0.5 mol/l

The results showed that the percentage of extraction is dependent on the pH of the feed solution, with the maximum value at pH 3 and the molar flux of neodymium ion increases in accordance with the concentration of neodymium ion in feed solution and be constant when the concentration of neodymium ion in feed solution is higher than 100 ppm. In addition, when the concentration of D2EHPA is in the range of 3 to 9 percent by volume, the molar flux increases in accordance with an increase in the concentration of D2EHPA. However, the molar flux is constant when the concentration of D2EHPA is higher than 9 percent by volume. Moreover, the extraction is not affected by nitric acid with the concentration higher than 0.1 mol/l.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ..... CHEMICAL ENGINEERING.....

Student's signature.....

Field of study ..... CHEMICAL ENGINEERING.....

Advisor's signature.....

Academic year .....2000 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษาตลอดจนคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย สุกาญจน์ที่ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์ และ นางสาวอมรรักษ์ ประเวศทองโสภณ นักนิเวศลิษฐ์เคมี อีกทั้งสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการวิเคราะห์การทดลอง ตลอดจนศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากที่ได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับธาตุหายาก รวมทั้งบริษัทไทยออยล์ จำกัด ที่เล็งเห็นความสำคัญของการวิจัย และได้ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสารเคมี

ทำยนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา พี่สาวและพี่ชายของผู้วิจัย ซึ่งให้การสนับสนุนอีกทั้งยังให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องทุกคนในภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นกำลังใจให้โดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สัญลักษณ์.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	11
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	11
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
2. ทฤษฎี.....	13
2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	14
2.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	17
2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน.....	21
2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่ถูกพองบนตัวรองรับ.....	25
(1) ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....	25
(2) ตัวรองรับชนิดเกลียววน.....	27
(3) ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง.....	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์.....	31
2.3 ชนิดของสารสกัด.....	35
2.3.1 สารสกัดชนิดกรด.....	35
2.3.2 สารสกัดชนิดต่าง.....	36
2.3.3 สารสกัดชนิดโซลเวท.....	37
3. การทดลอง.....	39
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.3 วิธีการทดลอง.....	42
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	49
4.1 ผลการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดนีโอดีเมียมไอออนและ หาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป.....	51
4.2 ผลการศึกษาเพื่อศึกษาเลือกช่วงของความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมต่อ การศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	55
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ต่างในสารละลายป้อนที่มีต่อ การศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	58
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนที่มีต่อ การศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	61
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อ การศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	65
4.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตรีปที่มีต่อ การศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	68



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก (ข้อมูลการเทียบมาตรฐานการวัดอัตราการไหลของชุดทดลอง).....	80
ภาคผนวก ข (ข้อมูลดิบ).....	82
ภาคผนวก ค (ผลการคำนวณ).....	96
ภาคผนวก ง (คำนิยาม).....	134
ภาคผนวก จ (ตัวอย่างการคำนวณ).....	135
ประวัติผู้วิจัย.....	142

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย กับเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลว.....	34
2-2 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ.....	34
3-1 แสดงรายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3-2 แสดงรายละเอียดของคุณลักษณะของชุดเส้นใยกลาง.....	41
ก-1 แสดงข้อมูลการเทียบมาตรฐานการวัดอัตราการไหลภายในเส้นใยกลางในชุดทดลอง.....	80
ก-2 แสดงข้อมูลการเทียบมาตรฐานการวัดอัตราการไหลภายนอกเส้นใยกลางในชุดทดลอง.....	80
ข-1 แสดงข้อมูลการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดนีโอดีเมียมและหาปริมาณที่เหมาะสม สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริป.....	82
ข-2 แสดงข้อมูลการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสม ต่อการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	83
ข-3 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	84
ข-4 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอดีเมียม โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	89
ข-5 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริป ที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	95
ค-1 แสดงข้อมูลของ Calibration Curve สำหรับการทดลอง.....	96
ค-2 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับสำหรับการศึกษา ประสิทธิภาพของการสกัดนีโอดีเมียม และหาปริมาณที่เหมาะสม สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริป.....	98

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ค-3	แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับสำหรับการศึกษา เพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับ การสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	99
ค-4	แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดสำหรับการศึกษาอิทธิพลของ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอติเมียม โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	100
ค-5	แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับสำหรับการศึกษา อิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริบที่มีต่อ การศึกษาการสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	105
ค-6	แสดงผลการคำนวณปริมาณนีโอติเมียมไอออนในสารละลายสำหรับการศึกษา เพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับ การสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	106
ค-7	แสดงผลการคำนวณปริมาณนีโอติเมียมไอออนในสารละลายสำหรับการศึกษา อิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอติเมียมในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	107
ค-8	แสดงผลการคำนวณอัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับ สำหรับการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับ การสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	113
ค-9	แสดงผลการคำนวณอัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับสำหรับ การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอติเมียมในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของ สารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	114

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค-10 แสดงผลการคำนวณสมมูลมวลสำหรับการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับการสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	120
ค-11 แสดงผลการคำนวณสมมูลมวลสำหรับการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอติเมียมในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการสกัดนีโอติเมียม โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	121
ค-12 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบปริมาณ [D2EHPA] กับปริมาณของนีโอติเมียมไอออน ที่สะสมในขบวนการของชุดทดลองสำหรับการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับการสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	127
ค-13 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบปริมาณ [D2EHPA] กับปริมาณของนีโอติเมียมไอออน ที่สะสมในขบวนการของชุดทดลองสำหรับการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ นีโอติเมียมในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อ การสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	128

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้าที่
2-1	แสดงขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับในการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย..... 14
2-2	แสดงขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชัน..... 15
2-3	แสดงกลไกการสกัดแยกไอออนโลหะโดยเยื่อแผ่นเหลว..... 18
2-4	แสดงขั้นตอนการสกัดแยกโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน..... 21
2-5	แสดงลักษณะของอิมัลชันซ้อน (Double Emulsion) และ กลไกการถ่ายโอนมวลในอิมัลชันซ้อน..... 22
2-6	แสดงลักษณะการใช้ตัวประสานในขบวนการเกิดอิมัลชันซ้อนแบบ W/O/W และ O/W/O..... 23
2-7	แสดงรูปพหุคูณจุลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่ทำจาก PTFE..... 26
2-8	แสดงกลไกการสกัดของกระบวนการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลว ที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง..... 26
2-9	แสดงลักษณะของตัวรองรับชนิดเกลียววนและแสดงการแบ่งชั้นการไหลของวัสดุภาคต่างๆ..... 28
2-10	แสดงรูปพหุคูณจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง..... 29
2-11	แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยกลวง..... 30
2-12	แสดงลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์..... 32
3-1	แสดงสูตรโครงสร้างของสารสกัด..... 39
3-2	แสดงชุดการทดลองการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง..... 40
3-3	แสดงรายละเอียดของตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ บนชุดการทดลอง..... 40
3-4	แสดงการปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One Through Mode)..... 43
4-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลากับความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออน สำหรับสารละลายป้อนขาออกและสารละลายสตรีปขาออก..... 51
4-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลากับเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับของ นีโอดีเมียมไอออนสำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป..... 53

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
4-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กับ เปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับของนีโอดีเมียมไอออน..... 55
4-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กับอัตราการถ่ายโอนมวลของการสกัดและการนำกลับนีโอดีเมียมไอออน..... 56
4-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน กับเปอร์เซ็นต์การสกัดของนีโอดีเมียมไอออน..... 58
4-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมในสารละลายป้อน กับอัตราการถ่ายโอนมวลของการสกัดและการนำกลับนีโอดีเมียมไอออน..... 61
4-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กับอัตราการถ่ายโอนมวลของการสกัดและการนำกลับนีโอดีเมียมไอออน..... 65
4-8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตรีป กับเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับของนีโอดีเมียมไอออน..... 68
ก-1	แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานการวัดอัตราการไหลทั้งภายในและภายนอกเส้นใยกลวง ของชุดทดลอง..... 81
ค-1	แสดง Calibration Curve สำหรับการทดลอง..... 97

## สัญลักษณ์

### สัญลักษณ์

D2EHPA	di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid
F	สารละลายป้อน
S	สารละลายสตรีป
aq	วัฏภาคสารละลายน้ำ
org	วัฏภาคสารละลายอินทรีย์
f	ปฏิกิริยาไปข้างหน้า
b	ปฏิกิริยาย้อนกลับ
$K_{ex}$	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา
r	อัตราการเกิดปฏิกิริยา
J	อัตราการถ่ายโอนมวล
d	อัตราการกระจายตัว (distribution ratio)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)
M	ไอออนโลหะ
m,n	จำนวนโมล
RH	สารสกัด
[ ]	ความเข้มข้นของสารละลายนั้น
V	ปริมาตร

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

นับวันเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น จากภาวะความเป็นอยู่ที่เรียบง่ายกลับซับซ้อน จนทุกวันนี้ความต้องการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงได้ขยายตัวมากขึ้น ประกอบกับความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากการมีอุปกรณ์อำนวยความสะดวกขั้นสูงมากมาย อาทิเช่น โทรศัพท์ติดตามตัว คอมพิวเตอร์ รถยนต์ความเร็วสูง ฯลฯ ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีไม่ได้หยุดยั้งเพียงแค่นี้ แต่ได้มีการพัฒนาเพื่อสนองความต้องการของมนุษย์ที่มีอย่างไม่สิ้นสุด โลหะวัสดุที่รู้จักกันดีจำพวก เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง ดีบุก เป็นทรัพยากรที่ถูกนำมาใช้เป็นเวลานานโดยการเปิดเหมืองแร่จากเปลือกโลก สินแร่โลหะเหล่านี้ถูกนำมาใช้อย่างฟุ่มเฟือยโดยไม่คำนึงถึงประโยชน์สูงสุดที่จะได้รับและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้สินแร่โลหะเริ่มจะลดน้อยลงไปอปรกับการออกกฎหมายที่เข้มงวดมากขึ้น การวิจัยและพัฒนาโลหะวัสดุตลอดจนกระบวนการผลิตจึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาประเทศ เพื่อแสวงหาวัสดุ และกรรมวิธีในการผลิตที่มีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดผลคุ้มค่าและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ : 1996) เหล่านี้ล้วนส่งผลต่ออัตราการเพิ่มการใช้กลุ่มธาตุแร่เอิร์ทเป็นอันมาก (เดชนา ชูตินารา : 1994)

ธรรมชาติการกำเนิดของธาตุหายากคือ มักเกิดกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปมากกว่าจะเกิดรวมกันเป็นหัวแร่ (concentrates) พบว่ามีแร่เกือบ 200 ชนิดที่มีแร่หายากปนอยู่ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.01 (โดยน้ำหนัก) แต่มีแร่เพียง 10 กว่าชนิดเท่านั้นที่มีปริมาณของธาตุหายากสูงพอที่จะจัดเป็นแหล่งกำเนิดที่สามารถนำมาสกัดธาตุหายากได้ในเชิงพาณิชย์และในจำนวนแร่ทั้ง 10 กว่าชนิดนี้มีอยู่เพียง 3 ชนิด ที่มีปริมาณมากซึ่งประมาณว่าร้อยละ 95 ของธาตุหายากทั้งโลกมีกำเนิดอยู่ในแร่ทั้ง 3 ชนิดนี้ ได้แก่ แร่บาสนเนสไตต์ (bastnaesite) แร่โมนาไซต์ (monazite) และซีโนไทม์ (zenotime)



กลุ่มธาตุแรเอิร์ทหรือธาตุหายาก คือกลุ่มธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ (Lanthanide Series) ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมมีตั้งแต่ 57 ถึง 71 ประกอบด้วยกันทั้งหมด 15 ธาตุ และรวมทั้งอิตเทรียม (Etrium) (หมายเลขอะตอม 39) ซึ่งเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับธาตุในอนุกรมนี้ ในธรรมชาติธาตุเหล่านี้จะเกิดรวมกัน (ยกเว้น Prometium) ในแร่ และสามารถแยกออกจากร่เหล่านี้ในรูปออกไซด์ (Oxide) แรเอิร์ทแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ 2 กลุ่ม คือ แรเอิร์ท กลุ่มเบา (Light rare earth) หรือ กลุ่มซีเรียม (Ce-sub group) ประกอบด้วยธาตุหมายเลขอะตอมตั้งแต่ 57-63 (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm และ Eu) และแรเอิร์ทกลุ่มหนัก (Heavy rare earth) หรือกลุ่มอิตเทรียม (Y-sub group) ซึ่งประกอบด้วยแรเอิร์ทที่เหลือรวมทั้งอิตเทรียมด้วย (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb และ Lu) โดยที่นีโอดิเมียมถูกค้นพบโดย Mosander ในปี พ.ศ. 2386 แต่พบในรูปของ didymium ซึ่งมาจากภาษากรีกคือ “didymos” แปลว่า “ฝาแฝด” ต่อมาในปี พ.ศ. 2428 Auer จึงพบว่า เป็น 2 ธาตุปนกัน ได้แก่ เพอร์ซีโอดิเมียม และนีโอดิเมียม ชื่อของธาตุทั้งสองนี้มาจากภาษากรีกว่า “prasio” ร่วมกับ didymos แปลว่า “ฝาแฝดสีเขียว” และ “neos” ร่วมกับ “didymos” แปลว่า “ฝาแฝดคูใหม่” ตามลำดับ

แรเอิร์ทที่พบในประเทศไทย ส่วนใหญ่เกิดรวมอยู่กับแหล่งแร่ดีบุกในทะเลและบนบก เป็นแรเอิร์ทจำพวกโมนาไซต์และซีโนไทม์ พบในบริเวณจังหวัดภูเก็ต พังงา ระนอง และชุมพร เป็นต้น นอกจากแหล่งแร่ดีบุกแล้วยังมีการสำรวจพบแร่โมนาไซต์บริเวณชายหาดของประเทศตามชายฝั่งทะเลอันดามัน และบริเวณอ่าวไทย เช่นที่จังหวัดภูเก็ต ประจวบคีรีขันธ์ และระยอง คาดว่าบริเวณชายหาดจะเป็นแหล่งแร่โมนาไซต์ที่สำคัญในอนาคต

ในปัจจุบันมีการใช้นีโอโดิเมียมซึ่งเป็นธาตุแรเอิร์ทตัวหนึ่งที่มีปริมาณการใช้มากขึ้นเรื่อย ๆ โดยนำไปผสมกับเหล็ก (ซึ่งราคาถูกกว่าโคบอลต์มาก) และโบรอน มาผลิตเป็นแม่เหล็กถาวรตระกูลใหม่ล่าสุดคือ NdFeB (ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก : 1995) ประกอบด้วย Nd ประมาณ 31-34% , Fe 3% และ B 1.3% ความต้องการโลหะผสมชนิดนี้ตกประมาณ 900-1,000 เมตริกตันต่อปี ดังนั้นแนวโน้มความต้องการนีโอดิเมียมในอนาคตอันใกล้นี้ค่อนข้างสูงกว่าแรเอิร์ทตัวอื่น ๆ แม่เหล็กถาวร NdFeB นี้เป็นแม่เหล็กที่มีกำลังสูงมากโดยกำลังแรงกว่าแม่เหล็กทั่วไป 5-10 เท่าตัว เพราะฉะนั้นในการนำมาใช้งานเมื่อเปรียบเทียบความแรงแม่เหล็กเท่า ๆ กัน แม่เหล็ก NdFeB จะมีขนาดเล็กกว่ามากในขณะที่ราคาสูงขึ้นไปไม่เกิน 5 เท่าตัว แม่เหล็กที่มีกำลังสูงเช่นนี้ ทำให้อุปกรณ์ที่ต้องใช้แม่เหล็กมีขนาดเล็กลงได้มาก เช่น มอเตอร์ที่ใช้กับรถยนต์ทั้งในการขับเคลื่อน ปิดน้ำฝนและเปิดปิดกระจกรถยนต์ หรือแม่เหล็กที่ใช้กับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กประเภทนาฬิกาข้อมือ ลำโพง หูฟัง หัวเทป เป็นต้น ด้านอาวุธสงครามก็ใช้ผลิตมอเตอร์ควบคุม

ทิศทางการวิจัยด้านนาโนวิทย์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบอุปกรณ์เกี่ยวกับคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ ในด้านการแพทย์มีตัวอย่างให้เห็นชัดเจนก็คือ อุปกรณ์วินิจฉัยโรค Magnetic Resonance Imaging (MRI) ลักษณะเป็นโพรงครอบตัวคนใช้ตลอดศีรษะจรดปลายเท้าและต้องใช้แม่เหล็กที่มีกำลังสูงมาก การเปลี่ยนจาก Super conducting magnet มาใช้แม่เหล็ก NdFeB ระบบจะไม่ซับซ้อนและประหยัดพลังงานกระแสไฟฟ้ามากขึ้น นอกจากนี้ในปัจจุบันยังได้มีการประยุกต์ใช้แม่เหล็กถาวร NdFeB ในรูปของ “flywheel battery” (ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก : 1995) อีกด้วย ซึ่งเป็นแบตเตอรี่รถยนต์แบบใหม่ที่ใช้แม่เหล็ก NdFeB ฝังไว้ในแบร์ริงของมูเล่ (Flywheel) ซึ่งหมุนรอบแกนลวดตัวนำ การหมุนของมูเล่ทำให้สนามแม่เหล็กหมุนตัดกับแกนลวดตัวนำและเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งจะถูเก็บสะสมเอาไว้ได้มากกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วที่ใช้กันทั่วไปมากกว่า 10 เท่าตัว

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นพบว่า นีโอไดเมียม (Nd) เป็นแร่ธาตุตัวหนึ่งที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในหลาย ๆ ด้าน แต่เนื่องจาก ธาตุแร่ธาตุทั้ง 16 ตัวมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกันมาก เพราะการจัดรูปของอิเล็กตรอนของอะตอม (electron configuration) คล้ายคลึงกันแต่จะมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน จึงมีการใช้ประโยชน์ของคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกันนี้ในการแยกสกัดและวิเคราะห์แร่ธาตุแต่ละตัวได้ แต่การแยกแร่ธาตุแต่ละตัวออกจากกันให้มีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูงจะต้องใช้เทคนิคเฉพาะ จึงเป็นผลให้แร่ธาตุเฉพาะตัวมีราคาสูง นอกจากราคาของแร่ธาตุเฉพาะตัวจะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ทางเคมีแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่ธาตุแต่ละตัวที่เกิดขึ้นในธรรมชาติอีกด้วย ในปัจจุบันนี้หน่วยงานที่ทำการศึกษาวิจัยการแปรสภาพแร่โมนาไซต์เพื่อให้ได้แร่ธาตุออกไซด์แต่ละตัวที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งนีโอไดเมียมบริสุทธิ์ซึ่งเป็นวัตถุดิบตัวหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการผลิตแม่เหล็กถาวร NdFeB ดังกล่าวข้างต้นนั้นยังมีอยู่น้อย อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพที่โดยรวมทั้งกำลังการผลิตก็ยังไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งเทคนิคที่ใช้เป็นการสกัดด้วยวิธี Ion-Exchange และ Liquid-Liquid Extraction (ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก : 1995)

งานวิจัยนี้จึงได้เสนออีกทางเลือกหนึ่งในการสกัดแยกและการนำกลับนีโอติเมียม นั่นคือ อาศัยวิธีการสกัดแยกและการนำกลับโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Liquid Membrane) ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและมีการประยุกต์ใช้มากในปัจจุบันเพราะเป็นวิธีที่มีการลงทุนต่ำ ขั้นตอนการดำเนินงานไม่ยุ่งยาก ง่ายในการขยายขนาดโดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง และมีค่าใช้จ่ายระหว่างการดำเนินงานที่ต่ำกว่า ดังนั้นวิธีนี้อาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการสกัดแยกและนำกลับนีโอติเมียมที่มีอยู่ในสินแร่แรเอิร์ทภายในประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปนีโอติเมียม ออกไซด์ ( $Nd_2O_3$ ) เพื่อให้ได้นีโอติเมียมบริสุทธิ์ได้

ในปัจจุบันนีโอติเมียมบริสุทธิ์ส่วนใหญ่ยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ (ประเทศที่นำเข้ารายใหญ่ได้แก่ประเทศจีน) โดยในประเทศไทยยังไม่มีหน่วยงานใดที่สามารถรองรับความต้องการนีโอติเมียมบริสุทธิ์จำนวนมากได้ และการนำเข้าจากต่างประเทศนั้นนีโอติเมียมบริสุทธิ์มีราคาที่สูง ดังนั้นถ้าสามารถหาวิธีในการทำการผลิตนีโอติเมียมบริสุทธิ์เพื่อรองรับความต้องการที่มีอยู่ได้ก็เป็นหนทางหนึ่งที่น่าสนใจ

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

Chitra K.R. et al. (1995) ได้ทำการศึกษาถึงจลนศาสตร์ของการลำเลียงนีโอติเมียมผ่าน bulk liquid membrane ด้วยเครื่องมือที่ประกอบด้วย 3 วัฏภาค คือ วัฏภาคเริ่มต้น (source phase), วัฏภาคเยื่อแผ่น (membrane phase) และ วัฏภาครับ (receiving phase) รวมทั้งได้ศึกษาถึงตัวแปรในการทำการทดลองต่าง ๆ เช่น pH, ความเข้มข้นของตัวพา, ไอออนของโลหะ และสารเคมีที่ใช้ในการสกัด และได้มีการเปรียบเทียบจลนศาสตร์กับวิธีในการสกัดด้วยตัวทำละลายถึงการหาค่าคงที่สมดุลการสกัดด้วย รวมทั้งมีการพัฒนาแบบจำลองที่ใช้อธิบายกลไกที่ซับซ้อนไว้ด้วย นอกจากนี้ยังได้มีการทำนายถึง kinetic behavior ของการลำเลียงไอออน ในด้านของขบวนการในการสกัดแบบไปข้างหน้าและย้อนกลับ โดยพิจารณาถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ การลำเลียงไอออนของ Nd ในวัฏภาครับ (receiving phase) หรือวัฏภาคเยื่อแผ่นคาดว่าจะสามารถใช้หาค่าคงที่อัตราการสกัดแบบไปข้างหน้าและย้อนกลับได้ จากการทำการทดลองพบว่าอัตราการสกัดไปข้างหน้าและย้อนกลับของการลำเลียงนีโอติเมียมไอออนในระบบ BLM ซึ่งประกอบด้วยวัฏภาคเริ่มต้น วัฏภาคเยื่อแผ่น และวัฏภาครับ กับ EHPNA ใน xylene ที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น pH ของสารละลายน้ำ, ความเข้มข้นของไอออนของโลหะ, ความเข้มข้นของตัวพา, ความเร็วในการกวน เป็นต้น และพบว่าฟลักซ์ของการแพร่และฟลักซ์ของปฏิกิริยาเคมีมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการดำเนินการสำหรับระบบ BLM

Kataoka T. et al. (1995) งานวิจัยนี้นำเสนอกลไกการสกัดธาตุแลนทานัมไอออนโดยใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวชนิดพอง (supported liquid membrane) ซึ่งใช้เยื่อพองชนิดเทฟลอน (teflon millipore membrane) ภายในบรรจุสารละลายกรดไดเอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (HDEHP) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารสกัด ละลายในเคโรซีนและยึดเกาะในเยื่อแผ่นพองด้วยแรงคาปิลลารี (capillary forces) เยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างสารละลายน้ำที่มี pH ต่างกันคือด้านสกัดและด้านสตริป แลนทานัมจะถูกทำให้เข้มข้นขึ้นและถ่ายเทมวลจากด้านสารละลายน้ำที่มี pH สูงมายังด้านที่มี pH ต่ำ งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบผลของความเข้มข้นของสารนำพาในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของแลนทานัมในสารละลายน้ำในด้านสกัดและด้านสตริป และ pH ของสารละลายน้ำที่มีต่ออัตราการซึมผ่าน (permeation of lanthanum) และได้ศึกษาผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวในเยื่อแผ่นเหลวซึ่งพบว่าจะทำให้อัตราการซึมผ่านลดลง ผลการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโมเดลการซึมผ่าน (permeation model) พบว่าอัตราการซึมผ่านสามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้โดยโมเดลการซึมผ่านที่รวมปฏิกิริยาการสกัดและปฏิกิริยาการสตริปที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้าน รวมทั้งการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลวและการแพร่ของแลนทานัมในฟิล์มบาง ๆ เข้าไปในเยื่อแผ่นเหลว

Kubota F. et al. (1995) ได้ศึกษากลไกที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจากกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายของธาตุหายาก (Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho, Y และ Er) กับสารสกัด 2-ethylhexylphosphoric acid mono-2-ethylhexyl ester ใน heptane โดยที่สารสกัดได้ถูกฝังลงในรูพรุนของชุดเส้นใยกลวง และได้ศึกษาผลของความเป็นกรดต่างของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัดต่ออัตราการซึมผ่าน พบว่าอัตราการซึมผ่านได้ถูกควบคุมโดยการแพร่ของสารเคมีทั้งในวัฏภาคของสารละลายป้อนและสารละลายเยื่อแผ่นและปฏิกิริยาเคมีที่ผิว

Milanova M. et al. (1993) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองในการสกัดแยกแลนทานัม (La) และนีโอดีเมียม (Nd) ระหว่าง liquid-liquid extraction (LLE) และ liquid membrane extraction (LME) บนพื้นฐานของพารามิเตอร์ของแลนทานัมและนีโอดีเมียมที่กำหนดขึ้นในการทำการทดลอง พบว่า LME ให้ความเข้มข้นของสารที่ทำการสกัดมากกว่า LLE ถึง 2 เท่า โดยพิจารณาในช่วงเวลาที่เท่ากันและเมื่อเทียบกับในขบวนการของ LME พบว่าสัดส่วนที่ได้มีค่าสูงกว่าที่คาดไว้จากการคำนวณทางทฤษฎีเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาถึงค่าคงที่สมดุลของการสกัดสำหรับขบวนการสกัดแลนทานัมที่แตกต่างกันทั้ง 2 ขบวนการพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน (LME 0.12 และ LLE 0.20) ที่คาดว่าควรคล้ายคลึงกันเพราะคุณสมบัติที่ใช้หาค่าสมดุลนี้

อาศัยธรรมชาติที่เหมือนกันทุกประการของขบวนการทางเคมี ดังนั้นค่าสมดุลควรจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับนีโอดีเมียมมีความแตกต่างกันน้อยมาก (LLE 0.78 และ LME 0.13) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวต่อขบวนการสกัดนีโอดีเมียมมีมาก นอกจากนี้สามารถสังเกตความแตกต่างระหว่าง LME ของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเนื่องมาจากการทำลายอิมัลชันบางส่วน (การเปลี่ยนแปลงการผลิตในปริมาตรของวัฏภาคอินทรีย์และวัฏภาคสเตรีย) และโดยส่วนใหญ่มาจากการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวสัมผัส การดูดซับจะรบกวนการซึมผ่านของแลนทานัมทั้งเข้าและออกจากวัฏภาคอินทรีย์ ผลของสารลดแรงตึงผิวขึ้นอยู่กับความสามารถของการดูดซับและธรรมชาติของ  $\text{Ln}^{3+}$  ผลของการหยุดของเยื่อเลือกผ่านดีกว่าของนีโอดีเมียม จากผลที่ได้นี้พบว่าการแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมเกิดระหว่างสภาวะสเตรียขบวนการ LME เป็นขั้นตอนควบคุมกลไกปฏิกิริยา เช่น การคัดเลือกของ LME เนื่องจากความแตกต่างทางจลนศาสตร์ของการลำเลียงที่ซับซ้อน ผลที่ได้ยืนยันสมมติฐานที่ว่าประสิทธิภาพของ LME ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิว LME เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายสำหรับแลนทานัมเข้มข้น

Moreno C. et al. (1993) ได้ทำการศึกษาถึงการลำเลียงไอออนบวกของ Pr(III) และ Nd(III) จากสารละลายในเตรต ในสายป้อนไปยัง 0.1 mol/l ของสารละลายกรดไนตริกในสายสเตรียผ่าน SLM ในแง่ของอัตราการกวน (stirring rate) และองค์ประกอบทางเคมีของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ประกอบด้วย di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid (DEHPA) ใน kerosene ซึ่งถูกยึดพุงอยู่บนรูพรุนของ di-fluoropolyethylene laminar support และยังได้มีการพิจารณาถึงวิธีการนำเยื่อแผ่นกลับมาใช้ใหม่พบว่าเฉพาะตัวยึดพุงที่ถูกทำให้อิ่มตัวเท่านั้นที่จะให้ผลการทดลองที่ดี จากการทำการทดลองพบว่าความสามารถในการซึมผ่านของโลหะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของตัวพา (DEHPA) มีค่ามากกว่า 0.1 mol/l แล้วหลังจากนั้นความสามารถในการซึมผ่านของโลหะแทบจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวพาเลย ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) กับ pH ของสายป้อนกระทำที่สภาวะความเข้มข้นของตัวพามีค่าต่ำ และค่า pH สูงสุดที่แสดงมีค่าประมาณ 3 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าตัวแปรการแยกผ่านเยื่อแผ่น (membrane separation factor) หรือ  $\alpha = P_{\text{Nd}}/P_{\text{Pr}}$  ที่ pH 2.7 และ 2.5 มีค่า 1.25 และ 1.5 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลของอัตราการกวน พบว่าความสามารถในการซึมผ่านของไอออนบวกของ Pr และ Nd มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในการกวนในการทดลองทั้ง 2 ที่เหมือนกันทุกประการเพิ่มขึ้น และความสามารถในการซึมผ่านของไอออนบวกของ Pr และ Nd จะไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการกวนเมื่อมีความเร็วในการกวนมากกว่า 1300-1500 รอบต่อนาที

Nopphakorn T. (1996) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการสกัดและการนำกลับโคบอลต์ในขั้นตอนเดียวกันจากสารละลายน้ำโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อระบบการสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนในช่วง 5000 ถึง 10000 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนในช่วงความเป็นกรด ชนิดของสารละลายสไตริปซึ่งใช้สารละลายกรดออกซาลิกและกรดเกลือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรในช่วง 100 ถึง 1000 มิลลิลิตรต่ออนาที สารละลายเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย D2EHPA เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายอินทรีย์สองชนิดคือ โทลูอีนและนอร์มัลโด้เคเคน ความเข้มข้นร้อยละ 10 ถึง 25 โดยปริมาตร

ผลการทดลองพบว่าสารละลายกรดออกซาลิก ไม่สามารถใช้เป็นสารละลายสไตริปได้ในระบบนี้ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กรดเกลือเป็นสารละลายสไตริป ไอออนโคบอลต์มากกว่าร้อยละ 50 ถูกสกัดและดึงกลับหลังจากการหมุนเวียนรอบที่สามของการดำเนินการลักษณะการไหลผ่านครั้งเดียว ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบกะโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายซึ่งการสกัดและการดึงกลับเกิดขึ้นแยกกัน แฟกเตอร์การสกัด (extraction factor) และแฟกเตอร์การดึงกลับ (recovery factor) เพิ่มมากกว่าสี่เท่า

Takeshi et al. (1995) ได้เสนอถึงกลไกของการลำเลียงแลนทานัมผ่าน SLM โดยที่เยื่อแผ่นที่ใช้ประกอบด้วย Teflon millipore membrane กับสารละลาย kerosene ของ di(2-ethylhexyl)phosphoric acid (HDEHP) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาที่เคลื่อนที่ได้ โดยแทรกอยู่ในช่องว่างของเยื่อแผ่นได้โดยอาศัยแรงแคปิลลารี สารละลายน้ำ 2 กลุ่มภายในเยื่อแผ่นเหลวสามารถแยกออกจากกันได้โดยอาศัยความแตกต่างของค่าความเป็นกรด-ด่าง ในที่นี้แลนทานัมจะถูกลำเลียงจากสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงไปยังสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำผ่านเยื่อแผ่นเหลว โดยที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นตามลำดับ มีการศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลของความเข้มข้นของ HDEHP ในสารละลายเยื่อแผ่นและศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและความเป็นกรด-ด่างในวัฏภาคน้ำต่ออัตราการซึมผ่านด้วย พบว่าอัตราการซึมผ่านลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวในวัฏภาคเยื่อแผ่นและมีความแตกต่างกันระหว่าง Span80 และ EDA436J อัตราการซึมผ่านของแลนทานัมสามารถอธิบายได้โดยอาศัยแบบจำลองของการซึมผ่านซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาการสกัดและปฏิกิริยาการสไตริปที่พื้นผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและขบวนการแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแลนทานัมกับ HDEHP ผ่านเยื่อแผ่น รวมทั้งขบวนการแพร่ผ่านของแลนทานัมผ่านชั้นฟิล์มบาง ๆ ของน้ำที่อยู่ติดกับเยื่อแผ่น

**ไพศาล อภินพวัฒน์ (1998)** งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการสกัดและการนำกลับธาตุโครเมียม (VI) ในรูปของโครเมตในสารละลาย โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง สารละลายเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย เมทิลไตรออกซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ เป็นสารสกัดละลายใน Kerosene และมีโดเดคานอลเป็นตัวประสาน ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมตในสารละลายป้อนเป็น 100 ส่วนในล้านส่วน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป

ผลการทดลองพบว่า ปฏิริยาการสกัดเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าปฏิริยาการนำกลับ การสกัดและการนำกลับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นในสารละลายป้อนต่ำลง หรืออัตราการไหลของสารละลายต่ำลง แต่จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของโครเมตในสารละลายป้อนมีค่าต่ำกว่า 60 ส่วนในล้านส่วน โดเดคานอลทำให้การสกัดและการนำกลับโครเมตดีขึ้นมาก โดยการใช้ความเข้มข้นไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อและไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวงไม่มีผลต่อการสกัดและนำกลับ

**วีรวัฒน์ ปัตทวิคองคา (1998)** ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ของกรดอะซิติกกับโซเดียมอะซิเตตที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนของสังกะสีโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเตรียมจาก D2EHPA ที่มีความเข้มข้นของสารสกัดไม่เกิน 10% โดยปริมาตรในตัวทำละลาย Kerosene Jet A-1 สารละลายป้อนเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสังกะสี 100 ส่วนในล้านส่วน และสารละลายสตริปเป็นสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ผลการศึกษาแสดงว่าความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ในกระบวนการโดยไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์จะให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงเมื่อความเข้มข้นเป็น 0.9% โดยปริมาตร ในกรณีที่ใช้สารละลายบัฟเฟอร์เข้าร่วมในกระบวนการเพื่อทำให้ได้ประสิทธิภาพเท่ากันจะใช้สารสกัดเข้มข้นเพียง 0.5% โดยปริมาตร สัดส่วนของสารละลายบัฟเฟอร์ต่อสารละลายป้อนที่เหมาะสมเท่ากับ 1:50 และอัตราการไหลสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับลดลง จากการศึกษาพบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมของระบบประมาณ 100 มิลลิเมตรต่อนาที

**อิศรา เกษมเศรษฐ (1998)** ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายที่เจือจางมาก โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวละลายอินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 25 โดยปริมาตร ชนิดของสารสกัดซึ่งได้แก่ สารสกัด D2EHPA สารสกัด LIX84-I และสารสกัด LIX860-I ความเข้มข้นไอออนทองแดงในสารละลายป้อนช่วง 1 ส่วนในหนึ่งล้านส่วนถึง 100 ส่วนในหนึ่งล้านส่วน รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวง การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์และการไหลเวียน (circulation) วัฏภาคสารละลายสไตริป สารละลายอินทรีย์ที่ใช้ ได้แก่ เคโรซีน (kerosene) โดยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายสไตริป

ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สารสกัดในกลุ่ม LIX สามารถถ่ายเทไอออนทองแดงได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อน และความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

จากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการสกัดแยกและนำกลับธาตุแบริลียมทั้งนีโอไดเมียม นั้น ล้วนแล้วแต่เป็นวิธีที่ให้ผลการทดลองที่ดีพอสมควร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เสนออีกทางเลือกหนึ่งในการสกัดแยกและนำกลับนีโอไดเมียมโดยอาศัยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดแยกเมื่อสารตั้งต้นมีความเข้มข้นต่ำจึงเหมาะสมกับการสกัดแยกนีโอไดเมียม เนื่องจากมีปริมาณต่ำในธรรมชาติ อีกทั้งยังมีศักยภาพในการพัฒนาประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้ด้วย



### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาระบบการสกัดแยกและการนำกลับน้ำไอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
- 2.2 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสกัดธาตุนีโอติเมียม โดยมีตัวแปรที่จะศึกษาดังต่อไปนี้คือ
  - 2.1.1 ความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อน
  - 2.1.2 ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน
  - 2.1.3 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายอินทรีย์
  - 2.1.4 ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริป
- 2.3 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกและนำกลับน้ำไอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1 ศึกษาการสกัดแยกและการนำกลับน้ำไอติเมียมไอออน โดยใช้สารสกัดได-2-เอทิลเฮกซิล ฟอสฟอริก ( di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid, D2EHPA ) ละลายในตัวทำละลายซึ่งใช้น้ำมันก๊าด (kerosene) เคลือบฝังเยื่อแผ่นเหลวที่ได้ ในรูปหลอดจลภาคของเส้นใยกลวง (microporous's hollow fiber) โดยเส้นใยกลวงดังกล่าวมีรูปหลอดจลภาคเป็นชนิดที่ไม่ชอบน้ำ โดยที่การปฏิบัติการเป็นแบบไหลผ่านครั้งเดียว (one through operation) ในการดำเนินการแบบสวนทางกัน (counter-current flow)
- 2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดแยกนีโอติเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ดังนี้
  - 2.1 ความเข้มข้นของสารละลายนีโอติเมียมไอออนอยู่ในช่วง 20 – 120 ส่วนในล้านส่วน (ppm)
  - 2.2 ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนอยู่ในช่วง 2 – 4
  - 2.3 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในเคโรซีนอยู่ในช่วง 3 – 20 % โดยปริมาตร
  - 2.4 ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปอยู่ในช่วง 0.01 – 0.5 โมลต่อลิตร

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาวิธีการสกัดแยกและการนำกลับน้ำไอดีเมียมนี้ เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากสินแร่แรเอิร์ทที่มีอยู่ในธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้
2. สามารถใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อลดปริมาณการนำเข้าน้ำไอดีเมียมจากต่างประเทศได้
3. สามารถทราบถึงข้อมูลการสกัดธาตุโลหะหายากด้วยเทคนิคต่าง ๆ
4. สามารถทราบถึงความสำคัญของน้ำไอดีเมียมในด้านที่เกี่ยวข้องกับพลังงานได้
5. สามารถทราบถึงวิธีการสกัดน้ำไอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
6. สามารถทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดน้ำไอดีเมียมโดยใช้เทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
7. สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำไอดีเมียมด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
8. สามารถนำเทคนิคการสกัดนี้ไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

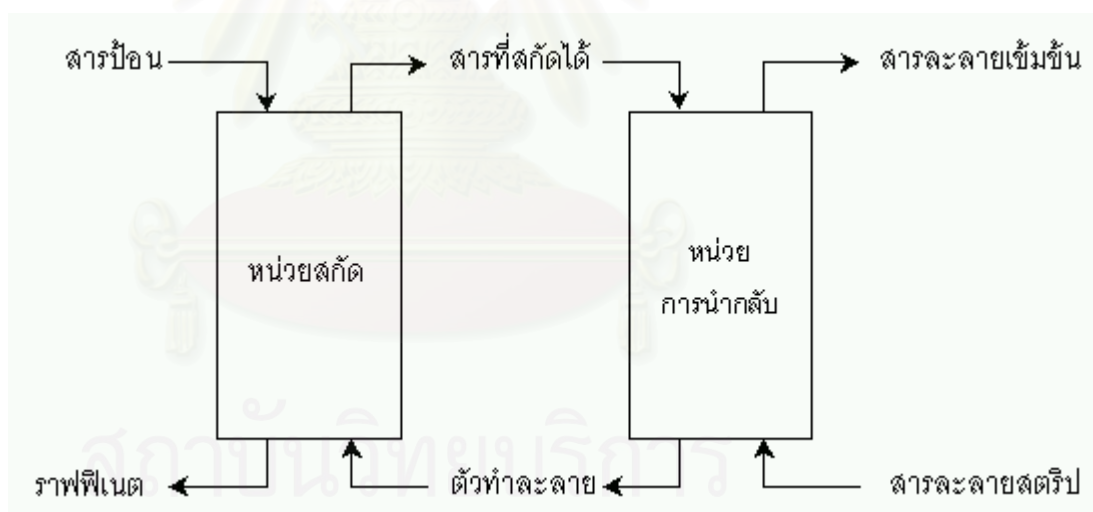
การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องที่มีทฤษฎีพื้นฐานรองรับมาเป็นเวลานานแล้ว การถ่ายเทไอออนโลหะในกระบวนการนี้ ขึ้นกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและผันกลับได้ ดังนั้นจึงสามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขทางเคมี (chemical condition) การปรับปรุงกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยเน้นไปที่การผลิตสารสกัดใหม่ๆ ทำให้กระบวนการนี้ได้รับความสนใจมากขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดหลายๆประการของกระบวนการนี้ เช่น ประสิทธิภาพของการสกัดถูกจำกัดโดยค่าสัดส่วนระหว่างสารละลายป้อนกับตัวทำละลาย (feed to strip ratio) และค่าสัดส่วนการกระจาย (distribution ratio) ของตัวถูกละลายระหว่างวัฏภาคต่างๆ นอกจากนั้นกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบพื้นฐานยังต้องใช้ตัวทำละลายเป็นปริมาณมาก เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวจึงถูกนำเสนอขึ้นเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ของการสกัดด้วยตัวทำละลาย ในการคัดเลือกสกัดและเพิ่มความเข้มข้นกับสารละลายของน้ำของไอออนโลหะที่เจือจาง (Tavlarides : 1987) เนื่องจากเทคนิคการใช้เยื่อแผ่นเหลวเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงในการแยกสารและโลหะ และยังช่วยลดปริมาณการใช้ ตัวทำละลายได้อย่างมาก

ปัจจุบัน เทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลวได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นมาก ทั้งนี้เนื่องจากศักยภาพที่ดีในกระบวนการแยกและเพิ่มความเข้มข้นให้กับสารละลายที่ต้องการ นอกจากนั้นยังแสดงให้เห็นว่าเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น การนำกลับมาใช้ใหม่ การกำจัดสารพิษ และการแยกทางชีวภาพ เป็นต้น การสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวเป็นกระบวนการถ่ายเทตัวถูกละลายจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายสตริป (strip) โดยมีกลไกการสกัดและการสตริปเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ดังนั้นโดยหลักการ กระบวนการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลว คือกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายที่มีกลไกการสกัดและสตริปเกิดขึ้นพร้อมๆ กันนั่นเอง (G.Schulz : 1988)

เทคนิคการสกัดแยกโลหะได้รับความสนใจศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง โดยในแต่ละเทคนิคการสกัดต่างก็มีทั้งข้อดี และข้อเสียอยู่ในตัวอีกทั้งยังได้รับการพัฒนาอย่างเป็นลำดับและต่อเนื่อง โดยที่เทคนิคการสกัดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายและเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งในแต่ละเทคนิคการสกัดมีรายละเอียดดังนี้

## 2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

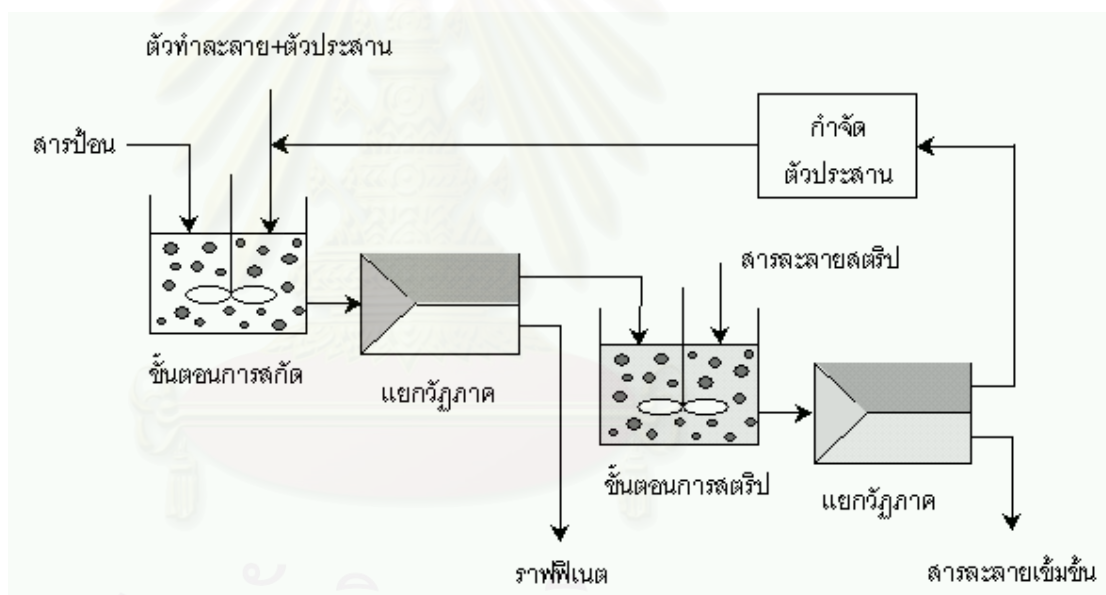
การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นเทคนิคการสกัดพื้นฐานที่อาศัยความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้แตกต่างกันหรือเกิดปฏิกิริยาเป็นกลไกในการแยกการสกัดซึ่งเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายนี้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้มากในทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการสกัดแยกไอออนโลหะ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการปฏิบัติการ และไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีกำลังการผลิตสูง โดยกระบวนการประกอบไปด้วยขั้นตอนการปฏิบัติการอย่างน้อย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการสกัดและ ขั้นตอนการนำกลับ (Tavlarides, Bae and Lee, 1987) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2-1 แสดงขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ ในการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย

จากรูปที่ 2-1 เป็นลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย ซึ่งแสดงขั้นตอนต่างๆของกระบวนการ ขั้นตอนการสกัดเริ่มด้วยวัฏภาคของสารป้อน (Feed) ซึ่งเข้มข้นไปด้วยไอออนของตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดถูกป้อนเข้าสู่หน่วยสกัด วัฏภาคของสารป้อนจะสัมผัสกับวัฏภาคของตัวทำละลาย (Solvent) ซึ่งเป็นวัฏภาคที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน ในสัดส่วนที่

เหมาะสมเกิดการถ่ายโอนมวลของตัวถูกละลายอันเนื่องมาจากความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้แตกต่างกันของสารหรือเกิดปฏิกิริยา สกัดผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งเป็นพื้นที่การถ่ายโอนมวลข้ามวัฏภาคและเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดด้วยการเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวลด้วยเทคนิคต่างๆ จนกระทั่งตัวทำละลายอิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลาย และถูกแยกออกจากสารป้อนซึ่งมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายลดต่ำลง (Raffinate) โดยตัวทำละลายที่อิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลาย (Extract) จะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยการนำกลับ และเกิดการถ่ายโอนมวลของตัวถูกละลายออกจากวัฏภาคของของตัวทำละลายผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสเช่นเดียวกันกับขั้นตอนการสกัดไปสู่สารละลายstripping (Stripping solution) โดยตัวทำละลายที่ผ่านการนำกลับซึ่งถูกstrippingสารที่ต้องการออกไปแล้วจะถูกป้อนไหลเวียนกลับเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดเพื่อนำกลับไปใช้ต่อไป โดยกระบวนการโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 แสดงขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชัน

จากรูปที่ 2-2 เป็นกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชันชนิด W/O ซึ่งมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลาย (Aqueous Phase) กระบวนการเริ่มต้นโดยสารป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดผสมกับตัวทำละลายซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ (Organic Phase) ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันในถังปฏิกรณ์การสกัดภายในถังปฏิกรณ์วัฏภาคทั้งสองจะถูกตีควมเป็นอิมัลชัน ซึ่งเป็นหยดของสารป้อนที่มีขนาดเล็กๆ โดยมีวัฏภาคของสารอินทรีย์ห่อหุ้มหยดของสารป้อนที่มีขนาดเล็ก ๆ นั้นเอาไว้ พื้นที่ผิวสัมผัสของวัฏภาค

ทั้งสองที่สัมผัสกันรอบเม็ดอิมัลชันจะเป็นพื้นที่ในการถ่ายโอนมวล ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวทรงกลมของหยดอิมัลชันนั่นเอง ตัวถูกละลายในสารป้อนจะเกิดการถ่ายโอนมวลสกัดผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสองที่เกิดขึ้นรอบอิมัลชัน จนกระทั่งวัฏภาคของสารอินทรีย์ที่อิมัลชันไปด้วยตัวถูกละลาย จากนั้นวัฏภาคทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันโดยที่วัฏภาคของสารอินทรีย์ที่อิมัลชันไปด้วยตัวถูกละลายนั้น จะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการนำกลับผสมกับสารละลายสตรีปซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันในถังปฏิกรณ์การนำกลับ ภายในถังปฏิกรณ์วัฏภาคทั้งสองจะถูกตีคววนให้เกิดอิมัลชันและเกิดการถ่ายโอนมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคสารอินทรีย์ ไปสู่วัฏภาคของสารละลายสตรีปจนกระทั่งวัฏภาคของสารละลายสตรีปที่อิมัลชันไปด้วยตัวถูกละลาย จากนั้นวัฏภาคของสารละลายสตรีปที่เข้มข้นไปด้วยตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากวัฏภาคของสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายเจือจางลง โดยที่วัฏภาคของสารอินทรีย์จะถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการกำจัดตัวประสานและส่งกลับเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดเพื่อนำกลับไปที่ใหม่ต่อไป

จากกระบวนการข้างต้นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีความสำคัญต่อการถ่ายโอนมวลอย่างมาก ดังนั้นเสถียรภาพของอิมัลชันจึงถูกควบคุมไว้ด้วยสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้ง่ายต่อการเป็นอิมัลชันและเกิดการถ่ายโอนมวลผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคจนอิมัลชัน โดยในกระบวนการวัฏภาคของสารอินทรีย์จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องมีวัฏภาคภายในเป็นสารละลาย (W/O) ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) ในทางกลับกันหากกระบวนการมีวัฏภาคของสารละลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) (Plucinski and Nitsh : 1988 , Loiacono et al : 1986)

แม้ว่าสารลดแรงตึงผิวจะมีบทบาทสำคัญต่อการรักษาเสถียรภาพของการเกิดอิมัลชัน โดยการเกิดเป็นอิมัลชันจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคอันมากมายรอบหยดอิมัลชันที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นพื้นที่ในการถ่ายโอนมวล แต่สารลดแรงตึงผิวที่ผสมผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคให้อิมัลชันมีเสถียรภาพอยู่ได้นั้น จะก่อตัวกลายเป็นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายโอนมวลข้ามวัฏภาค อีกทั้งในขั้นตอนการแยกวัฏภาคออกจากกัน และขั้นตอนการบำบัดสารอินทรีย์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ก็ยังคงมีความยุ่งยากในการปฏิบัติ ซึ่งวิธีการดำเนินการโดยทั่วไปมีวิธีการบำบัดอยู่ 2 วิธี คือ วิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี ซึ่งวิธีทางเคมีสามารถกระทำได้โดยเติมสารลดการประสาน (Demulsifier) สามารถลดการประสานได้ดีแต่สารเคมีในกระบวนการจะมีคุณสมบัติที่ด้อยคุณภาพลงทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนวิธีทางกายภาพเป็นการบำบัดด้วย

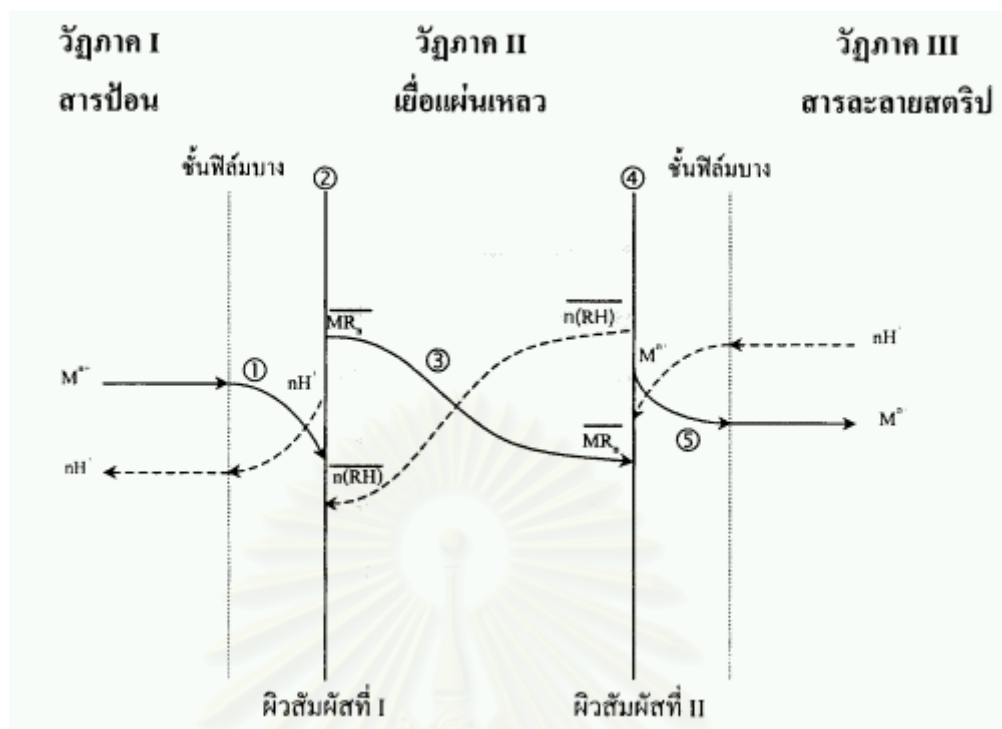
กระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง วิธีการบำบัดด้วยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนี้จะให้ผลในการบำบัดที่ดีมาก สามารถแยกวัฏภาคและทำลายโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวได้ดี อีกทั้งสารเคมีในกระบวนการก็มีคุณภาพด้อยลงเพียงเล็กน้อย แต่อุปกรณ์ที่ใช้มีความยุ่งยากซับซ้อน มีอันตรายสูง อีกทั้งยังมีราคาสูงอีกด้วย

จะเห็นว่ากระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายถึงแม้จะเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการปฏิบัติแล้วยังพบว่ากระบวนการมีกำลังการผลิตสูงซึ่งเหมาะสมในการพัฒนาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม แต่ก็มีข้อด้อยอยู่เช่นกันก็คือ กระบวนการมีหลายขั้นตอนทำให้มีประสิทธิภาพในการสกัดถูกจำกัดไว้ด้วยสมดุลระหว่างวัฏภาคที่ผิวสัมผัส โดยมากแล้วกระบวนการจะมีประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก และยังมีคุณสมบัติในการเลือกสกัดต่ำ อีกทั้งยังใช้สารเคมีและพลังงานในปริมาณสูงอีกด้วย (Rautenbach and Machhammer : 1988 , Sengupta, Basu and Sirka : 1988)

กลไกการถ่ายโอนมวลของเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายได้ถูกจำกัดไว้ด้วยสมดุลระหว่างวัฏภาคที่สัมผัส ได้ถูกพัฒนาขยายขีดจำกัดในการถ่ายโอนมวลให้เกิดกลไกการสกัดอย่างต่อเนื่องเพื่อให้การสกัดเกิดขึ้นตามกลไกตลอดเวลา จึงเป็นจุดเริ่มของการรวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับจากเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายไปสู่เทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลว

## 2.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane)

เทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเป็นเทคนิคการสกัดที่พัฒนามาจากการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยรวมขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับเป็นขั้นตอนเดียวกันเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งในวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะมีสารสกัดผสมอยู่ในสารละลายอินทรีย์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการเลือกสกัด เมื่อสารป้อนเป็นสารละลายที่มีหลายองค์ประกอบ (Yang, Guha and Sirkar : 1996 , Saito : 1994 , Schuz : 1998) โดยกลไกการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



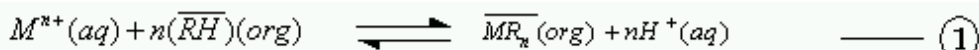
รูปที่ 2-3 แสดงกลไกการสั้ดแยกไอออนโลหะโดยเยื่อแผ่นเหลว

จากรูปที่ 2-3 แสดงกลไกการสั้ดแยกไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลว มีขั้นตอนการเกิดกลไก 5 ขั้นตอน นั้นคือ

(1) ไอออนโลหะจากกระแสการไหลในภูมิภาคของสารป้อนแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบาง ไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของสารป้อนกับภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะ (Concentration Gradient) ไปสู่บริเวณผิวสัมผัสที่ I

(2) ไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสที่ I จะเกิดการปฏิกิริยาการสั้ด เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสั้ดกับไอออนโลหะ ( $MR_n$ ) และไฮโดรเนียมไอออน ( $nH^+$ ) ปฏิกิริยาการสั้ด ที่บริเวณผิวสัมผัสที่ I (Interface I) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ I





โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสัปดาห์ดำเนินไปข้างหน้าเท่ากับ

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

และสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสัปดาห์ดำเนินย้อนกลับเท่ากับ

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

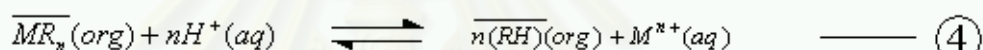
โดยที่  $\overline{RH}$  = สารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์

$k_{1ex}$  = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสัปดาห์ไปข้างหน้า

$k_{2ex}$  = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสัปดาห์ย้อนกลับ

③ สารประกอบเชิงซ้อนของสารสกัดกับไอออนโลหะ ( $\overline{MR}_n$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาบริเวณผิวสัมผัสที่ I จะแพร่ผ่านชั้นความหนาของเยื่อแผ่นเหลวชั้นเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน (Concentration Gradient) ไปสู่บริเวณผิวสัมผัสที่ II

④ สารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวสัมผัสที่ II จะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับทำให้ไอออนโลหะถูกสัปดาห์ออกมาที่ผิวสัมผัสที่ II ดังสมการ



โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับดำเนินไปข้างหน้าเท่ากับ

$$r_{re,forward} = k_{1re} [\overline{MR}_n] [H^+]^n \quad \text{--- ⑤}$$

และสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับดำเนินย้อนกลับเท่ากับ

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

โดยที่

$k_{1re}$  = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับไปข้างหน้า

$k_{2re}$  = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับย้อนกลับ

° ไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสที่ II จะแพร่ออกจากบริเวณผิวสัมผัสที่ II ผ่านชั้นฟิล์มบางไปสู่กระแสของสารละลายสัปดาห์ด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะ (Concentration Gradient) ที่ถูกสัปดาห์ออกมา

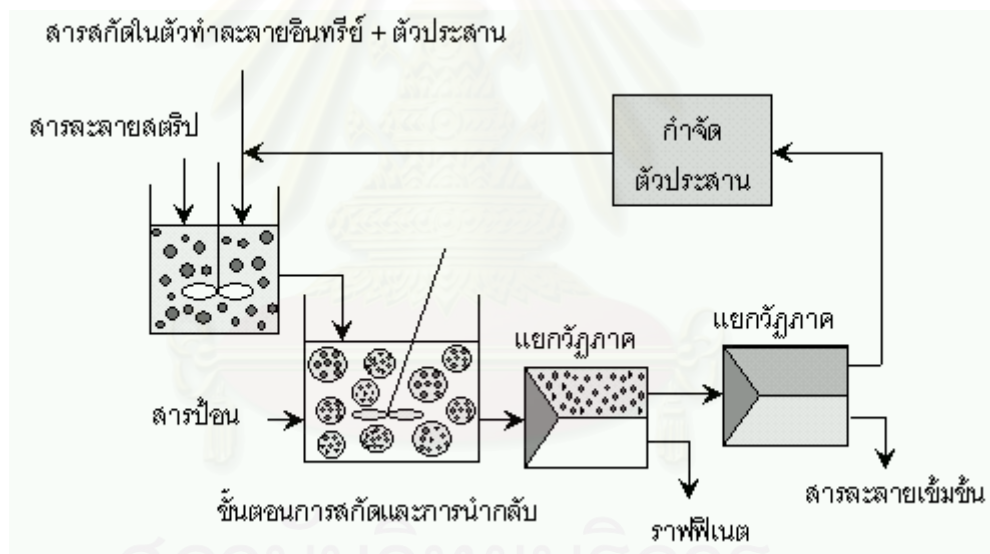
จากกลไกข้างต้นเมื่อไอออนเชิงซ้อนของสารสกัดกับไอออนโลหะบริเวณผิวสัมผัสที่ II เกิดปฏิกิริยาการนำกลับ ทำให้ไอออนโลหะถูกสตริปด้วยไฮโดรเนียมไอออนออกจากวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวแล้ว จะเกิดการสกัดกลับคืนสู่วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งสารสกัดจะแพรย้อนกลับจากบริเวณผิวสัมผัสที่ I ไปสู่ผิวสัมผัสที่ II ดังเดิมด้วยแรงขับของความแตกต่างของความเข้มข้นของสารสกัดนั้น และเกิดปรากฏการณ์เดิมซ้ำไปด้วยแรงขับของความแตกต่างของความเป็นกรด-ด่าง (pH Gradient) ซึ่งเป็นภาวะ ของกระบวนการและความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิดคือ เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane, (ELM) หรือ Liquid Surfactant Membrane), เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพองไว้ (Supported Liquid Membrane, (SLM) หรือ Immobilized Liquid Membrane) และเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane, ESPLIM) โดยเยื่อแผ่นเหลวทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะรายละเอียดโดยทั่วไปดังนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

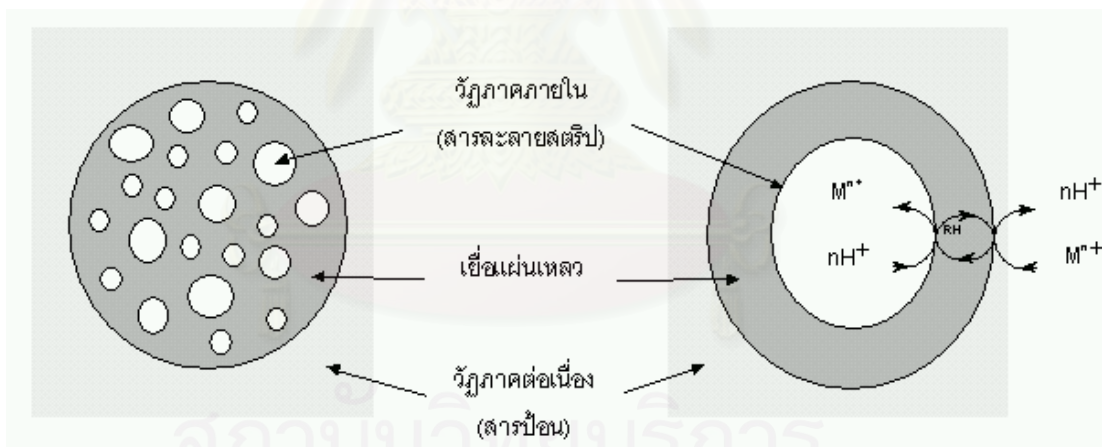
เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน หรือ Liquid Surfactant Membrane หรือ Mobilized Liquid Membrane เป็นเยื่อแผ่นเหลวที่มีลักษณะการปฏิบัติการเช่นเดียวกันกับการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดอิมัลชันแต่รวมขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับไว้เป็นขั้นตอนเดียวกัน ทำให้เกิดอิมัลชันซ้อน (Double Emulsion) จึงเกิดการสกัดและการนำกลับในขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งลดขั้นตอนการปฏิบัติการ และทำให้กระบวนการสกัดแยกมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Draxler, Furst and Marr : 1988) โดยระบบจะประกอบไปด้วย 3 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคของสารป้อน ซึ่งเป็นสารละลายที่เข้มข้นไปด้วยองค์ประกอบของสารที่ต้องการสกัด, ภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากการผสมระหว่างสารสกัดกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมและภูมิภาคของสารละลายสไตริปเป็นภูมิภาคของสารละลายที่ใช้สไตริปองค์ประกอบที่ต้องการสกัดออกจากเยื่อแผ่นเหลว โดยขั้นตอนการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันแสดงได้ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 แสดงขั้นตอนการสกัดแยกโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน

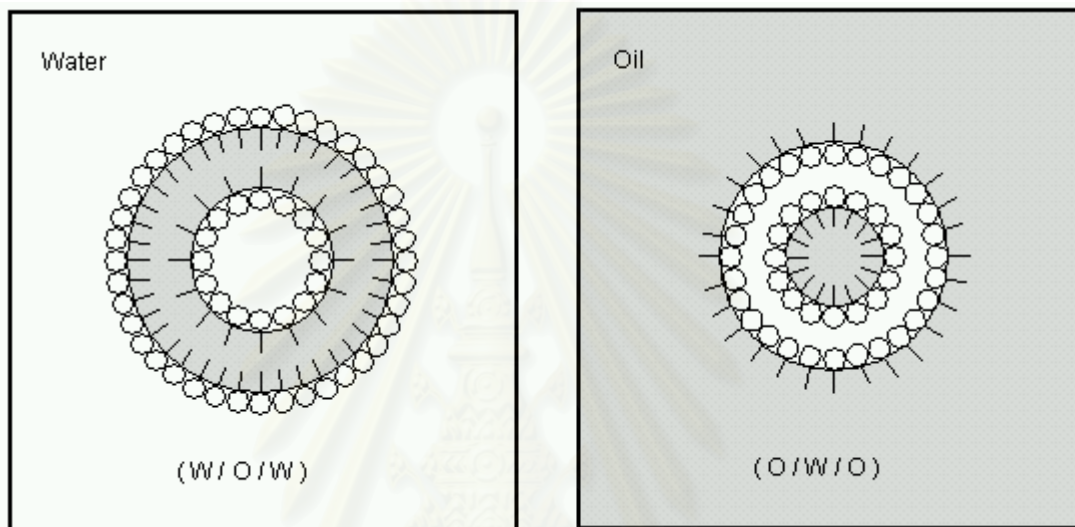
จากรูปที่ 2-4 เป็นกระบวนการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันแบบ W/O/W นั่นคือมีภูมิภาคภายในเป็นภูมิภาคของสารละลายโดยมีภูมิภาคของสารอินทรีย์เป็นภูมิภาคต่อเนื่อง ขั้นตอนการสกัดเริ่มด้วยป้อนสารละลายสไตริปผสมกับสารอินทรีย์ ซึ่งภูมิภาคทั้งสองชนิดไม่ละลายซึ่งกันและกัน ดีกว่าให้เกิดอิมัลชัน และเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันด้วยสารลดแรงตึงผิว

(Surfactant) (Nakashio : 1993 , Jianhan : 1987) จากนั้นจะป้อนกลุ่มอิมัลชันที่ได้ผสมกับสารป้อนและตีความเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวลเกิดการสกัดและการนำกลับพร้อมๆ กันตามกลไกการสกัดซึ่งจากการปั่นกวนเยื่อแผ่นเหลวให้เป็นอิมัลชัน ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีการเคลื่อนตัวตลอดเวลาจึงเป็นเหตุให้เรียกวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวว่าเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และในขบวนการสกัดจำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อรักษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นจึงสามารถเรียกการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันได้เป็น Mobilized Liquid Membrane และ Surfactant Membrane ตามลำดับนั่นเอง (Nakashio : 1993 , Jianhan : 1987) จากนั้นกลุ่มอิมัลชันเมื่อเกิดการสกัดและการนำกลับตามกลไกการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแล้ว จะถูกป้อนเข้าสู่ถังแยกวัฏภาคเพื่อแยกวัฏภาคของสารป้อนที่ถูกสกัดองค์ประกอบที่ต้องการสกัดออกไปแล้วซึ่งเรียกว่าราฟฟิเนตออกและแยกวัฏภาคของสารอินทรีย์ที่เป็นกลุ่มของอิมัลชันของสารละลายสตริปซึ่งเข้มข้นไปด้วยองค์ประกอบที่ต้องการสกัดป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน เพื่อแยกสารละลายสตริปซึ่งเข้มข้นไปด้วยองค์ประกอบที่ต้องการสกัดแยกออกจากสารอินทรีย์และป้อนกลับสารอินทรีย์กลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการต่อไป (Nakashio : 1993 , Draxler : 1988 , Jianhan : 1987) ในขั้นตอนการสกัดและการนำกลับลักษณะการเกิดอิมัลชันชั้นซ้อนแสดงได้ดังรูป 2-5



รูปที่ 2-5 แสดงลักษณะของอิมัลชันชั้นซ้อน (Double Emulsion) และกลไกการถ่ายโอนมวลในอิมัลชันชั้นซ้อน

จากรูปที่ 2-5 ลักษณะของอิมัลชันจะเป็นหยดเล็กๆ ของวัฏภาคภายใน (Internal Phase) ซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายและถูกห่อหุ้มไว้โดยเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ (W/O) ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน โดยมีสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่ชอบน้ำผานพื้นที่ผิวระหว่างให้อิมัลชันมีเสถียรภาพและป้องกันกลุ่มของอิมัลชันนี้ลงในวัฏภาคของสารป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลาย โดยที่กลุ่มอิมัลชันจะถูกห่อหุ้มไว้ด้วยสารละลาย (O/W) และมีสารลดแรงตึงผิวชนิดชอบน้ำผานผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทำให้เกิดเสถียรภาพของอิมัลชันไว้เกิดเป็นอิมัลชันชั้นนั่นเอง โดยลักษณะการใช้ตัวประสาน ในการรักษาเสถียรภาพของเม็ดอิมัลชันแสดงได้ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 แสดงลักษณะการใช้ตัวประสานในขบวนการเกิดอิมัลชันชั้นแบบ W/O/W และ O/W/O

จากรูปที่ 2-6 ลักษณะการเกิดอิมัลชันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด (Ho and Li : 1992) คือ ชนิดที่วัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลาย โดยมีวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ที่ห่อหุ้มเอาไว้ (Water in Oil, (W/O) Emulsion) และถูกทำให้กระจายตัวในสารป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายน้ำ ซึ่งจะถูกห่อหุ้มกลุ่มของอิมัลชันอีกลำดับหนึ่งเกิดเป็นอิมัลชันชั้น ดังนั้นระบบการสกัดจะมีการเรียงลำดับของวัฏภาคเป็น Water-Oil-Water (W/O/W) โดยมีขั้นตอนการสกัดและลักษณะการเกิดอิมัลชันชั้นดังรูปที่ 2-4 และ 2-6 ตามลำดับ

อิมัลชันชั้นชนิดที่สอง เป็นชนิดที่วัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ (O/W) ดังนั้นกระบวนการจะมีการเรียงลำดับของวัฏภาคเป็น Oil-Water-Oil (O/W/O) และสารลดแรงตึงผิวซึ่งเป็นตัวประสานเพื่อรักษาเสถียรภาพอิมัลชันจึงมีด้วยกัน 2 ชนิดเช่นเดียวกัน คือ ชนิดที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) สำหรับอิมัลชันชนิด O/W และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) สำหรับอิมัลชันชนิด W/O โดยกระบวนการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันจะมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงนั่นเอง แต่โดยทั่วไปแล้วการคงรูปเป็นอิมัลชันของกระบวนการจะมีเสถียรภาพต่ำ ดังนั้นในกระบวนการจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อรักษาเสถียรภาพของการเกิดอิมัลชันเอาไว้ (Balies et al. : 1976)

ถึงแม้ว่าในกระบวนการการสกัดสารลดแรงตึงผิวหรือ ตัวประสานจะช่วยรักษาเสถียรภาพของหยดวัฏภาคต่างๆ ให้คงรูปอยู่เป็นอิมัลชันไว้ แต่พบว่าสารลดแรงตึงผิวหรือตัวประสานที่ใช้ จะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของหยดอิมัลชันโดยรอบดังรูปที่ 2-6 ซึ่งชั้นฟิล์มที่เกิดจากตัวประสานดังกล่าวนี้จะขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวล ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลต่ำ ถึงแม้ว่าสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรจะมีค่าสูงมากก็ตาม อีกทั้งขั้นตอนการแยกวัฏภาคออกจากกันกระทำได้ยาก ซึ่งต้องใช้วิธีการกำจัดตัวประสาน (Demulsifier) โดยการกำจัดสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรก กำจัดตัวประสานด้วยวิธีทางเคมีสามารถกระทำโดยเติมสารลดการประสานซึ่งวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงแต่ทำให้คุณสมบัติของของเหลวในระบบเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีคุณภาพต่ำลงและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ วิธีที่สองกำจัดตัวประสานด้วยวิธีทางกายภาพโดยการใช้ประจุไฟฟ้าความต่างศักย์สูงซึ่งวิธีนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างดี คุณสมบัติของของเหลวเปลี่ยนแปลงน้อย แต่อุปกรณ์มีความยุ่งยากซับซ้อน อุปกรณ์มีราคาสูง อีกทั้งยังมีอันตรายสูงอีกด้วย (Mark : 1990) ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวในการรักษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวจึงพัฒนากระบวนการสกัดให้วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวถูกยึดตรึงไว้ ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงขึ้นนั่นเอง

## 2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่ถูกพยุงบนตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นวัฏภาคที่ไม่เคลื่อนที่ และจะถูกยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับ ดังนั้นจึงสามารถเรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้อีกว่า Immobilized Liquid Membrane (Schulz : 1988) ซึ่งการยึดติดตรึงโดยเยื่อแผ่นเหลวไว้ในรูพรุนจุลภาคนี้เพื่อที่จะให้เยื่อแผ่นเหลวไม่มีการเคลื่อนที่ ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพมากขึ้นเป็นเหตุให้สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสานซึ่งเป็นปัญหาของกระบวนการสกัด (Fernandez et al. : 1987) โดยรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับที่มีไว้สำหรับยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวนั้นโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic microporous) ซึ่งเป็นรูพรุนจุลภาคที่ยอมให้เฉพาะวัฏภาคของสารละลายเท่านั้น เคลื่อนผ่านหรือฝังยึดอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคได้ และรูพรุนจุลภาคอีกชนิดหนึ่งเป็นรูพรุนภาคที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic microporous) เป็นรูพรุนจุลภาคที่ยอมให้เฉพาะวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เท่านั้นเคลื่อนผ่านหรือฝังยึดอยู่ภายในรูพรุนได้

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

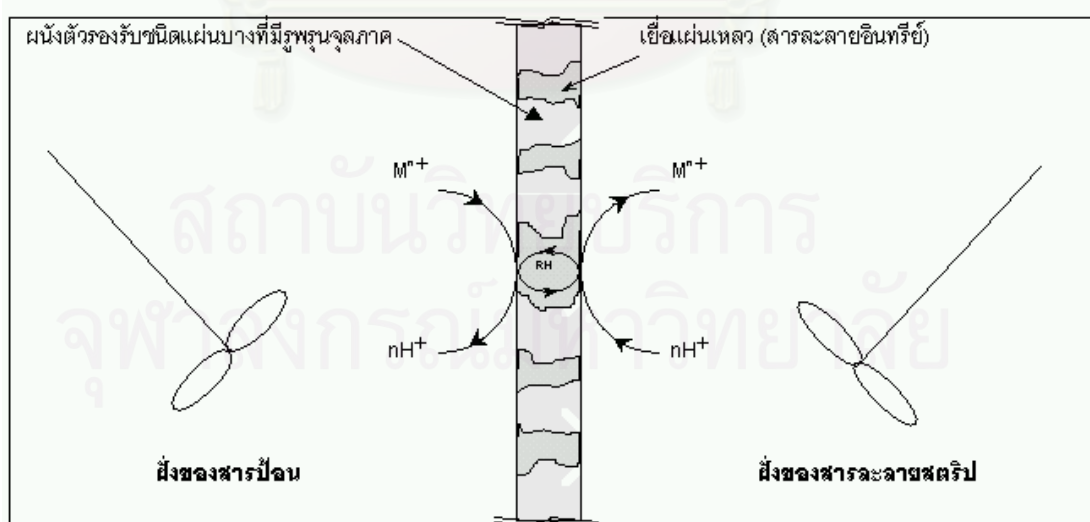
### (1) ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat Sheet)

ตัวรองรับชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ความพรุน (Porosity) สูง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทโพลีเมอร์ อาทิเช่น โพลีโพรพิลีน (PP), โพลีซัลโฟลน (PF), โพลีเตตระฟลูออโรเอท-ทิลีน (PTFE) เป็นต้น โดยลักษณะของรูพรุนจุลภาคดังรูปที่ 2-7



**รูปที่ 2-7** แสดงรูพรุนจุลภาคของตัวกรองชนิดแผ่นบางที่ทำจาก PTFE

จากรูปที่ 2-7 รูพรุนจุลภาคซึ่งเป็นโครงสร้างของตัวกรองชนิดแผ่นบางนี้ จะเป็นแหล่งรองรับและยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวไว้ด้วยสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน (Electro Affinity), แรงแคปิลลารี (Capillary Force) และชนิดของรูพรุน (Hydrophilic or Hydrophobic Microporous) ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิต (Schulz : 1988 , Huang and Juang : 1987) โดยแผ่นตัวกรองซึ่งยึดพุงเยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างภูมิภาคของสารป้อนและภูมิภาคของสารละลายสตรีป เกิดการสกัดตามกลไกการสกัดดังรูปที่ 2-8



**รูปที่ 2-8** แสดงกลไกการสกัดของกระบวนการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวกรองชนิดแผ่นบาง

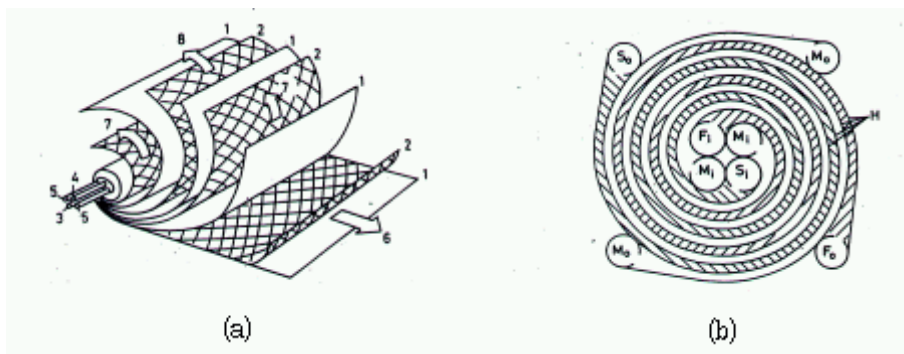


จากรูปที่ 2-8 เป็นกลไกการสกัดของกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางโดยที่เยื่อแผ่นเหลวเป็นวัสดุของสารอินทรีย์ ในกระบวนการประกอบไปด้วย 3 วัสดุนั้นคือวัสดุของสารป้อนซึ่งเป็นวัสดุของสารละลาย, วัสดุของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัสดุของสารอินทรีย์ และวัสดุของสารละลายสตริปซึ่งเป็นวัสดุของสารละลายโดยมีแผ่นตัวรองรับที่มีความพรุนสูงกั้นกลางระหว่างวัสดุของสารป้อนกับวัสดุของสารละลายสตริป รูพรุนจุลภาคของตัวรองรับจะเป็นแหล่งยึดพองเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัสดุของสารอินทรีย์ โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุที่เกิดขึ้นทั้งในฝั่งของสารป้อนกับฝั่งของสารละลายสตริปที่สัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวจะเกิดการถ่ายโอนมวลตามกลไกการสกัดและเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดจากการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลด้วยการปั่นกววนวัสดุของสารป้อน และวัสดุของสารละลายสตริป

จากกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจะถูกยึดพองไว้ในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน อีกทั้งยังสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสานซึ่งขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัดและยากต่อการบำบัดอีกด้วย ถึงแม้ว่ากระบวนการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางจะมีข้อดีอยู่หลายประการ แต่ก็ยังพบว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการอาทิเช่น มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่ำกว่าเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันหลายเท่า มีความยุ่งยากในการเตรียม และเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวมีขอบเขตจำกัดเช่นกัน

## (2) ตัวรองรับชนิดเกลียววน (Spiral-Wound Module)

ตัวรองรับชนิดเกลียววนเป็นตัวรองรับที่พัฒนามาจากตัวรองรับชนิดแผ่นบาง โดยการม้วนห่อตัวรองรับชนิดแผ่นบางเป็นเกลียววน เพื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรให้สูงขึ้น และลดการตีควนโดยเปลี่ยนทิศทางของของไหลของสารละลายให้ไหลขนานไปกับผิวสัมผัสของตัวรองรับ ซึ่งทำให้แรงจากการไหลของของไหลไม่ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น (Teramoto et al. : 1987 , Schulz : 1988) ลักษณะของตัวรองรับชนิดเกลียววนและลักษณะการไหลของวัสดุต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะของตัวรองรับชนิดเกลียววนและแสดงการแบ่งชั้นการไหลของวัสดุต่าง ๆ โดยที่

- (a) เป็นรูปแสดงการม้วนห่อตัวรองรับ 1.คือตัวรองรับแบบแผ่นบางที่มีรูปทรงจุลภาค, 2.คือตะแกรงกั้น, 3.ท่อของสารป้อนไหลเข้า, 4.ท่อของสารละลายสไตริปไหลเข้า, 5.ท่อของเยื่อแผ่นเหลวไหลเข้า, 6.ทิศทางการไหลของสารป้อน, 7.ทิศทางการไหลของเยื่อแผ่นเหลว, 8.ทิศทางการไหลของสารละลายสไตริป และ
- (b) เป็นรูปแสดงภาพตัดขวางแสดงชั้นของวัสดุต่าง ๆ โดยที่

	คือชั้นของสารป้อน
	คือชั้นของสารละลายสไตริป
	คือชั้นของเยื่อแผ่นเหลว

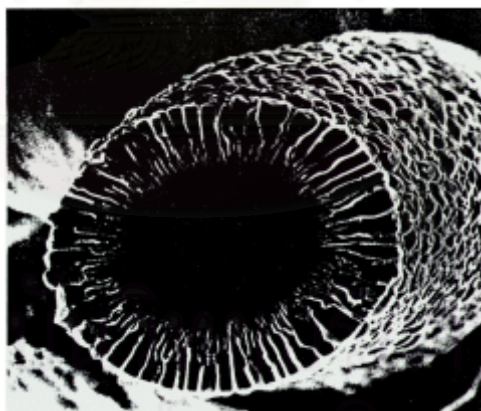
เมื่อ Fi คือท่อของสารป้อนไหลเข้า, Si คือท่อของสารละลายสไตริปไหลเข้า, Mi คือท่อของเยื่อแผ่นเหลวไหลเข้า, Fo คือท่อของสารป้อนไหลออก, So คือท่อของสารละลายสไตริปไหลออก และ Mo คือท่อของเยื่อแผ่นเหลวไหลออก

จากรูปที่ 2-9 การเรียงและม้วนห่อตัวรองรับเป็นเกลียววนนอกจากจะทำให้ความยาวของตัวรองรับเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวลแล้ว ยังสามารถเรียงซ้อนตัวรองรับเป็นชั้นๆ โดยการเรียงสลับกันเพื่อแบ่งชั้นวัสดุต่าง ๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนเซลล์ในการสกัด ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย (Teramoto et al. : 1987) ถึงแม้ว่ากระบวนการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเกลียววนนอกจากจะมีเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวได้ดีกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวได้รับการพองไว้และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวและมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงกว่าเยื่อ

แผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางก็ตามยังพบว่ากระบวนการสกัดแยกโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเกลียววนก็ยังมีข้อด้อยอีกหลายประการ อาทิเช่น มีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรต่ำกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันมาก การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวมีความยุ่งยากซับซ้อนและตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวได้ยากกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบางอีกทั้งเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวก็มีอายุการใช้งานจำกัดเช่นเดียวกันกับเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง

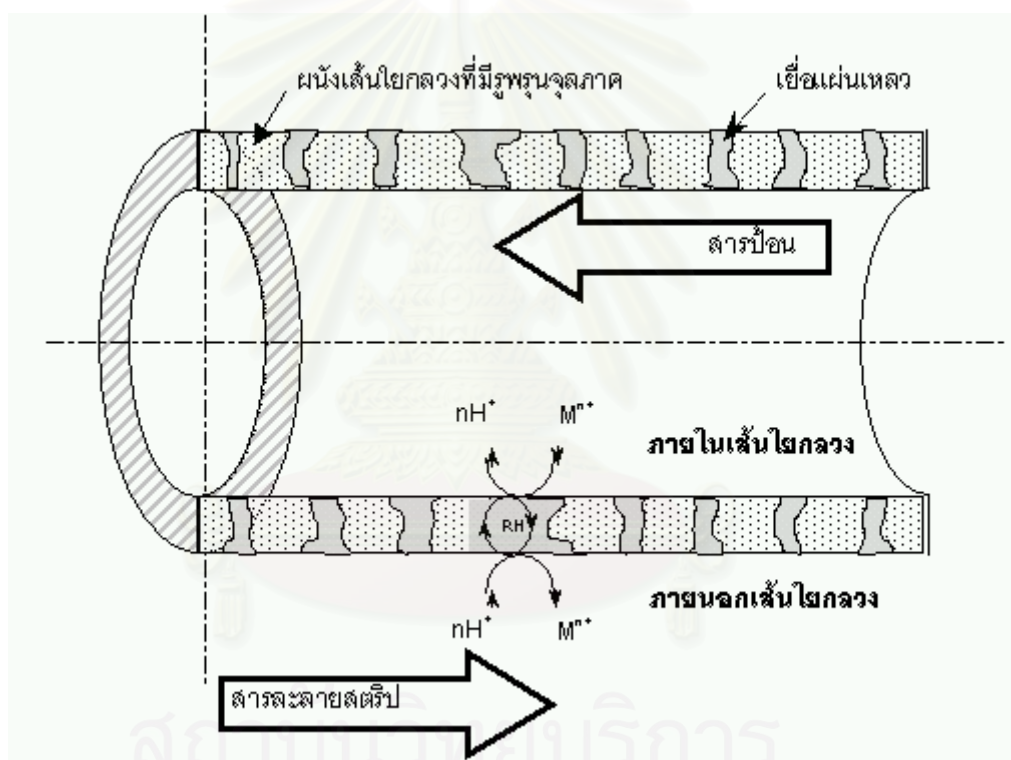
### (3) ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber)

ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นตัวรองรับอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนามาจากตัวรองรับชนิดแผ่นบาง เริ่มแรกจะมีการม้วนห่อตัวรองรับให้มีลักษณะเป็นท่อกลม (Tubular Tube) แต่พบว่าสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรมีค่าต่ำจึงมีการพัฒนาเป็นการใช้เส้นใยกลวงซึ่งมีขนาดเล็ก แต่ใช้เส้นใยเป็นจำนวนมากประกอบกันเป็นหน่วยเดียวกัน ทำให้มีสัดส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงกว่า ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทโพลีเมอร์ ซึ่งมีความพรุนสูง โดยรูพรุนจุลภาคมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 2-10 แสดงรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง

จากรูปที่ 2-10 รูปพรรณจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงจะเป็นแหล่งยึดพยางเยื่อแผ่นเหลวไว้ โดยชุดอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยเส้นใยกลวงจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวล ซึ่งชุดอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงกว่าชุดตัวรองรับชนิดอื่น ๆ ที่มีขนาดเท่า ๆ กัน (Jianhan and Cangmin : 1988 , Tanigaki et al. : 1988) แต่กระนั้นระบบการสกัดจำเป็นต้องมีการกรองแยกขั้นต้น (Prefiltration) ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อป้องกันการอุดตันภายในเส้นใยกลวงเนื่องจากเส้นใยกลวงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กมากนั่นเอง (Tanigaki et al. : 1988) โดยลักษณะการไหลของวัสดุต่าง ๆ ลักษณะการเกิดกลไกการสกัดและลักษณะการปฏิบัติการโดยใช้เส้นใยกลวงแสดงได้ดังรูป 2-11



รูปที่ 2.11 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยกลวง

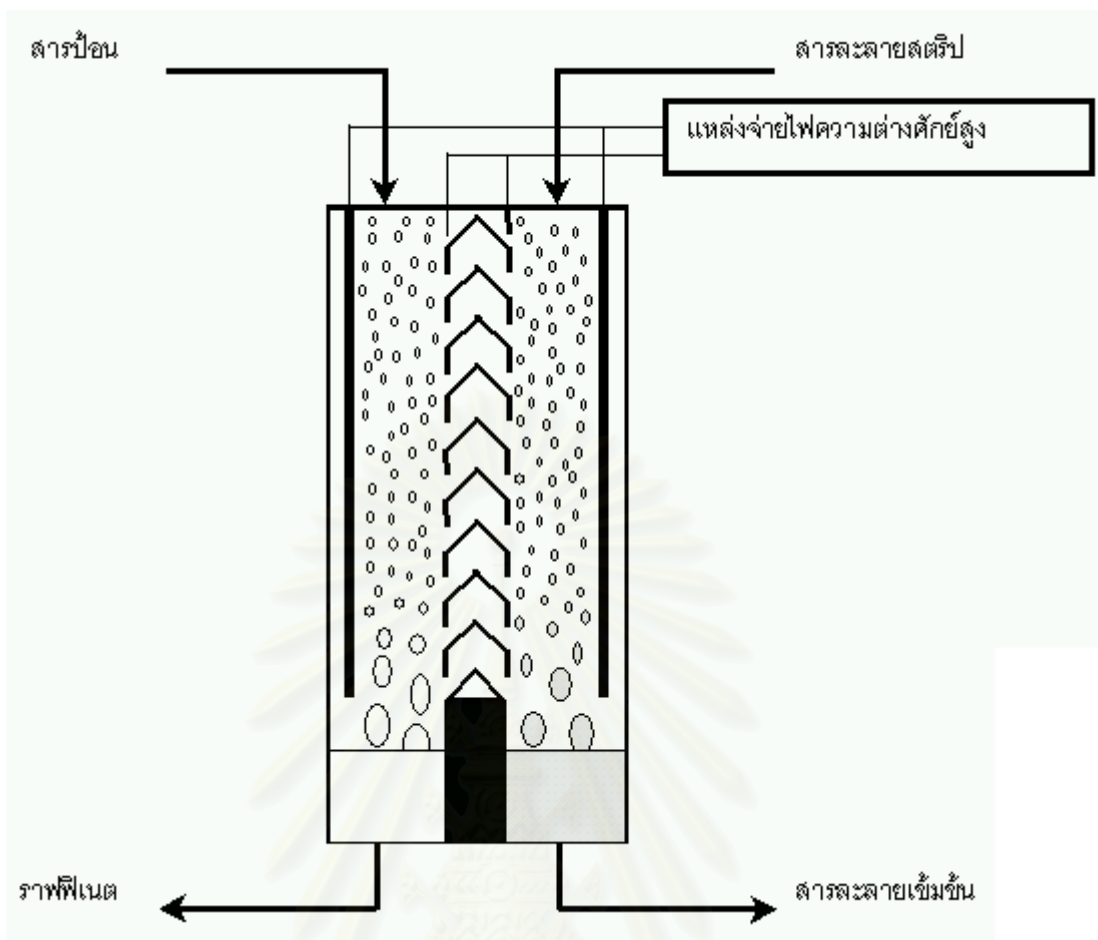
จากรูปที่ 2-11 เป็นลักษณะของกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พยางด้วยเส้นใยกลวงที่มีรูปพรรณจุลภาคของตัวรองรับเป็นชนิดไม่ชอบน้ำ เยื่อแผ่นเหลวถูกเตรียมให้ยึดพยางอยู่ในรูปพรรณจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง สารป้อนซึ่งเป็นวัสดุของสารละลายจะถูกป้อนให้ไหลภายในท่อเส้นใยกลวง และสารละลายสตริป จะถูกป้อนให้ไหลภายนอกท่อเส้น

ใยกลวงโดยมีลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน จากกระบวนการจะเห็นว่าเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์เมื่อถูกยึดตรึงอยู่ในรูปพอร์จุลภาคของตัวรองรับของเส้นใยกลวงนั้น จะกั้นระหว่างวัฏภาคของสารป้อนกับวัฏภาคของสารละลายสไตริปเช่นเดียวกันกับตัวรองรับชนิดอื่นๆ และเกิดการสกัดตามกลไกการสกัดผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่สัมผัสกัน โดยพบว่า ข้อดีของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้คือเยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน, หลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเกิดเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายโอนมวลในการสกัด และมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงที่สุด เมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นเหลวที่พองบนตัวรองรับชนิดอื่นที่มีขนาดเดียวกัน ซึ่งเป็นจุดเด่นของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้นั่นเอง

### 2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Pseudo - Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์มีการพัฒนาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลลอยด์ (ชนิดหอสกัดแบบหยด), หลักรไฟฟ้าสถิตย์ และเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวรวมเข้าด้วยกันซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้ อาทิเช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย และระบบการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน , ความเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่าง ๆ เป็นต้น (Gu : 1990,1992) โดยลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดแยกโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 2-12

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์

จากรูปที่ 2-12 ชุดอุปกรณ์เป็นถังปฏิกรณ์ที่ทำขึ้นเป็นพิเศษโดยถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์สตริป มีแผ่นกั้น (Baffle plate) เป็นโลหะตัวอักษรรูปตัว V คว่ำเรียงต่อกัน เว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่ากันโดยมีลวดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอาไว้ อีกทั้งยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะที่รับแบ่งกั้นวัฏภาคระหว่างราฟไฟเนต (Raffinate) กับสารละลายเข้มข้น (Concentrated solution) ในเซลล์สกัดและเซลล์การนำกลับมีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มแช่อยู่ซึ่งต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟฟ้า กระแสตรงความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ ขั้นตอนดำเนินการเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์จนได้ระดับของปริมาณที่ต้องการโดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี่จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ จากนั้นป้อนสารป้อนและสารละลายสตริปพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาค เกิดการสกัดแยก

และสตรีปออกตามกลไกการสกัดและการนำกลับ โดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตย์เป็นปัจจัยส่งเสริมประสิทธิภาพให้มีสมรรถนะสูงขึ้นซึ่งถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ โดยหากมีหยดของสารบ่อนหรือสารละลายสตรีปหลุดเข้าไปในช่องของแผ่นกั้น ซึ่งกั้นวัฏภาคทั้งสอง หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดวัฏภาคของสารละลายมีรูปร่างยืดยาวออก (Elongate) เป็นรูปร่างรี (Ellipsoidal Shape) เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของวัฏภาคสารละลาย โดยเมื่อหยดของวัฏภาคของสารละลายซึ่งอยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตย์จะรวมกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาคของสารละลายกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ที่จะส่งผลให้วัฏภาคทั้งสองเคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ อีกทั้งยังมีแผ่นกั้นที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษซึ่งจะส่งเสริมให้หยดของวัฏภาคที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้น ให้รวมตัวกันเองและตกกลับไปยังเซลล์ของมันตามเดิม (Gu : 1990)

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตย์จะมีข้อดีอยู่มากมาย อาทิเช่นมีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง, ปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่าง ๆ ต่ำ, เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้น และด้านทานการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่ยังคงพบว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการเช่น ขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว, อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรไม่สูง, วัฏภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ (Low Polarization) และใช้กับกระบวนการที่วัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวัฏภาคต่าง ๆ ในขบวนการต่ำ อันเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในขบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นต้น (Gu : 1992) เทคนิคการสกัดแยกด้วยเทคนิคต่าง ๆ ก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งานและพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายกับเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลว สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2-1 ดังนี้

การสกัดด้วยตัวทำละลาย		การสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลว	
ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- กระบวนการไม่ยุ่งยาก</li> <li>- ซับซ้อน</li> <li>- มีกำลังการผลิตสูง</li> <li>- ปัญหาการปนเปื้อนต่ำ</li> <li>- ราคาถูก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้พลังงานสูง</li> <li>- ใช้สารเคมีปริมาณมาก</li> <li>- ประสิทธิภาพไม่สูง</li> <li>- มีข้อจำกัดของสมดุลระหว่างวัฏภาค</li> <li>- มีคุณสมบัติในการเลือกสกัดต่ำ</li> <li>- มีหลายขั้นตอน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้พลังงานต่ำ</li> <li>- เกิดการสกัดและการนำกลับอย่างต่อเนื่อง เพราะรวมขั้นตอนไว้เป็นขั้นตอนเดียวกัน</li> <li>- มีคุณสมบัติในการเลือกสกัดสูง</li> <li>- ใช้สารเคมีปริมาณต่ำ</li> <li>- มีประสิทธิภาพสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวต่ำ</li> <li>- อายุการใช้งานต่ำ</li> <li>- มีการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ่าย</li> <li>- ราคาสูง</li> <li>- มีกำลังการผลิตต่ำ</li> </ul>

ตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายกับเทคนิคการสกัด โดยเยื่อแผ่นเหลว

และเมื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยระหว่างเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 2-2

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพอง		เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์	
ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูงมาก</li> <li>- มีกำลังการผลิตสูง</li> <li>- มีกระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปัญหาการใช้สารลดแรงตึงผิวและการบำบัด</li> <li>- ปัญหาการปนเปื้อน</li> <li>- ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณสูง</li> <li>- ใช้พลังงานสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีประสิทธิภาพสูง</li> <li>- ไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว</li> <li>- ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณต่ำ</li> <li>- ใช้พลังงานต่ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ</li> <li>- เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ</li> <li>- ปัญหาทางด้านอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นเยื่อแผ่นเหลวที่มีเสถียรภาพสูง</li> <li>- มีประสิทธิภาพสูงมาก</li> <li>- ปัญหาการปนเปื้อนต่ำ</li> <li>- ไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีกำลังการผลิตต่ำ</li> <li>- สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขี้ดต่ำ</li> <li>- ใช้กับกระบวนการที่สารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น</li> <li>- ปัญหาอันตรายทางด้านไฟฟ้า</li> <li>- ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณมาก</li> </ul>

ตารางที่ 2-2 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ



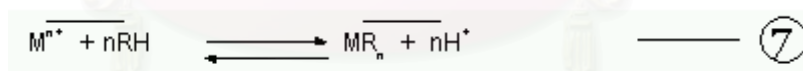
โดยในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเทคนิคการสกัดแยกโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น ใช้สารสกัดและตัวทำละลายปริมาณเพียงเล็กน้อย มีอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง อีกทั้งยังมีศักยภาพในการพัฒนากระบวนการสกัดเพื่อสกัดแยกแร่หายาก (Rare Earth) ซึ่งเป็นโลหะวัสดุที่ทรงพลานภาพแต่มีปริมาณต่ำในธรรมชาติ

## 2.3 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด (Tavlarides et al. : 1987) ดังนี้

### 2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อยคือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractant) และสารสกัดชนิดคีเลต (Chelate extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น  $-COOH$ ,  $=P(O)OH$ ,  $-SO_3H$  ส่วนประเภทหลังสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ดังสมการ



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ นอกจากนี้สมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลาย และยังขึ้นอยู่กับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้น ๆ (Tavlarides et al. : 1987)

สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะกรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิล ฟอสฟอริก (Di-2-ethylhexyl phosphoric acids ; D2EHPA)

สารสกัดประเภทคีเลทได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วย ดอนเนอร์กรุป (Donor groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลทเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียงสองประเภทคือ (ก) ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic leach liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline)

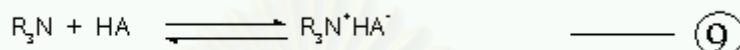
### 2.3.2 สารสกัดชนิดต่าง (Basic Extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะสัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีน และแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary;  $\text{RNH}_2$ ) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary;  $\text{R}_2\text{NH}$ ) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary;  $\text{R}_3\text{N}$ ) และ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium salts;  $\text{R}_4\text{N}^+$ ) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่

ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Anionic species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน

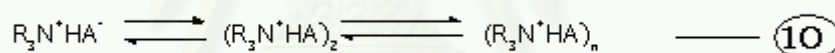


เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจวบกับไอออนโลหะ ดังนี้



นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีชื่อ  $R_3N^+HA^-$  ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ  $MY^n$  จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุ ดังสมการ 8 ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้อเอมีนเป็นสารสกัด คือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียที่มีประจวบและประจุลบ

(Ammonium cation และ anion) การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการ 10

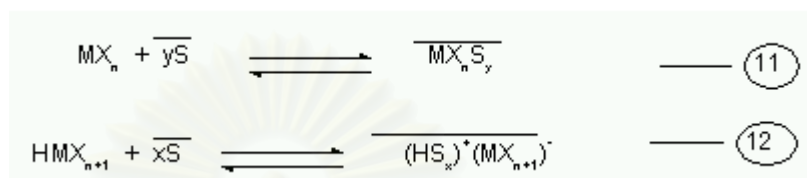


การเกิดวัฏภาคที่สามทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifiers) เช่นพวก long-chain aliphatic alcohol (Tavlarides et al. : 1987)

### 2.3.3 สารสกัดชนิดโซลเวท (Solvating Extractant)

สารสกัดประเภทโซลเวท (Solvating) หรือสารสกัดประเภทกลาง (Neutral) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะดอนเนอร์รู๊ป จึงไม่สามารถแตกโปรตรอนได้ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจวบหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาค

ของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง  
 ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะใน  
 การเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำ เช่นเดียวกับกรณีของสาร  
 สกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมกลางของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับ  
 โปรตรอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



หรือ

เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดไฮลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวัฏภาค  
 ของ สารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดไฮลเวทดังสมการ 11  
 และสมการ 12

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### การทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งขั้นตอนและวิธีการทดลองในแต่ละชุดของตัวแปรที่ทำการศึกษถึงการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

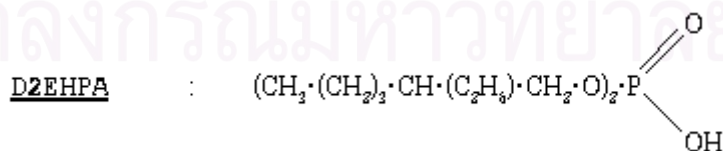
#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองศึกษาการสกัดแยกนีโอดีเมียมไอออน โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สามารถแสดงได้ดังตาราง 3-1

ชนิด	ชื่อ	สูตรเคมี	ระดับคุณภาพ	บริษัท
ไอออนโลหะ	นีโอดีเมียมออกไซด์	$Nd_2O_3$	Analytical	ALDRICH
กรดในสารละลายสตรีป	ไนตริก	$HNO_3$	Analytical	AnalaR <sup>®</sup> BHD
กรดในสารละลายป้อน	ไนตริก	$HNO_3$	Analytical	AnalaR <sup>®</sup> BHD
สารสกัด	D2EHPA	$C_{16}H_{35}O_4P$	Analytical	SIGMA CHEMICAL
สารละลายอินทรีย์	เคโรซีน	-	Commercial	บ.ไทยออยล์ จำกัด

ตาราง 3-1 แสดงรายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

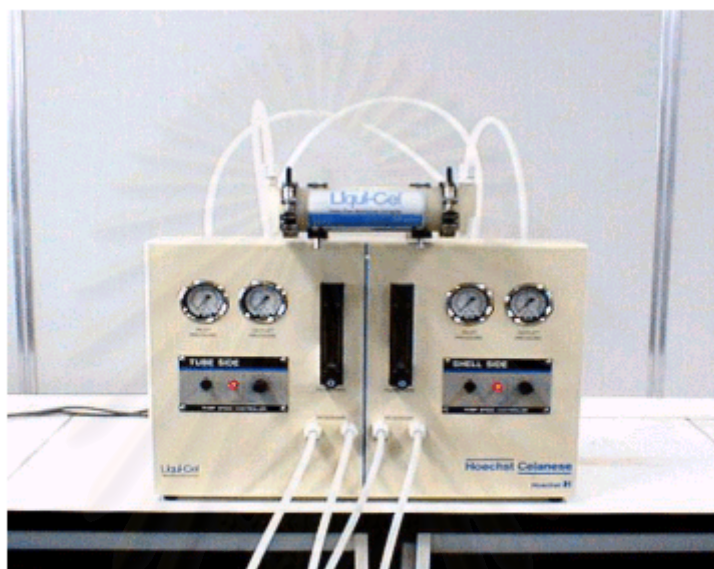
สารสกัดที่ใช้มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3-1



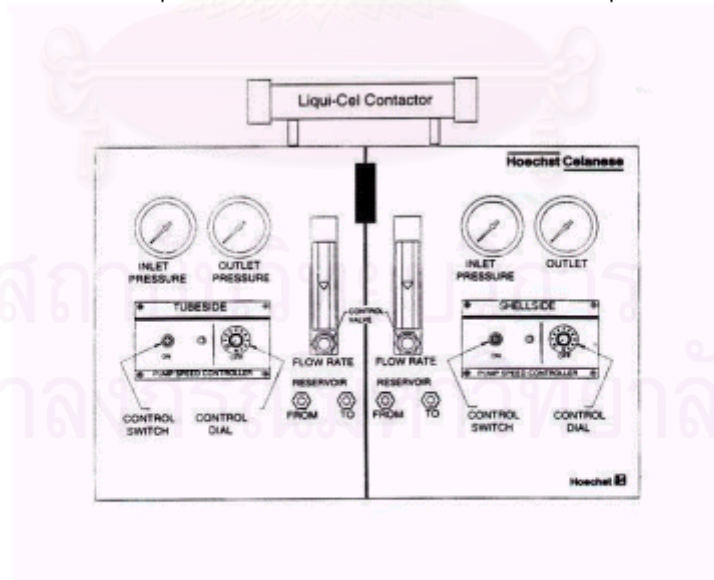
รูปที่ 3-1 แสดงสูตรโครงสร้างของสารสกัด

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ชุดทดลองเส้นใยกลวง Liqui-Cel<sup>®</sup> Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสูบลมสองชุดที่มีอัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที ชุดควบคุมความเร็วสองชุด มาตรวัดอัตราการไหลสองชุด และมาตรวัดความดันสองชุด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-2 และ 3-3



รูปที่ 3-2 แสดงชุดการทดลองการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



รูปที่ 3-3 แสดงรายละเอียดของตำแหน่งอุปกรณ์ต่าง ๆ บนชุดการทดลอง

3.2.2 ตัวกรองรับใช้ชุดเส้นใยกลวง Celgard<sup>®</sup> X-30 240 Microporous Polypropylene Hollow Fiber ซึ่งมีรายละเอียดคุณสมบัติของชุดเส้นใยกลวง แสดงดังตาราง 3-2

ลักษณะ	คุณลักษณะ
วัสดุเส้นใยกลวง	โพลีโพรไพลีน (Polypropylene)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )
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)	2.5 x 8 นิ้ว (inch)

ตาราง 3-2 แสดงรายละเอียดของคุณลักษณะของชุดเส้นใยกลวง

3.2.3 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) ที่ใช้คือ รุ่น HI 8417 Microprocessor Bench pH/ °C Meter ของบริษัท Hanna Instruments

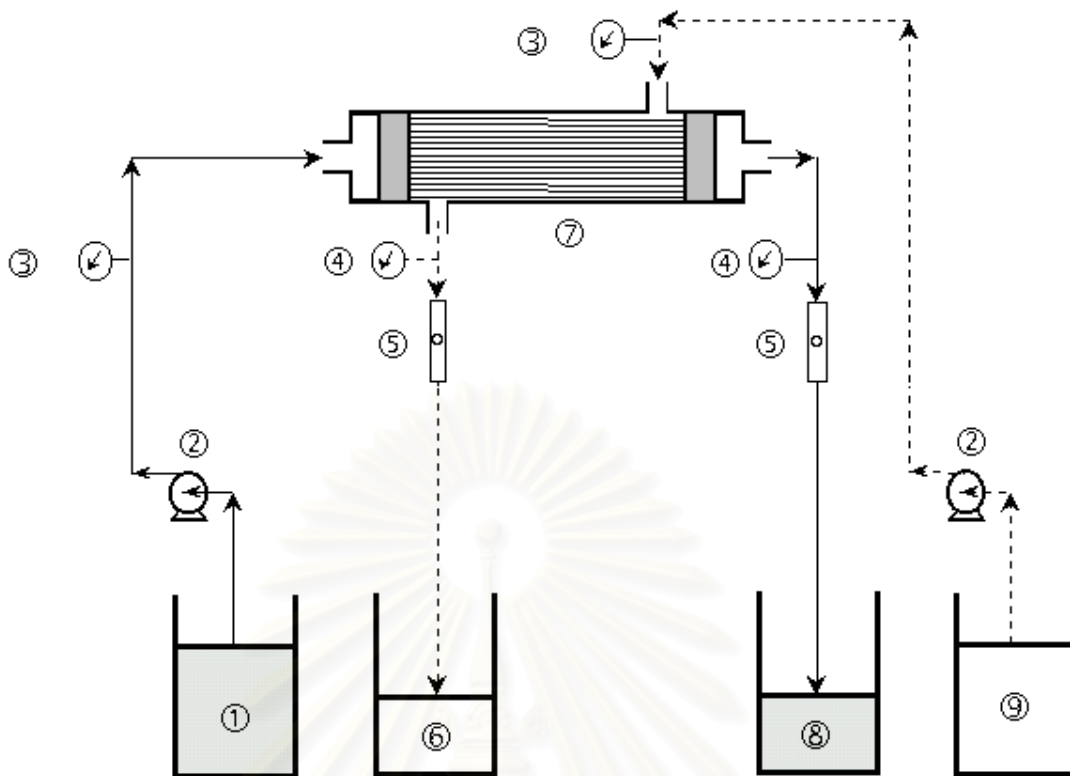
3.2.4 ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของไนโอติเมียมไอออนด้วยเครื่อง 6450 UV/VIS Spectrophotometer รุ่น JENWAY limited ของบริษัท Labquip International Limited

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดนีโอดีเมียมไอออน โดยเยื่อแผ่น เหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับ สารละลายป้อนและสารละลายสตรีป โดยมีขั้นตอนในการทำกา รทดลองดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของนีโอดีเมียมไอออนความเข้มข้น  
100 ส่วนในล้านส่วน(ppm) ปริมาตร 10 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลาย  
ป้อนเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายสตรีปซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมล  
ต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสตรีปเริ่มต้นเพื่อ  
วิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัดD2EHPA  
ในเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร แล้วยัดตั้งในรู  
พุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- (4) ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใย  
กลวงพร้อมกัน โดยมีอัตราการไหลในทั้งสองฝั่งที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที  
ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบ  
ไหลผ่านครั้งเดียว ดังรูปที่ 3-4
- (5) เก็บตัวอย่างที่เวลา 5, 10, 15, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ
- (6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากทุกการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ  
นีโอดีเมียมไอออนด้วยเครื่อง 6450 UV/VIS Spectrophotometer





รูปที่ 3-4 แสดงการปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One through operation) ซึ่งของไหลในกระบวนการมีทิศทางการไหลสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง โดยที่

- |                          |                                |
|--------------------------|--------------------------------|
| ① คือถังของสารป้อนขาเข้า | ⑥ คือถังของสารละลายสตริปขาออก  |
| ② คือปั๊มฟลูบ            | ⑦ คือชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง      |
| ③ คือเกจวัดความดันขาเข้า | ⑧ คือถังของสารป้อนขาออก        |
| ④ คือเกจวัดความดันขาออก  | ⑨ คือถังของสารละลายสตริปขาเข้า |
| ⑤ คือมาตรวัดอัตราการไหล  |                                |

(วีรวัดณ์ ปัททวิคองคา : 1998)

3.3.2 เพื่อศึกษาเลือกช่วงของความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมต่อการศึกษาการสกัด  
 นิโอดิเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยมีขั้นตอนในการทำ  
 การทดลองดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของนิโอดิเมียมไอออนความเข้มข้น  
 100 ส่วนในล้านส่วน(ppm) ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อน  
 เริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายสตริปซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมล  
 ต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้นเพื่อ  
 วิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัดD2EHPA  
 ในเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 3% โดยปริมาตร แล้วยัดตริงในรู  
 พุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- (4) ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใย  
 กลวงพร้อมกัน โดยมีอัตราการไหลในทั้งสองฝั่งที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที  
 ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบ  
 ไหลผ่านครั้งเดียว ดังรูปที่ 3-4
- (5) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (6) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น  
 6, 9, 12, 15 และ 20 % โดยปริมาตรตามลำดับ
- (7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากทุกการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ  
 นิโอดิเมียมไอออนด้วยเครื่อง 6450 UV/VIS Spectrophotometer

### 3.3.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่มีต่อการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยมีขั้นตอนในการทำการทดลองดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของนีโอดีเมียมไอออนความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่เตรียมได้เป็น 4.0 ด้วยกรดไนตริก และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายสตริปซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัด D2EHPA ในเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 3% โดยปริมาตร แล้วยัดตริงในรูปพุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- (4) ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อมกัน โดยมีอัตราการไหลในทั้งสองฝั่งที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ดังรูปที่ 3-4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปขาออกสุดท้ายเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 6, 9, 12 และ 15% โดยปริมาตรตามลำดับ
- (6) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (5) โดยปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่เตรียมได้เป็น 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 ด้วยกรดไนตริกตามลำดับ
- (7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากทุกการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนด้วยเครื่อง 6450 UV/VIS Spectrophotometer

**3.3.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอติเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยมีขั้นตอนในการทำการทดลองดังนี้**

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของนีโอติเมียมไอออนความเข้มข้น 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่เตรียมได้เป็น 3.0 ด้วยกรดไนตริก และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายสตริปซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัด D2EHPA ในเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 3% โดยปริมาตร แล้วยัดตั้งในรูปพุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- (4) ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อมกัน โดยมีอัตราการไหลในทั้งสองฝั่งที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ดังรูปที่ 3-4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปขาออกสุดท้ายเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 6, 9, 12 และ 15% โดยปริมาตรตามลำดับ
- (6) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น 40, 60 80, 100 และ 120 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ตามลำดับ
- (7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากทุกการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนด้วยเครื่อง 6450 UV/VIS Spectrophotometer

### 3.3.5 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารสกัดD2EHPA ที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอติเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยมีขั้นตอนในการทำการทดลองดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของนีโอติเมียมไอออนความเข้มข้น 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่เตรียมได้เป็น 3.0 ด้วยกรดไนตริก และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายสตริปซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัดD2EHPA ในเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 3% โดยปริมาตร แล้วยัดตั้งในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- (4) ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อมกัน โดยมีอัตราการไหลในทั้งสองฝั่งที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ดังรูปที่ 3-4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปขาออกสุดท้ายเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (7) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 6, 9, 12 และ 15% โดยปริมาตรตามลำดับ
- (8) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น 40, 60 80, 100 และ 120 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ตามลำดับ
- (8) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากทุกการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนด้วยเครื่อง 6450 UV/VIS Spectrophotometer

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.3.6 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีต่อการสกัด นิโอติเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยมีขั้นตอนในการทำการทดลองดังนี้**

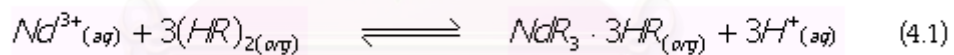
- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของนิโอติเมียมไอออนความเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่เตรียมได้เป็น 3.0 ด้วยกรดไนตริก และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายสตริปซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัด D2EHPA ในเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 9% โดยปริมาตร แล้วยัดตริงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
- (4) ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อมกัน โดยมีอัตราการไหลในทั้งสองฝั่งที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ดังรูปที่ 3-4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปขาออกสุดท้ายเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายสตริปเป็น 0.05, 0.1, 0.3 และ 0.5 โมลต่อลิตรตามลำดับ
- (6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากทุกการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนิโอติเมียมไอออนด้วยเครื่อง 6450 UV/VIS Spectrophotometer

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยก นีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อน ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายอินทรีย์ และ ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริป รวมถึงการวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้

ในงานวิจัยนี้กระบวนการของการสกัดที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลแบบควบคู่ (coupled transport) ชนิดการถ่ายโอนแบบสวนทางกัน (counter transport) ที่มีสารแพร่ผ่าน (permeant) เป็นไอออนสองตัวคือ นีโอดีเมียมไอออน ( $Nd^{3+}$ ) และ ไฮโดรเนียมไอออน ( $H^+$ ) โดยที่ นีโอดีเมียมไอออนจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายสตริปซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับไฮโดรเนียมไอออนซึ่งจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากด้านสารละลายสตริปไปยังด้านสารละลายป้อน โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยาไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ นีโอดีเมียมไอออน (Chitra KR. et al. : 1995) ดังนี้



เมื่อพิจารณาผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนและภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัสที่ 1 จากรูป 2-3) เริ่มต้นจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าโดยมีนีโอดีเมียมไอออนเป็นสารตั้งต้น อยู่ในภูมิภาคสารละลายป้อนเกิดการเคลื่อนที่จากกระแสการไหลในภูมิภาคของสารละลายป้อนแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางๆไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของสารละลายป้อนกับภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออน (concentration gradient) ไปสู่บริเวณผิวสัมผัสที่ 1 (รูปที่ 2-3) แล้วจากนั้นนีโอดีเมียมไอออนที่บริเวณผิวสัมผัสที่ 1 จะเกิดปฏิกิริยาการสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะได้เป็นผลิตภัณฑ์ 2 ตัวในรูปของไดเมอร์คือ สารประกอบเชิงซ้อนของนีโอดีเมียมไอออน ( $NdR_3$ ) และ ไฮโดรเนียมไอออน ( $H^+$ ) โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดดำเนินไปข้างหน้าและย้อนกลับเท่ากับ (Kataoka et al. : 1995)

$$r_f = k_f \left\{ \frac{[Nd^{3+}]_{(aq)} [(HR)_2]_{(org)}^3}{[H^+]_{(aq)}^3} - \frac{[Ndr_3 \cdot 3HR]_{(org)}}{K_{er}} \right\} \quad (4.2)$$

$$r_b = k_b \left( [Ndr_3 \cdot 3HR]_{b,org} - \frac{K_{er} [Nd^{3+}]_s [(HR)_2]_{b,org}^3}{[H^+]_s^3} \right)$$

ปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้าเรื่อย ๆ จนกว่าจะเข้าสู่สมดุล โดยมีสมการแสดงสมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{er} = \frac{[Ndr_3 \cdot 3HR]_{(org)} [H^+]_{(aq)}^3}{[Nd^{3+}]_{(aq)} [(HR)_2]_{(org)}^3} \quad (4.3)$$

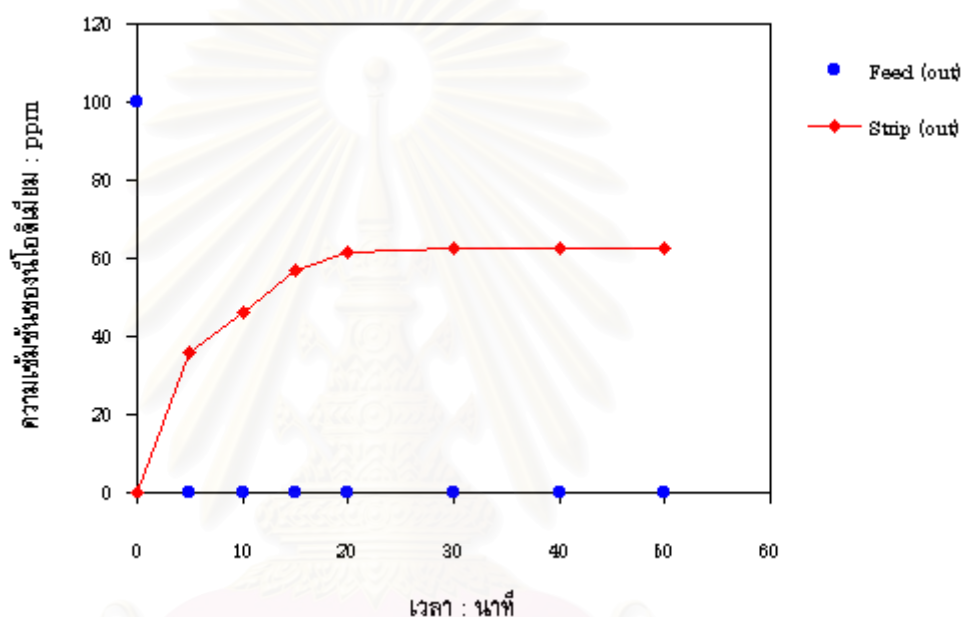
จากนั้นไอออนเชิงซ้อนของสารสกัดกับไอออนโลหะจะแพร่ผ่านชั้นความหนาของเยื่อแผ่นเหลวอันเนื่องมาจากความแตกต่างของสารประกอบเชิงซ้อนไปสู่ผิวสัมผัสที่ II (รูปที่ 2-3) สารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวสัมผัสที่ II จะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับทำให้ไอออนโลหะถูกสตริปออกมาที่ผิวสัมผัสที่ II จากกลไกข้างต้นเมื่อไอออนเชิงซ้อนของสารสกัดกับไอออนโลหะบริเวณผิวสัมผัสที่ II เกิดปฏิกิริยาการนำกลับ ทำให้ไอออนโลหะถูกสตริปด้วยไฮโดรเนียมไอออนออกจากวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวแล้ว จะเกิดการสกัดกลับคืนสู่วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งสารสกัดจะแพร่ย้อนกลับจากบริเวณผิวสัมผัสที่ I ไปสู่ผิวสัมผัสที่ II ดังเดิมด้วยแรงขับของความแตกต่างของความเข้มข้นของสารสกัดนั้น และเกิดปรากฏการณ์เดิมซ้ำไปด้วยแรงขับของความแตกต่างของความเป็นกรด-ด่าง (pH Gradient) ซึ่งเป็นภาวะ ของกระบวนการและความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration Gradient) อย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยาย้อนกลับนี้จะเกิดไปเรื่อย ๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลและมีค่าคงที่สมดุลค่าเดียวกับปฏิกิริยาไปข้างหน้า เมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของนีโอดีเมียมไอออนและสารสกัดในทั้งสองด้านเท่ากัน จะไม่เกิดการถ่ายโอนมวลของไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวและกล่าวได้ว่ากระบวนการถ่ายโอนมวลแบบนี้เป็นกระบวนการที่ยังไม่เกิดสมดุล (non-equilibrium)

สงวนลิขสิทธิ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4.1 ผลการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดนีโอดีเมียมไอออนและหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับสารละลายป้อนและสารละลายstripping

การทดลองนี้ทำการศึกษาเพื่อดูประสิทธิภาพของการสกัดนีโอดีเมียมไอออน และหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมสารละลายป้อนและสารละลายstrippingเพื่อทำการศึกษาถึงการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงต่อไป จากการทดลองได้ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4-1 (ข้อมูลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ข : ตาราง ข-1)

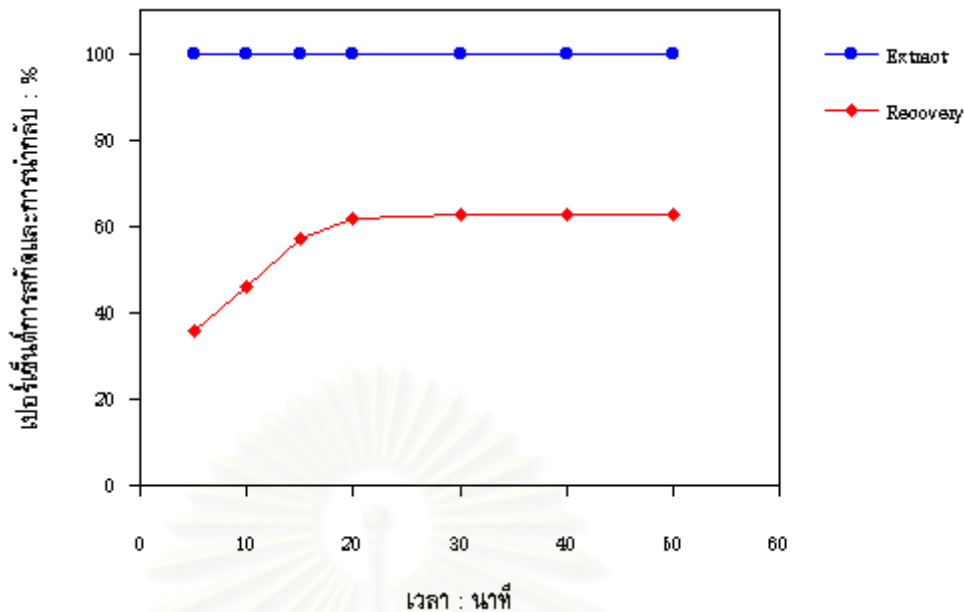


รูปที่ 4-1 แสดงความสัมพันธ์ของเวลา (นาที) กับความเข้มข้นของนีโอดีเมียม (ppm) สำหรับสารละลายป้อนขาออกและสารละลายstrippingขาออก เมื่อ  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm ,  $[HNO_3]_S = 0.1$  mol/l ,  $Volume_F = Volume_S = 10$  litre ,  $[D2EHPA] = 20\%$  (v/v) ,  $Flow\ rate_F = Flow\ rate_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

โดยในการทดลองนี้เตรียมความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 10 ลิตร และสารละลายสตริปความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร เช่นกัน ในด้านของสารสกัดใช้ความเข้มข้น 20 % โดยปริมาตร ของ D2EHPA ปริมาตร 1 ลิตร แล้วยึดตรึงในรูปพุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบสวนทางกันโดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านในของท่อเส้นใยกลวง (tube side) และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกของเส้นใยกลวง (shell side) และควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากันเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-1 เมื่อพิจารณาทางด้านสารละลายป้อนพบว่าปริมาณของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาออกมีค่าน้อยมากเกือบเป็นศูนย์เมื่อเวลาในการปฏิบัติการผ่านไปเพียง 5 นาทีและมีค่าคงที่ตลอดจนถึงสิ้นสุดการทดลอง และเมื่อพิจารณาทางด้านสารละลายสตริปพบว่าเมื่อเวลาในการปฏิบัติการเพิ่มขึ้นปริมาณของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายสตริปขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นตาม จนเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาทีแล้วระบบเริ่มเข้าสู่สมดุล นั่นคือเมื่อเวลาในการปฏิบัติการมากกว่า 20 นาที ปริมาณของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายสตริปขาออกมีค่าคงที่ จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าสำหรับสภาวะการปฏิบัติการที่มีอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาทีนี้ เมื่อเวลาในการปฏิบัติการผ่านไป 20 นาที ระบบที่ทำการทดลองเริ่มเข้าสู่สมดุล ซึ่งคิดเป็นปริมาตรได้ 4 ลิตร นั่นคือในการทำการทดลองเพื่อศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยมีสารละลายป้อนเป็นสารละลายนีโอดีเมียมไอออน สารละลายสตริปเป็นสารละลายกรดไนตริก และสารสกัดที่ใช้เป็น D2EHPA ความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรนั้น สามารถเตรียมสารละลายป้อนและสารละลายสตริปที่ใช้ด้วยปริมาตร 5 ลิตรต่อ 1 ชุดการทดลองก็เพียงพอต่อการศึกษานี้ เนื่องจากปริมาตรดังกล่าวเป็นปริมาตรที่ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้

จากการทดลองสามารถพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบที่ใช้ในการทำการทดลอง สำหรับการศึกษถึงการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงได้ โดยพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับนีโอดีเมียมไอออน ดังผลที่แสดงในรูปที่ 4-2 (ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับดูได้จากภาคผนวก ค : ตาราง ค-2)

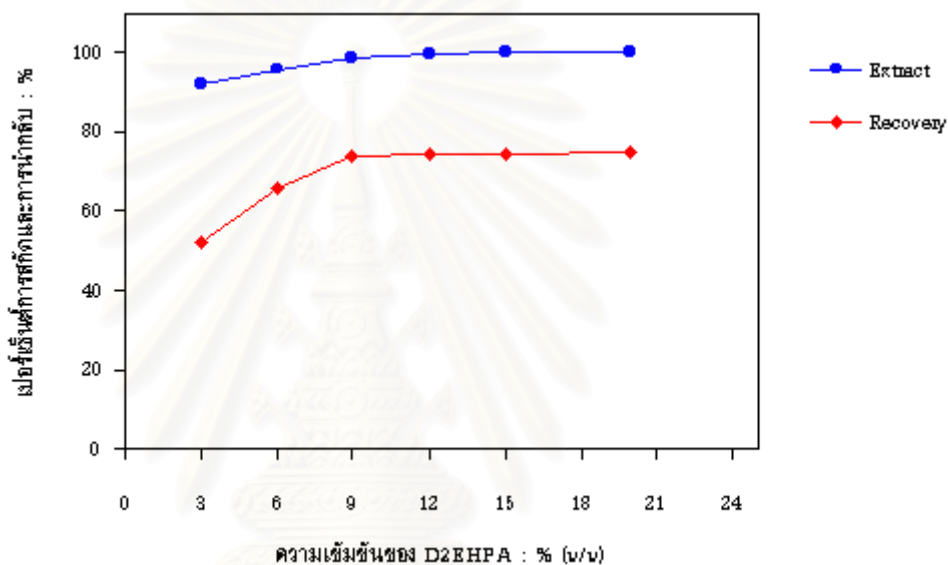


**รูปที่ 4-2** แสดงความสัมพันธ์ของเวลา (นาที) กับเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับของนีโอดีเมียมไอออน (%) สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริป เมื่อ  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm ,  $[HNO_3]_S = 0.1$  mol/l ,  $Volume_F = Volume_S = 10$  litre ,  $[D2EHPA] = 20\%$  (v/v) ,  $Flow\ rate_F = Flow\ rate_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

จากรูปที่ 4-2 พบว่าประสิทธิภาพของการสกัดมีค่าสูงมากแทบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และในส่วนของประสิทธิภาพของการนำกลับนั้น มีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาในการปฏิบัติการเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการนำกลับมีค่าคงที่เมื่อเวลาในการปฏิบัติการผ่านไป 20 นาที นั่นคือเมื่อเวลาของการปฏิบัติการเพิ่มขึ้น ระบบจะดำเนินไปตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของนีโอดีเมียมไอออนจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายสตริป และการเคลื่อนที่ของไฮโดรเนียมไอออนจากสารละลายสตริปผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายป้อน ระบบจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลาในการปฏิบัติการผ่านไป 20 นาที ซึ่งพิจารณาเป็นปริมาตรของสารละลายได้ 4 ลิตร ดังนั้นในการทำการทดลองเพื่อศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในระบบที่ใช้สารละลายป้อนเป็นสารละลายนีโอดีเมียมไอออน สารละลายสตริปเป็นสารละลายกรดไนตริก สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารละลาย D2EHPA สามารถเตรียมปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปที่ใช้สำหรับ 1 ชุดการทดลองด้วยปริมาตร 5 ลิตรก็เพียงพอต่อการศึกษา เนื่องด้วยปริมาตรดังกล่าวระบบที่สนใจนี้ดำเนินเข้าสู่สภาวะสมดุลได้แล้ว

#### 4.2 ผลการศึกษาเพื่อศึกษาเลือกช่วงของความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมต่อการศึกษากการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

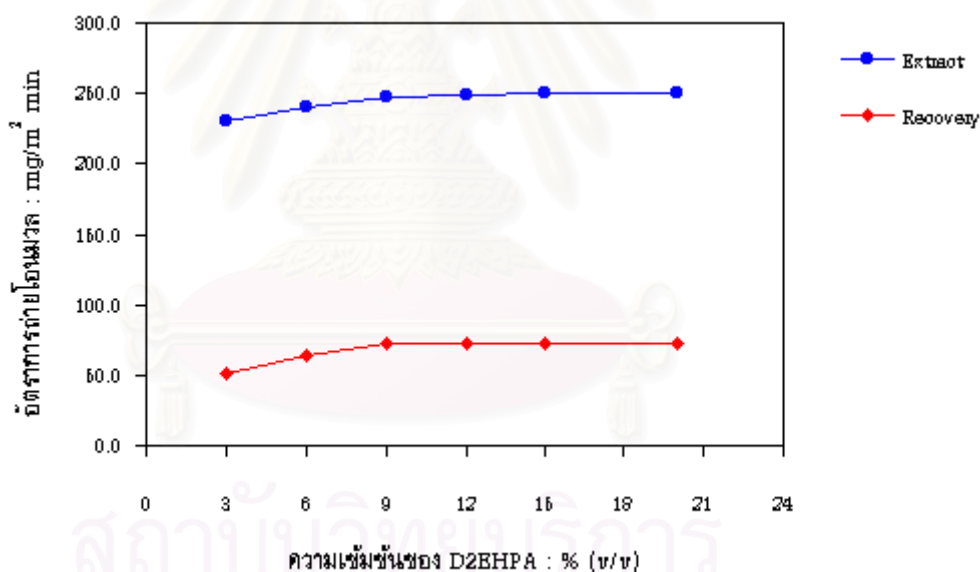
การทดลองนี้ทำการศึกษาเพื่อเลือกช่วงของความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมต่อการศึกษากการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง จากการทดลองได้ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4-3 (ข้อมูลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ข : ตาราง ข-2 , ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับดูได้จากภาคผนวก ค : ตาราง ค-3)



**รูปที่ 4-3** แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA (% โดยปริมาตร) กับเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับของนีโอดีเมียมไอออน (%) สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริป เมื่อ  $[Nd^{3+}]_F = 100 \text{ ppm}$  ,  $[HNO_3]_S = 0.1 \text{ mol/l}$  ,  $Volume_F = Volume_S = 5 \text{ litre}$  ,  $[D2EHPA] = 3, 6, 9, 12, 15$  และ  $20\% (v/v)$  ,  $Flow\ rate_F = Flow\ rate_S = 200 \text{ ml/min}$  โดยการใช้การปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

โดยในการทดลองนี้เตรียมความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร และสารละลายสตริปความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร เช่นกัน ในด้านของสารสกัดใช้ D2EHPA ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 3, 6, 9, 12, 15 และ 20% โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งยึดตั้งในรูปพหุคูณของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบสวนทางกันโดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านในของท่อเส้นใยกลวง (tube side) และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกของเส้นใยกลวง (shell side) และควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากันเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาถึงผลลัพธ์ของการสกัดและการนำกลับนีโอดีเมียมไอออน สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 4-4 (ข้อมูลอัตราการถ่ายโอนมวลของการสกัดและนำกลับคู่ได้จากภาคผนวก ค : ตาราง ค-8 (อิงข้อมูลจากตาราง ข-2 และ ตาราง ค-6) )

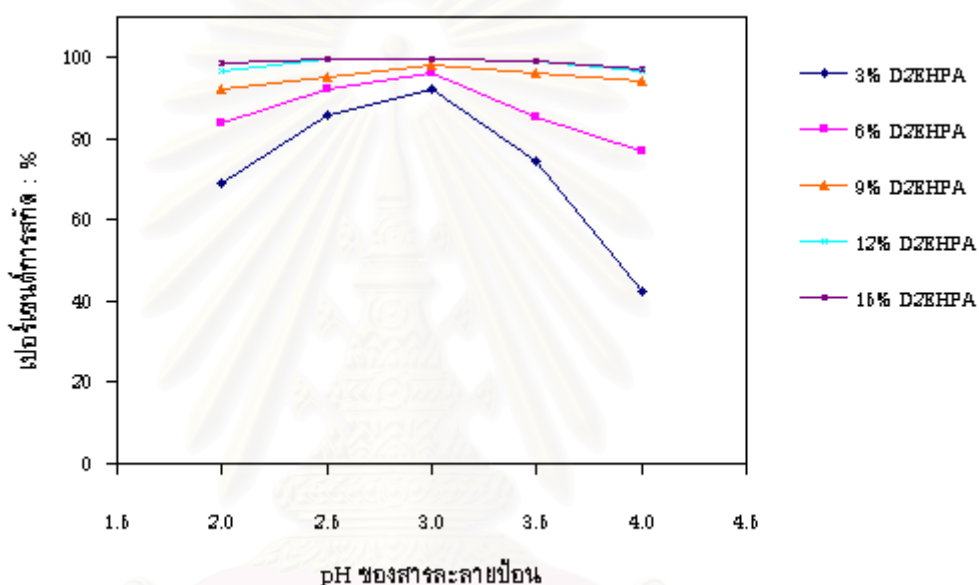


รูปที่ 4-4 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA (% โดยปริมาตร) กับอัตราการถ่ายโอนมวลของการสกัดและการนำกลับของนีโอดีเมียมไอออน (mg /m<sup>2</sup> min) สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริป เมื่อ  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm ,  $[HNO_3]_S = 0.1$  mol/l ,  $Volume_F = Volume_S = 5$  litre ,  $[D2EHPA] = 3, 6, 9, 12, 15$  และ 20% (v/v),  $Flow\ rate_F = Flow\ rate_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

จากรูปที่ 4-3 พบว่าประสิทธิภาพของการสกัดและการนำกลับน้ำไอดีเมียมไอออนมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีค่าเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการสกัดและนำกลับมีค่าเริ่มคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีค่าตั้งแต่ 9% โดยปริมาตรเป็นต้นไป เมื่อพิจารณาถึงค่าอัตราการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวดังรูปที่ 4-4 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมีค่าสูงขึ้น ค่าอัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับมีค่าสูงขึ้นตาม กอปรกับผลการคำนวณสมมูลมวลสารและผลการเปรียบเทียบปริมาณ D2EHPA กับปริมาณน้ำไอดีเมียมไอออนที่สะสมในกระบวนการ (ข้อมูลสมมูลมวลสารดูได้จากภาคผนวก ค : ตาราง ค-10 และ ตาราง ค-12) พบว่า ปริมาณ D2EHPA ที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณมากเพียงพอต่อการสกัดแยกน้ำไอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ดังจะเห็นได้จากปริมาณของ  $D2EHPA_{excess}$  มีค่าเป็นบวก โดยผลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการคำนวณ และเมื่อพิจารณาถึงช่วงความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดน้ำไอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในเชิงเศรษฐศาสตร์แล้ว และเพื่อให้ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นของสารสกัดที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับรวมทั้งฟลักซ์สำหรับการสกัดและนำกลับเข้าสู่สภาวะคงที่ สามารถเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมต่อการศึกษากการสกัดน้ำไอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงได้ในช่วงความเข้มข้นของสารสกัดไม่เกิน 15% โดยปริมาตร

#### 4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอติเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึงผลของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอติเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง จากการทดลองได้ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4-5 (ข้อมูลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ข : ตาราง ข-3 , ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับดูได้จากภาคผนวก ค : ตาราง ค-4)



**รูปที่ 4-5** แสดงความสัมพันธ์ของความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายป้อน กับ เปอร์เซ็นต์การสกัดของนีโอติเมียมไอออน (%) สำหรับสารละลายป้อน เมื่อ  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm ,  $[HNO_3]_S = 0.1$  mol/l ,  $Volume_F = Volume_S = 5$  litre ,  $[D2EHPA] = 3, 6, 9, 12$  และ  $15\%$  (v/v) ,  $Flow\ rate_F = Flow\ rate_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

โดยในการทดลองนี้เตรียมความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 ด้วยกรดไนตริกตามลำดับ และสารละลายสตริปความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตรเช่นกัน ในด้านของสารสกัดใช้ D2EHPA ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 3, 6, 9, 12 และ 15% โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งยึดตรึงในรูปพหุคูณของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบสวนทางกันโดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านในของท่อเส้นใยกลวง (tube side) และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกของเส้นใยกลวง (shell side) และควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากันเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-5 พบว่าประสิทธิภาพในการสกัดนีโอติเมียมไอออนด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงนี้มีค่ามากขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างมีค่าเพิ่มขึ้น จนได้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 3.0 จากนั้นประสิทธิภาพในการสกัดนีโอติเมียมไอออนมีค่าลดลง โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทุก ๆ ค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA และประสิทธิภาพในการสกัดนีโอติเมียมไอออนมีค่าใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 12 และ 15% โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

จากสมการที่ 4.1 พิจารณาที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวพบว่ามีความหนาแน่นของการสกัดเกิดขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ 4.4 (Chitra KR. et al. : 1995)



โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดดำเนินไปข้างหน้าดังสมการที่ 4.5 (Kataoka et al. : 1995)

$$r_F = k_F \left\{ \frac{[Nd^{3+}]_{F,ag} [(HR)_2]_{F,org}^3}{[H^+]_{F,ag}^3} - \frac{[NdR_3 \cdot 3HR]_{F,org}}{K_{ex}} \right\} \quad (4.5)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จากสมการที่ 4.5 เมื่อพิจารณารูปที่ 4-5 พบว่าเมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายป้อนลดลง นั่นคือเทอม  $[H^+]_{F,ag}$  ในสมการที่ 4.5 มีค่าลดลง ทำให้อัตราของการเกิดปฏิกิริยาการสกัดไปข้างหน้าเพิ่มขึ้น และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะดำเนินไปจนเข้าสู่สมดุลตามหลักของเลอชาเตอลิเย เมื่อปฏิกิริยาในการสกัดดำเนินไปเรื่อย ๆ ปริมาณของ นีโอติเมียมไอออน  $[Nd^{3+}]_{F,ag}$  ในสารละลายป้อนมีค่าลดลง และในทางตรงกันข้ามปริมาณของไฮโดรเนียมไอออน  $[H^+]_{F,ag}$  ในสารละลายป้อนก็มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการสมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไปข้างหน้าดังสมการที่ 4.6 (Chitra KR. et al. : 1995)

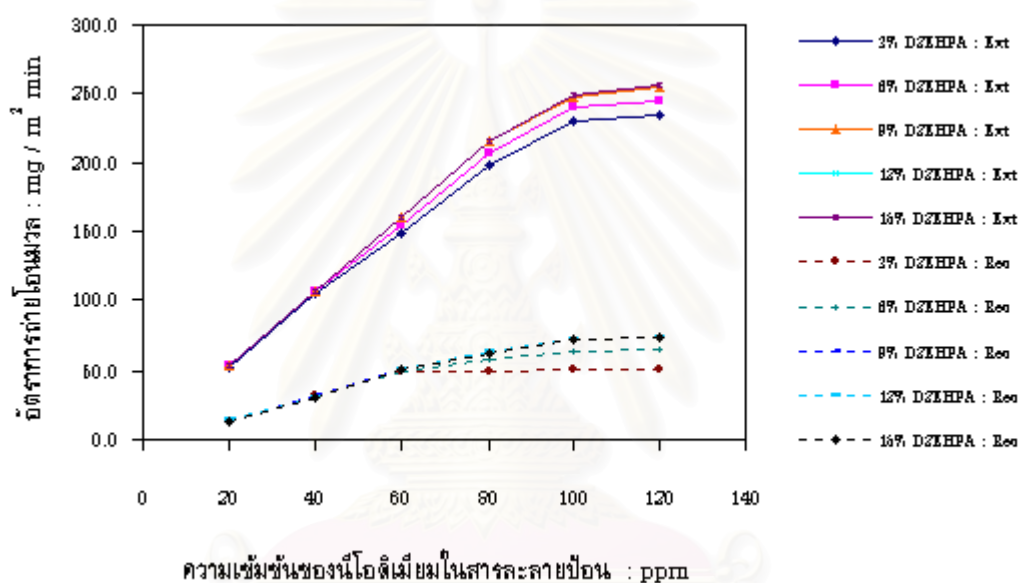
$$K_{ex,F} = \frac{[NdR_3 \cdot 3HR]_{F,org} [H^+]_{F,ag}^3}{[Nd^{3+}]_{F,ag} [(HR)_2]_{F,org}^3} \quad (4.6)$$

ปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้เทอม  $\frac{[NdR_3 \cdot 3HR]_{F,org} [H^+]_{F,ag}^3}{[Nd^{3+}]_{F,ag} [(HR)_2]_{F,org}^3}$  มีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่สมดุล ( $K_{ex,F}$ ) และเมื่อถึงจุดสมดุล เทอมนี้จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่สมดุล

อย่างไรก็ตามในกรณีที่ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าสูงขึ้น (pH 3-4) แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนต่ำแต่กลับได้ค่าร้อยละการสกัดลดลงเนื่องมาจาก สารสกัด D2EHPA ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสารสกัดประเภทที่เป็นกรด (acidic acid) ซึ่งตามคุณสมบัติเฉพาะของตัวนั้นจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับไอออนโลหะในช่วงที่สารละลายมีความเป็นกรดสูง ดังนั้นเมื่อสภาวะของสารละลายป้อนมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น จึงทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดที่ต่ำลง

#### 4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนที่มีต่อการศึกษากการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อน ที่มีต่อการศึกษากการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง จากการทดลองได้ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4-6 (ข้อมูลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ข : ตาราง ข-4 , ข้อมูลอัตราการถ่ายโอนมวลของการสกัดและนำกลับดูได้จากภาคผนวก ค : ตาราง ค-9 (จึงข้อมูลจากตาราง ค-7)



รูปที่ 4-6 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อน (ppm) กับ อัตราการถ่ายโอนมวลของการสกัดและการนำกลับนีโอดีเมียมไอออน ( $\text{mg}/\text{m}^2 \text{ min}$ ) เมื่อ  $[\text{Nd}^{3+}]_F = 20, 40, 60, 80, 100$  และ  $120$  ppm ตามลำดับ,  $[\text{HNO}_3]_S = 0.1 \text{ mol/l}$ ,  $\text{Volume}_F = \text{Volume}_S = 5 \text{ litre}$ ,  $[\text{D2EHPA}] = 3, 6, 9, 12$  และ  $15\%$  (v/v),  $\text{Flow rate}_F = \text{Flow rate}_S = 200 \text{ ml/min}$  โดยการศึกษาการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (Ext = Extract (การสกัด), Rec = Recovery (การนำกลับ))

โดยในการทดลองนี้เตรียมความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ตามลำดับ ปรับความเป็นกรด-ด่างเป็น 3.0 ด้วยกรดไนตริก และสารละลายสตริปความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตรเช่นกัน ในด้านของสารสกัดใช้ D2EHPA ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 3, 6, 9, 12 และ 15% โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งยึดตรึงในรูปพหุคูณของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบสวนทางกันโดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านในของท่อเส้นใยกลวง (tube side) และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกของเส้นใยกลวง (shell side) และควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากันเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-6 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับมีค่าสูงขึ้นตาม แต่เมื่อความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าสูงพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการถ่ายโอนมวลของนีโอดีเมียมไอออนทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับมีค่าน้อยลง ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันนี้ในทุกค่าของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่ใช้ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

จากสมการปฏิริยาการสกัดและการนำกลับของนีโอดีเมียมไอออนด้วยสารสกัด D2EHPA ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.1 (Chitra KR. et al. : 1995) นั้น เมื่อพิจารณาในส่วนของการสกัดพบว่าอัตราการถ่ายโอนมวลของนีโอดีเมียมไอออน แสดงได้ดังสมการที่ 4.7

$$J_f = k_{f,F} [Nd^{3+}]_{F,aq} (HR)_2 \bar{V}_{F,org}^2 - k_{b,F} [NDR]_{F,org} \cdot 3HR \bar{V}_{F,org} [H^+]_{F,aq}^3 \quad (4.7)$$

จากสมการที่ 4.7 เมื่อความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น นั่นคือเทอม  $[Nd^{3+}]_{F,aq}$  มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ความแตกต่างระหว่างนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนและในชั้นฟิล์มบาง ๆ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ให้ค่าอัตราการถ่ายโอนมวลในส่วนของการสกัด ( $Flux_{Extract} : J_f$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่าสูงมากขึ้น ส่งผลต่ออัตรากระจายตัว (distribution ratio) สำหรับขบวนการสกัดไปข้างหน้าซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.8

$$d_f = \frac{[NdR_3 \cdot 3HR]_{f,org}}{[Nd^{3+}]_{F,aq}} \quad (4.8)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.8 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของนีโอติเมียมในสารละลายป้อนมีค่าสูงนั้นคือเทอม  $[Nd^{3+}]_{F,aq}$  มีค่าสูง ทำให้ค่าอัตราการกระจายตัวของนีโอติเมียมไอออนและสารประกอบเชิงซ้อนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวมีค่าลดลง ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลในสถานะที่ความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนมีค่าสูงนั้นมีค่าลดลง สำหรับสถานะต่างกันของสารสกัด D2EHPA นั้นพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เพิ่มขึ้น ก็คือเทอม  $[(HR)_2]_{f,org}$  ในสมการที่ 4.7 มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยนั่นเอง

เมื่อพิจารณาในส่วนของการนำกลับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนมวลกับความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนในดังสมการแสดงการถ่ายโอนนีโอติเมียมไอออนแบบต่อเนื่องจากวัฏภาคสารละลายป้อนเริ่มต้นไปยังวัฏภาคสารละลายสตริปผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวดังนี้

$$J = J_{F,F} - J_{b,F} + J_{b,S} - J_{F,S} \quad (4.9)$$

หรือ

$$J = k_{F,F}[Nd^{3+}]_F[(HR)_2]_{F,org}^3 - k_{b,F}[NdR_3 \cdot 3HR]_{F,org}[H^+]_F^3 + k_{b,S}[NdR_3 \cdot 3HR]_{b,org}[H^+]_S^3 - k_{F,S}[Nd^{3+}]_S[(HR)_2]_{b,org}^3 \quad (4.10)$$

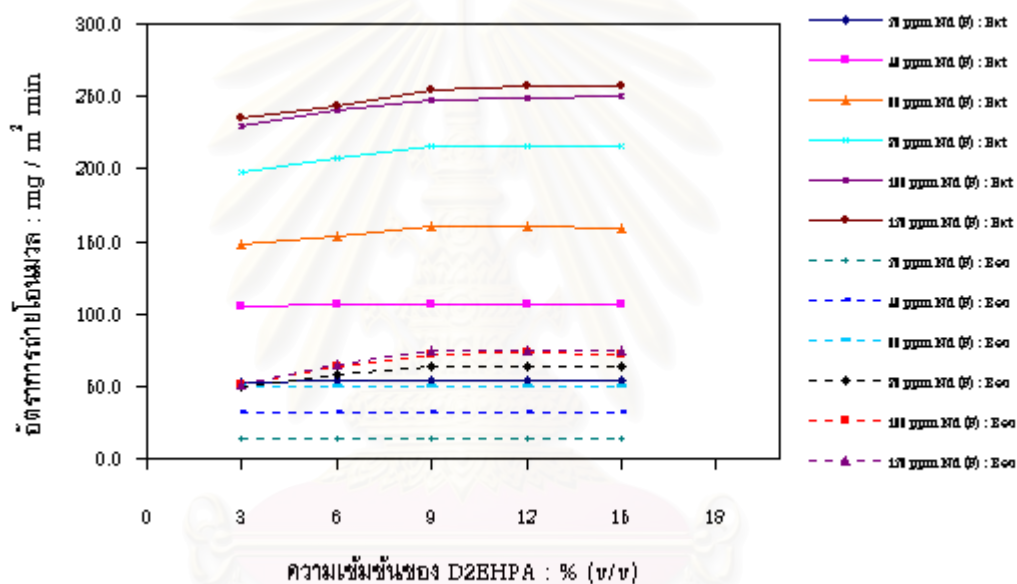
ภายใต้สภาวะขบวนการปฏิบัติแบบต่อเนื่อง(continuous process)ได้ว่า  $[(HR)_2]_{F,org}^3 = [(HR)_2]_{b,org}^3$  และ  $[NdR_3 \cdot 3HR]_{F,org} = [NdR_3 \cdot 3HR]_{b,org}$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการ 4.10 ใหม่ได้ว่า

$$J = [(HR)_2]_{org}^3 (k_{F,F}[Nd^{3+}]_F - k_{F,S}[Nd^{3+}]_S) + [NdR_3 \cdot 3HR]_{org} (k_{b,S}[H^+]_S^3 - k_{b,F}[H^+]_F^3) \quad (4.11)$$

จากสมการที่ 4.11 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น นั่นคือเทอม  $[Nd^{3+}]_{F,org}$  มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลในส่วนของการนำกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตาม และจากผลของอัตราส่วนการกระจายตัวของนีโอติเมียมไอออนและสารประกอบเชิงซ้อน (เช่นเดียวกับที่พิจารณาในส่วนของการสกัด) จึงทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลที่ความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนมีค่าสูงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก เมื่อพิจารณาเทอม  $[(HR)_2]_{org}$  ในสมการ 4.11 พบว่าเมื่อเทอมนี้มีค่าสูงขึ้นนั้นคือความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีค่าสูงขึ้น ก็ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

#### 4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการศึกษาการสกัดนิกเกิลโดยวิธีไฮดรอกไซด์โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการศึกษาการสกัดนิกเกิลโดยวิธีไฮดรอกไซด์โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง จากการทดลองได้ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4-7 (ข้อมูลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ข : ตาราง ข-4 , ข้อมูลอัตราการถ่ายโอนมวลของการสกัดและนำกลับดูได้จากภาคผนวก ค : ตาราง ค-9 (อิงข้อมูลจากตาราง ค-7) )



รูปที่ 4-7 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA (% โดยปริมาตร) กับ อัตราการถ่ายโอนมวลของการสกัดและการนำกลับนิกเกิลไฮดรอกไซด์ (mg/m<sup>2</sup> min) เมื่อ  $[Nd^{3+}]_F = 20, 40, 60, 80, 100$  และ  $120$  ppm ตามลำดับ,  $[HNO_3]_S = 0.1$  mol/l ,  $Volume_F = Volume_S = 5$  litre ,  $[D2EHPA] = 3, 6, 9, 12$  และ  $15\%$  (v/v) ,  $Flow\ rate_F = Flow\ rate_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน ( Ext = Extract (การสกัด) , Rec = Recovery (การนำกลับ) )

โดยในการทดลองนี้เตรียมความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ตามลำดับ ปรับความเป็นกรด-ด่างเป็น 3.0 ด้วยกรดไนตริก และสารละลายสตริปความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตรเช่นกัน ในด้านของสารสกัดใช้ D2EHPA ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 3, 6, 9, 12 และ 15% โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งยึดตรึงในรูปพหุคูณของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบสวนทางกันโดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านในของท่อเส้นใยกลวง (tube side) และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกของเส้นใยกลวง (shell side) และควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากันเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-7 เมื่อพิจารณาในช่วงของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมมีค่าน้อย พบว่าอัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับมีค่าแตกต่างกันไม่มาก ตลอดช่วงของความเข้มข้นของสารสกัดที่พิจารณา แต่เมื่อความเข้มข้นของนีโอดีเมียมในสารละลายป้อนที่ค่าสูงขึ้น พบว่าอัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับแปรเปลี่ยนตามความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA โดยที่อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่ค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีค่ามากกว่า 9% โดยปริมาตร ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เพิ่มขึ้น นั่นคือเทอม  $[(HR)_2]_{org}$  ทั้งในสมการที่ 4.7 และสมการที่ 4.11 (หัวข้อ 4.4) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตาม แต่ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีค่าสูง ทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืด (viscosity) สูงขึ้นด้วย เพราะค่าความหนืดของสารสกัดชนิดที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมักจะมีค่าสูงกว่าตัวทำละลาย จึงมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ของสารประกอบเชิงซ้อนของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายมีค่าลดลงดังแสดงด้วยสมการของ Nernst (Schulz, 1988 : 194) ดังนี้

$$D = \frac{RT}{6\pi\eta r} \quad (4.12)$$

เมื่อ  $T$  คืออุณหภูมิของสารละลาย ,  $\eta$  คือค่าความหนืดของสารละลาย ,  $r$  คือขนาดโมเลกุลของสารที่แพร่

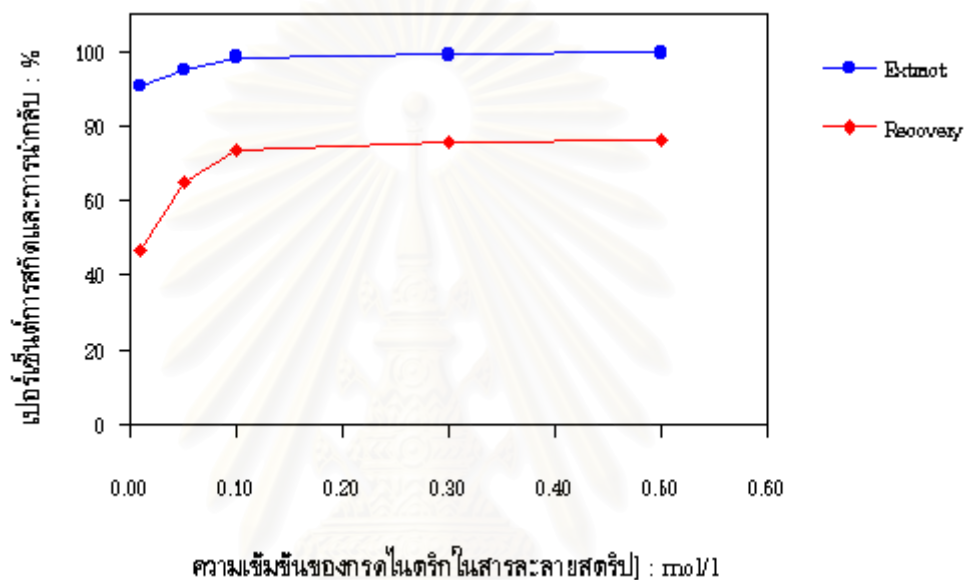
จากสมการที่ 4.12 เห็นได้ว่าค่าความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่ลดลงเนื่องมาจากความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เพิ่มขึ้น มีผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าลดลงเช่นกัน ดังนั้นจึงได้อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าคงที่ในช่วงที่สารสกัด D2EHPA มีความเข้มข้นสูง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง จากการทดลองได้ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4-8 (ข้อมูลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ข : ตาราง ข-5 , ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับดูได้จากภาคผนวก ค : ตาราง ค-5)



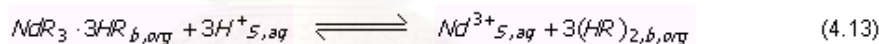
รูปที่ 4-8 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริป (โมลต่อลิตร) กับ เปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับของนีโอดีเมียมไอออน (%) สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริปตามลำดับ เมื่อ  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm ,  $[HNO_3]_S = 0.01, 0.05, 0.1, 0.3$  และ  $0.5$  mol/l ,  $Volume_F = Volume_S = 5$  litre ,  $[D2EHPA] = 9\%$  (v/v) ,  $Flow\ rate_F = Flow\ rate_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน



โดยในการทดลองนี้เตรียมความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างเป็น 3.0 ด้วยกรดไนตริกตามลำดับ และสารละลายสตริปมีความเข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1, 0.3 และ 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตรเช่นกันตามลำดับ ในด้านของสารสกัดใช้ D2EHPA ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 9% โดยปริมาตร ซึ่งยึดตรึงในรูปพหุอนุภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบสวนทางกันโดยให้สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านในของท่อเส้นใยกลวง (tube side) และให้สารละลายสตริปไหลเข้าทางด้านนอกของเส้นใยกลวง (shell side) และควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเท่ากันเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-8 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดมีค่ามากขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปมีค่ามาก ความแตกต่างของค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดมีน้อยลง ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

จากสมการที่ 4.1 พิจารณาที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริปพบว่า มีขบวนการในการนำกลับเกิดขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ 4.13 (Chitra KR. et al. : 1995)



โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับดังสมการที่ 4.14 (Kataoka et al. : 1995)

$$r_b = k_b \left( [NdR_3 \cdot 3HR]_{b,org} - \frac{K_{ex} [Nd^{3+}]_s [(HR)_2]_{b,org}^3}{[H^+]_s^3} \right) \quad (4.14)$$

จากสมการที่ 4.14 เมื่อพิจารณารูปที่ 4-8 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น นั่นคือเทอม  $[H^+]_{s,aq}$  ในสมการที่ 4.14 มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราของการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับเพิ่มขึ้น และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะดำเนินไปจนเข้าสู่สมดุลตามหลักของเลอชาเตอลิเย เมื่อปฏิกิริยาในการนำกลับดำเนินไปเรื่อย ๆ ปริมาณของนีโอดีเมียมไอออน  $[Nd^{3+}]_{s,aq}$  ในสารละลายสตริปมีค่าเพิ่มขึ้น และในทางตรงกันข้ามปริมาณของไฮโดรเนียมไอออน  $[H^+]_{s,aq}$  ในสารละลายสตริปก็มีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการสมดุลของปฏิกิริยาการนำกลับดังสมการที่ 4.15 (Chitra KR. et al. : 1995)

$$K_{ex,b} = \frac{[Nd^{3+}]_s [(HR)_2]_{b,org}^3}{[NdR_3 \cdot 3HR]_{b,org} [H^+]_{s,aq}^3} \quad (4.15)$$

ปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายสตริปที่ลดลง ทำให้เทอม

$$\frac{[Nd^{3+}]_{S,aq} [(HR)_2]_{b,org}^3}{[NdR_3 \cdot 3HR]_{b,org} [H^+]_{S,aq}^3}$$

มีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่สมดุล ( $K_{ex,b}$ ) และเมื่อถึงจุดสมดุล เทอมนี้จะมี

ค่าเท่ากับค่าคงที่สมดุล ที่จุดสมดุลนี้เทอม  $\frac{[Nd^{3+}]_{S,aq}}{[H^+]_{S,aq}}$  ซึ่งเป็นคู่อิออนที่แพร่สวนทางกันมีค่า

มาก และเทอม  $\frac{[(HR)_2]_{b,org}^3}{[NdR_3 \cdot 3HR]_{b,org}}$  มีค่าน้อย เมื่อพิจารณาถึงการลำเลียงไอออนจากวัฏภาค

สารละลายป้อนไปยังวัฏภาคสารละลายสตริปโดยผ่านเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งเป็นขบวนการ

แบบต่อเนื่องนั้นได้ว่า ภายใต้สภาวะขบวนการปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง (continuous process) ได้

ว่า  $[(HR)_2]_{f,org}^3 = [(HR)_2]_{b,org}^3$  และ  $[NdR_3 \cdot 3HR]_{f,org} = [NdR_3 \cdot 3HR]_{b,org}$  (Chitra KR. et al. :

1995) ดังนั้นเมื่อเทอม  $\frac{[(HR)_2]_{b,org}^3}{[NdR_3 \cdot 3HR]_{b,org}}$  ในสมการสมดุลการนำกลับมีค่าน้อย สัดส่วนกลับ

ของเทอมนี้จึงมีค่ามาก ซึ่งมีผลต่อสมการสมดุลของการสกัด (สมการที่ 4.6) ทำให้ขบวนการ

สกัดเกิดมากขึ้นส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดที่มากขึ้นตาม แต่เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริก

ในสารละลายสตริปมีค่ามาก อิทธิพลของอัตราการกระจายตัว (distribution ratio) ที่บริเวณ

ผิวสัมผัสมีมากขึ้นดังสมการที่ 4.16

$$d_b = \frac{[NdR_3 \cdot 3HR]_{b,org}}{[Nd^{3+}]_{S,aq}} = \frac{1}{K_{ex,b}} \frac{[(HR)_2]_{b,org}^3}{[H^+]_{S,aq}^3} \quad (4.16)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.16 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปมีค่าสูง นั้น

คือเทอม  $[H^+]_{S,aq}$  มีค่าสูง ทำให้ค่าอัตราการกระจายตัวของนีโอดีเมียมไอออนและสารประกอบ

เชิงซ้อนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริปมีค่าลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพ

การนำกลับและประสิทธิภาพการสกัดในสภาวะที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปมีค่า

สูงนั้นมีค่าลดลง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาถึงการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยที่สารละลายป้อนที่ใช้เป็นสารละลายนีโอดีเมียมไอออน, สารละลายสไตริปเป็นสารละลายของกรดไนตริก และสารสกัดที่ใช้เป็น D2EHPA ในเคโรซีน โดยปฏิบัติการเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว แบบสวนทางกันที่อัตราการไหลของสารละลายทั้งสองฝั่งเป็น 200 มิลลิลิตรต่อนาที นำมาสู่ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ในการศึกษาถึงการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ประสิทธิภาพในการลำเลียงนีโอดีเมียมไอออนจากภูมิภาคสารละลายป้อนไปยังภูมิภาคสารละลายสไตริปโดยผ่านเยื่อแผ่นเหลวของสารสกัด D2EHPA (di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid) ในเคโรซีนนั้น แปรเปลี่ยนตามเวลา โดยเมื่อเวลาในการปฏิบัติมากขึ้นประสิทธิภาพในการลำเลียงนี้มีค่ามากขึ้น แต่เมื่อเวลาในการปฏิบัติมากกว่า 20 นาที ประสิทธิภาพในการลำเลียงนีโอดีเมียมไอออนมีค่าคงที่ ซึ่งพิจารณาได้เทียบเท่ากับปริมาตรของสารละลาย 4 ลิตร ดังนั้น ปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายสไตริปเท่ากับ 5 ลิตร จึงเป็นปริมาตรที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
2. จากผลของประสิทธิภาพในการสกัดและนำกลับนีโอดีเมียมไอออน ประกอบกับความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ ได้ว่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงอยู่ในช่วง 3% ถึง 15% โดยปริมาตร
3. ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีผลต่อการศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยที่ประสิทธิภาพในการสกัดนีโอดีเมียมลดลงตามค่าของความเป็นกรด-ด่างที่ลดลงเมื่อพิจารณาในช่วงความเป็นกรด-ด่าง 2-3 แต่สำหรับช่วงความเป็นกรด-ด่างมีค่ามากกว่า 3 ประสิทธิภาพในการสกัดนีโอดีเมียมลดลงเมื่อค่าของความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการสกัดนีโอดีเมียมมีค่ามากที่สุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3

4. ความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออัตราการถ่ายโอนมวล โดยที่อัตราการถ่ายโอนมวลที่เพิ่มขึ้นแปรตามความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายโอนมวลจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่ามากกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน
5. ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาศักดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเท่ากับ 9% โดยปริมาตร โดยให้ผลของอัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในด้านการสกัดและการนำกลับ (ที่ความเข้มข้นของนีโอดีเมียมในสารละลายป้อนเท่ากับ 100 ส่วนในล้านส่วน) เท่ากับ 246.991 และ 72.194 มิลลิกรัม/เมตร<sup>2</sup> นาที ตามลำดับ
6. ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริปเกิดมากขึ้น และสำหรับการปฏิบัติการแบบต่อเนื่องจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาการสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเพิ่มขึ้น โดยในช่วงความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.01 ถึง 0.1 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปมีค่ามากกว่า 0.1 โมลต่อลิตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสารสกัดและนำกลับเมื่อใช้สารสกัดที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาหาสารสกัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
2. ควรทำการศึกษาถึงผลของสารละลายสตริปเมื่อใช้กรดต่างชนิดกัน เพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมของสารละลายสตริปต่อการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
3. ในงานวิจัยนี้การคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนมวลของการทดลอง ใช้พื้นที่การถ่ายโอนมวลจากพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพจากคุณลักษณะที่ระบุไว้ของชุดทดลอง ดังนั้นจึงไม่ใช่พื้นที่การถ่ายโอนมวลที่แท้จริงของกระบวนการ แต่ผลของค่าอัตราการถ่ายโอนมวลจากการคำนวณดังกล่าวจะเป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาแนวโน้มของผลที่ได้จากการปฏิบัติการต่อไป

4. ควรทำการศึกษาถึงผลของอัตราการใช้ของสารละลายที่แตกต่างกัน  
ประสิทธิภาพในการนำกลับไนโตรเจนไอออนที่ดีที่สุด

เพื่อให้ได้มาซึ่ง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

จดหมายข่าว, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 1995, ปีที่ 2 ฉบับ 1-4.

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

เดชณา ชุตินารา., โลหะกับประโยชน์, กองโลหกรรม ฝ่ายเผยแพร่และประชาสัมพันธ์ สำนักงานเลขาธิการกรมทรัพยากรธรณี., 1993 : 246-259.

ไพศาล อภินพพัฒน์. 1998. การสกัดและการนำกลับโครเมตด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในห่อเดี่ยว. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

แม่น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. 1992. อัลตราไวโอเล็ตและวิธีเบิลสเปกโทรสโกปี. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ : 33-107.

วีรวัดณ์ ปัตทวิคงคา. 1998. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติกกับไซเดียมอะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อิสรา เกษมเศรษฐ. 1998. การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายเจือจางมากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารเผยแพร่, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ.

### ภาษาอังกฤษ

Balies, P.J., Hanson, C., and Hughes, M.A. 1976. Liquid-Liquid Extraction, metal university of Bradford (Great Britain). Originally published August 30 : 239-246.

Barnes D.E., Marshall G.D., Marshall J.F., Van S. 1995. Rapid Optimization of Chemical Parameters Affecting Supported Liquid Membranes. Separation Science and Technology 28(13&14) : 2149-2165.

Chitra KR., Gaikwad AG., Surender GD., Damodaran AD. 1995. Studies on Kinetics of Forward and Backward Extraction of Neodymium by Using Phosphonic acid monoester as an acidic extractant. Chemical Engineering Journal and The Biochemical Engineering Journal 60 : 63-73.

- Dean, J.A. 1992. Lange's Handbook of Chemistry. 4<sup>th</sup> ed. McGRAW-HILL.
- Draxler, J., Furst, W., and Marr, R. 1988. Separation of metal species by emulsion liquid membrane. Journal of Membrane Science 38 : 281-293.
- Fernandez, L., Aparicio, J., and Muhammed, M. 1987. The role of feed metal concentration in the coupled transport of zinc through a bis-(2-ethylhexyl)phosphoric acid solid supported liquid membranes from aqueous perchlorate media. Separation Science and Technology 22(6) : 1575-1593.
- Gu, Z. 1990. A new liquid membrane technology-electrostatic pseudo liquid membrane. Journal of Membrane Science 52 : 77-88.
- Gu, Z. 1992. Electrostatic Pseudo-Liquid-Membrane. In W.S. Winston Ho and K.K. Sirkar (eds.) Membrane Handbook : 867-884. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Ho, W.S. W., and Li, N.N. 1992. Emulsion Liquid Membrane ; Definitions. In W.S. Winston Ho and K.K. Sirkar (eds.) Membrane Handbook : 597-610. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Huang, T.C., and Juang, R.S. 1987. Transport of Zinc through a Supported Liquid Membrane using Di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid as a mobile carrier. Journal of Membrane Science 31 : 209-226.
- Izatt, R.M., Lamb, J.D., and Bruening, R.L. 1988. Comparison of Bulk, Emulsion, Thin Sheet Supported, and Hollow Fiber Supported Liquid Membranes in macrocycle-Mediated Cation Separation. Separation Science and Technology 23(12&13) : 1645-1658.
- Jianhan, Y., Shizhu, W., Nianci, M., and Changyin, J. 1987. Extraction of Zinc in an Oldshue-Rudston Column by Liquid Surfactant Membrane. Desalination 62 : 315-321.
- Jianhan, Y., and Cangmin, Y. 1988. Zinc recovery with the membrane based solvent extraction method. Water Treatment 3 : 87-97.

- Kataoka, T., Nishiki, T., and Muto, A. 1995. Permeation of Lanthanum through Supported Liquid Membranes. Separation Science and Technology 30(4) : 621-636.
- Kubota, F., Goto, M., and Nakashio, F. 1995. Extraction Kinetics of Rare Earth Metals with 2-Ethylhexyl Phosphonic Acid Mono-2-ethylhexyl Ester Using a Hollow Fiber Membrane Extractor. Separation Science and Technology 30(5) : 777-792.
- Lange, N.A., and Forker, G.M. 1967. Handbook of Chemistry 10<sup>th</sup> ed. McGRAW-HILL.
- Lise D., Cussler E.L. 1988. Protein Extractions with Hollow Fiber. AIChE J. 34(1) : 130-136.
- Loiacono, O., Drioli, E., and Molinari, R. 1986. Metal Ions Separation and Concentration with Supported Liquid Membranes. Journal of Membrane Science 28 : 123-138.
- Mark, C. Porter. 1990. Handbook of Industrial Membrane Technology : 547-552.
- Milanova M., Horozov T., Nikolov A., Todorovsky D. 1993. On the Liquid Membrane Extraction of Lanthanum and Neodymium. Separation Science and Technology 28(8) : 1641-1646.
- Moreno C., Hrdlicka A., Valiente M. 1993. Permeation of Neodymium and Praseodymium Through Supported Liquid Membranes Containing Di-(2-Ethylhexyl)phosphoric acid as a carrier. Journal of Membrane Science 81(1-2) : 121-126.
- Nakashio, F. 1993. Recent Advances in Separation of Metals by Liquid Surfactant Membranes. Journal of Chemical Engineering of Japan 26(2) : 123-133.
- Nopphakorn Thamphiphit. 1996. Batch Extraction of Cobalt Ions in Hydrochloric acid Solution with a Hollow Fiber Supported Liquid Membrane in a Single column. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Plucinski, P., and Nitsch, W. 1988. The Calculation of Permeation Rates Through Supported Liquid Membranes based on the Kinetics of Liquid-Liquid Extraction. Journal of Membrane Science 39 : 43-59.



- Porter, M.C. 1990. Handbook of Industrial Membrane Technology New Jersey : Noyes Publication.
- Rautenbach, R., and Machhammer, O. 1988. Modelling of Liquid Membrane Separation Processes. Journal of Membrane Science 39 : 425-444.
- Saito, T. 1994. Selective Transport of Copper (I,II), Cadmium(II), and Zinc(II) Ions Thorough a Supported Liquid Membrane Containing Bathoeuprcine, Neoeuproine, or Bathophenanthroline. Separation Science and Technology 29(10) : 1335-1346.
- Savvin S.B. 1961. Analytical Use of Arsenazo III Determination of Thorium, Zirconium, Uranium and Rare Earth Elements. Talanta 8 : 673-685.
- Schulz, G. 1988. Separation Techniques with Supported Liquid Membranes. Desalination 68 : 191-202.
- Scott, K. 1995. Handbook of Industrial Membranes Oxford : Elsevier Science Publishers Ltd.
- Sengupta, A., Basu, R., and Sirka, K.K. 1988. Separation of Solutes From Aqueous Solutions by Contained Liquid Membranes. AIChE Journal 34(10) : 1698-1708.
- Tanigaki, M., Shiode, T., Ueda, M., and Eguchi, W. 1988. Facilitated Transport of Zinc Chloride Through Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Part I. Transport Mechanism. Separation Science and Technology 23(10&11) : 1145-1159.
- Tanigaki, M., Ueda, M., and Eguchi, W. 1988. Facilitated Transport of Zinc Chloride Through Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Part 2. Membrane Stability. Separation Science and Technology 23(10&11) : 1161-1169.
- Tanigaki, M., Shiode, T., Okumi, S., and Eguchi, W. 1988. Facilitated Transport of Zinc Chloride Through Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Part 3. Module Operation. Separation Science and Technology 23(10&11) : 1171-1181.
- Tavlarides, L.L., Bae, J.H., and Lee, C.K. 1987. Solvent Extraction, Membranes, and Ion Exchange in Hydrometallurgical Dilute Metals Separation. Separation Science and Technology 22(2&3) : 581-617.

- Teramoto, M., Matsuyama, H., Takaya, H., and Asano, S. 1987. Development of Spiral-Type Supported Liquid Membrane for Separation and Concentration of Metal Ions. Separation Science and Technology 22(11) : 2175-2201.
- Xingrong Liu, and Xiujuan Zhang. 1997. Simplified Model For Extraction of Rare-Earth Ions Using Emulsion Liquid Membrane. Journal of Membrane Science 128 : 223-229.
- Yang, Z., Guha, A.K., and Sirkar, K.K. 1996. Novel Membrane-Based Synergistic Metal Extraction and Recovery Processes. Industrial Engineering Chemistry Research 35 : 1383-1394.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลการเทียบมาตรฐานการวัดอัตราการไหลของชุดทดลอง

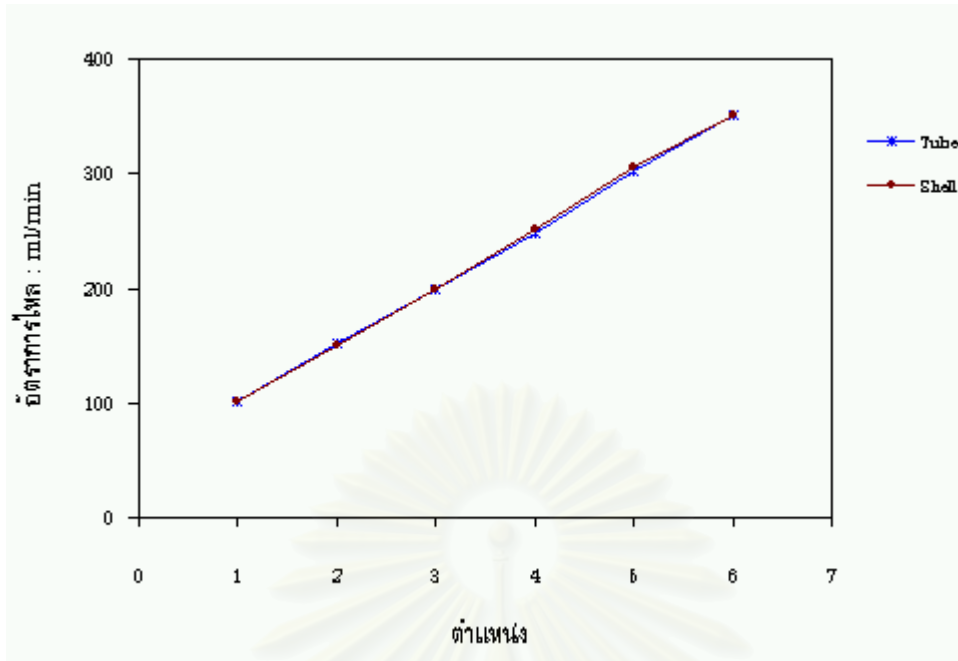
ตาราง ข-1 แสดงข้อมูลการเทียบมาตรฐานการวัดอัตราการไหลภายในเส้นใยกลวงในชุดทดลอง

(Tube Side)

FEED (Tube Side)						
ตำแหน่ง	ปริมาตร (ml)	เวลา (วินาที)				อัตราการไหล (ml/min)
		# 1	# 2	# 3	<ave>	
1	10	5.96	5.95	6.01	5.97	100.50
2	20	7.92	7.90	7.95	7.92	151.52
3	20	6.11	5.91	6.00	6.01	199.67
4	20	4.86	4.79	4.85	4.83	248.45
5	20	3.93	3.95	4.00	3.96	303.03
6	20	3.40	3.43	3.41	3.41	351.91

ตาราง ข-2 แสดงข้อมูลการเทียบมาตรฐานการวัดอัตราการไหลภายนอกเส้นใยกลวงในชุดทดลอง (Shell Side)

STRIP (Shell Side)						
ตำแหน่ง	ปริมาตร (ml)	เวลา (วินาที)				อัตราการไหล (ml/min)
		# 1	# 2	# 3	<ave>	
1	10	5.87	5.86	6.02	5.92	101.35
2	20	7.95	7.98	7.96	7.96	150.75
3	20	6.05	6.03	5.99	6.02	199.34
4	20	4.78	4.79	4.77	4.78	251.05
5	20	3.90	3.91	3.95	3.92	306.12
6	20	3.42	3.43	3.41	3.42	350.88



รูปที่ ก-1 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานการวัดอัตราการไหลทั้งภายในและภายนอกเส้นใยกลางของชุดทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 แสดงข้อมูลการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดนีโอดีเมียม และหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับสารละลายป้อนและสารละลายสตริป

Time of sampling min	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	[Nd] จาก CC ppm	Volume ml	[Nd] ppm	
blank	0.142 ---> set auto zero							
Feed	initial	1.811	1.811	1.811	1.811	5.997	1.5	99.945
	5	0.011	0.011	0.011	0.011	0.036	5	0.182
	10	0.013	0.013	0.013	0.013	0.043	5	0.215
	15	0.012	0.012	0.012	0.012	0.040	5	0.199
	20	0.011	0.011	0.011	0.011	0.036	5	0.182
	30	0.025	0.025	0.025	0.025	0.083	10	0.207
	40	0.028	0.028	0.028	0.028	0.093	10	0.232
	final	0.030	0.030	0.030	0.030	0.099	10	0.248
Strip	initial	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2	0.000
	5	0.867	0.867	0.867	0.867	2.871	2	35.886
	10	1.115	1.115	1.115	1.115	3.692	2	46.151
	15	1.373	1.373	1.373	1.373	4.546	2	56.829
	20	1.490	1.490	1.490	1.490	4.934	2	61.672
	30	1.508	1.508	1.508	1.508	4.993	2	62.417
	40	1.509	1.509	1.509	1.509	4.997	2	62.459
	final	1.510	1.510	1.510	1.510	5.000	2	62.500

:  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm,  $[HNO_3]_S = 0.1$  M,  $V_F = V_S = 10$  litre,  $[D2EHPA] = 20\%$  (v/v),  $Q_F = Q_S = 200$  ml/min

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

ตาราง ข-2 แสดงข้อมูลการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมต่อการสกัดนีโอดิเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

[D2EHPA] % (v/v)		Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	[Nd <sup>3+</sup> ] จาก CC ppm	Volume ml	[Nd <sup>3+</sup> ] ppm	
blank		0.148 ---> set auto zero							
Feed	Initial	0.638	0.638	0.638	0.638	2.100	0.6	87.503	
	Final	3	0.425	0.426	0.425	0.425	1.400	5	7.000
		6	0.425	0.425	0.427	0.426	1.401	10	3.503
		9	0.128	0.128	0.129	0.128	0.422	10	1.056
		12	0.046	0.046	0.046	0.046	0.151	10	0.379
		15	0.014	0.014	0.014	0.014	0.046	10	0.115
		20	0.001	0.001	0.001	0.001	0.007	10	0.017
Strip	Initial	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	-0.002	10	-0.005	
	Final	3	0.555	0.555	0.556	0.555	1.828	1	45.699
		6	0.699	0.699	0.698	0.699	2.300	1	57.494
		9	0.786	0.786	0.786	0.786	2.587	1	64.681
		12	0.790	0.790	0.790	0.790	2.600	1	65.010
		15	0.793	0.793	0.793	0.793	2.609	1	65.233
		20	0.795	0.795	0.796	0.795	2.618	1	65.449

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub> = 100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub> = 0.1 M, V<sub>F</sub> = V<sub>S</sub> = 5 lit, [D2EHPA] = 3-20% (v/v), Q<sub>F</sub> = Q<sub>S</sub> = 200 ml/min

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-3 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่มีต่อ การศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1. pH Feed = 2

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	[Nd <sup>3+</sup> ] จาก CC ppm	Volume ml	[Nd <sup>3+</sup> ] ppm	PH	
Blank	0.147 ---> set auto zero								
F(initial)	0.621	0.621	0.620	0.621	2.043	0.6	85.125	2.07	
F(final)	3	0.964	0.963	0.964	0.964	3.172	3	26.434	2.05
	6	0.496	0.496	0.496	0.496	1.633	3	13.605	2.03
	9	0.826	0.826	0.827	0.826	2.720	10	6.800	2.04
	12	0.357	0.357	0.356	0.357	1.174	10	2.935	2.05
	15	0.165	0.165	0.164	0.165	0.542	10	1.355	2.06
S(initial)	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	-0.002	10	-0.005	1.36	
S(final)	3	0.680	0.680	0.680	0.680	2.238	1	55.958	1.38
	6	0.704	0.704	0.704	0.704	2.317	0.8	72.416	1.38
	9	0.702	0.702	0.702	0.702	2.311	0.8	72.210	1.37
	12	0.682	0.682	0.682	0.682	2.245	0.8	70.153	1.37
	15	0.676	0.676	0.677	0.676	2.226	0.8	69.570	1.38

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub> = 100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub> = 0.1 M, V<sub>F</sub> = V<sub>S</sub> = 5 lit, [D2EHPA] = 3-15% (v/v), Q<sub>F</sub> = Q<sub>S</sub> = 200 ml/min

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง ข-3 (ต่อ) :

2. pH Feed = 2.5

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	[Nd <sup>3+</sup> ] จาก CC ppm	Volume ml	[Nd <sup>3+</sup> ] ppm	pH	
blank	0.148 ---> set auto zero								
F(initial)	0.655	0.655	0.656	0.655	2.157	0.6	89.880	2.56	
F(final)	3	0.762	0.762	0.761	0.762	2.507	5	12.536	2.47
	6	0.864	0.864	0.865	0.864	2.845	10	7.113	2.46
	9	0.548	0.548	0.547	0.548	1.803	10	4.507	2.46
	12	0.062	0.062	0.062	0.062	0.204	10	0.510	2.46
	15	0.020	0.020	0.020	0.020	0.066	10	0.165	2.46
S(initial)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10	0.000	1.37	
S(final)	3	0.725	0.726	0.726	0.726	2.389	0.8	74.645	1.40
	6	0.728	0.728	0.728	0.728	2.396	0.8	74.885	1.38
	9	0.677	0.676	0.677	0.677	2.227	0.8	69.604	1.38
	12	0.655	0.655	0.655	0.655	2.156	0.8	67.376	1.38
	15	0.642	0.642	0.643	0.642	2.114	0.8	66.073	1.38

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub> = 100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub> = 0.1 M, V<sub>F</sub> = V<sub>S</sub> = 5 lit, [D2EHPA] = 3-15% (v/v), Q<sub>F</sub> = Q<sub>S</sub> = 200 ml/min

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-3 (ต่อ) :

3. pH Feed = 3

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	[Nd] <sup>3+</sup> จาก CC ppm	Volume ml	[Nd <sup>3+</sup> ] ppm	pH	
blank	0.148 ---> set auto zero								
F(initial)	0.638	0.638	0.638	0.638	2.100	0.6	87.503	3.03	
F(final)	3	0.425	0.426	0.425	0.425	1.400	5	7.000	2.91
	6	0.426	0.426	0.427	0.426	1.403	10	3.508	2.90
	9	0.213	0.212	0.213	0.213	0.700	10	1.750	2.88
	12	0.046	0.046	0.046	0.046	0.151	10	0.379	2.88
	15	0.014	0.014	0.014	0.014	0.046	10	0.115	2.89
S(initial)	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	-0.002	10	-0.005	1.39	
S(final)	3	0.555	0.555	0.556	0.555	1.828	1	45.699	1.40
	6	0.699	0.699	0.698	0.699	2.300	1	57.494	1.40
	9	0.786	0.786	0.786	0.786	2.587	1	64.681	1.40
	12	0.795	0.796	0.795	0.795	2.618	1	65.449	1.40
	15	0.790	0.790	0.790	0.790	2.600	1	65.010	1.41

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-3 (ต่อ) :

4. pH Feed = 3.5

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	[Nd <sup>3+</sup> ] จาก CC ppm	Volume ml	[Nd <sup>3+</sup> ] ppm	pH	
blank	0.147 ---> set auto zero								
F(initial)	0.649	0.649	0.648	0.649	2.135	0.6	88.966	3.49	
F(final)	3	0.221	0.221	0.221	0.221	0.727	0.8	22.733	3.33
	6	0.142	0.142	0.142	0.142	0.467	0.9	12.984	3.02
	9	0.420	0.421	0.421	0.421	1.385	10	3.462	3.02
	12	0.110	0.110	0.111	0.110	0.363	10	0.908	3.01
	15	0.098	0.098	0.098	0.098	0.323	10	0.806	3.03
S(initial)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10	0.000	1.36	
S(final)	3	0.400	0.399	0.400	0.400	1.316	10	3.289	1.38
	6	0.540	0.540	0.540	0.540	1.777	6	7.406	1.37
	9	0.699	0.700	0.700	0.700	2.303	0.9	63.974	1.37
	12	0.758	0.758	0.758	0.758	2.495	0.9	69.307	1.37
	15	0.726	0.726	0.727	0.726	2.391	0.9	66.412	1.38

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub> = 100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub> = 0.1 M, V<sub>F</sub> = V<sub>S</sub> = 5 lit, [D2EHPA] = 3-15% (v/v), Q<sub>F</sub> = Q<sub>S</sub> = 200 ml/min

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-3 (ต่อ) :

5. pH Feed = 4

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	[Nd <sup>3+</sup> ] จาก CC ppm	Volume ml	[Nd <sup>3+</sup> ] ppm	pH	
blank	0.147 ---> set auto zero								
F(initial)	0.648	0.647	0.648	0.648	2.132	0.6	88.829	4.07	
F(final)	3	0.622	0.622	0.622	0.622	2.047	1	51.185	3.36
	6	0.626	0.626	0.627	0.626	2.062	2.5	20.617	3.08
	9	0.323	0.323	0.324	0.323	1.064	5	5.321	2.96
	12	0.182	0.182	0.183	0.182	0.600	5	3.001	2.96
	15	0.149	0.149	0.150	0.149	0.492	5	2.458	2.96
S(initial)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10	0.000	1.35	
S(final)	3	0.697	0.697	0.697	0.697	2.294	4	14.339	1.37
	6	0.702	0.702	0.701	0.702	2.310	1.5	38.494	1.37
	9	0.767	0.767	0.767	0.767	2.525	1	63.117	1.38
	12	0.786	0.786	0.786	0.786	2.587	1	64.681	1.38
	15	0.773	0.772	0.772	0.772	2.542	1	63.556	1.37

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub> = 100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub> = 0.1 M, V<sub>F</sub> = V<sub>S</sub> = 5 lit, [D2EHPA] = 3-15% (v/v), Q<sub>F</sub> = Q<sub>S</sub> = 200 ml/min

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-4 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมโดยเชื้อแผ่นเห็ดที่พวงด้วยเส้นใยกลวง

1.  $[\text{Nd}^{3+}]_{\text{Feed}} = 20 \text{ ppm}$

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	$[\text{Nd}^{3+}]$ จาก CC ppm	Volume ml	$[\text{Nd}^{3+}]$ ppm	
blank	0.146 ----> set auto zero							
F(initial)	0.697	0.697	0.697	0.697	2.294	3	19.119	
F(final)	3	0.081	0.079	0.080	0.080	0.263	10	0.658
	6	0.007	0.007	0.007	0.007	0.023	10	0.058
	9	0.011	0.010	0.010	0.010	0.034	10	0.085
	12	0.008	0.007	0.007	0.007	0.024	10	0.060
	15	0.014	0.013	0.014	0.014	0.045	10	0.112
S(initial)	0.000	0.001	-0.001	0.000	0.000	10	0.000	
S(final)	3	0.590	0.590	0.590	0.590	1.942	4	12.138
	6	0.573	0.572	0.572	0.572	1.884	4	11.774
	9	0.592	0.592	0.592	0.592	1.949	4	12.179
	12	0.604	0.604	0.603	0.604	1.987	4	12.419
	15	0.577	0.578	0.577	0.577	1.900	4	11.877

:  $[\text{Nd}^{3+}]_{\text{F}} = 20 \text{ ppm}$ ,  $[\text{HNO}_3]_{\text{S}} = 0.1 \text{ M}$ ,  $V_{\text{F}} = V_{\text{S}} = 5 \text{ lit}$ ,  $[\text{D2EHPA}] = 3\text{-}15\%(\text{v/v})$ ,  $Q_{\text{F}} = Q_{\text{S}} = 200 \text{ ml/min}$   
 โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-4 (ต่อ) :

2.  $[\text{Nd}^{3+}]_{\text{Feed}} = 40 \text{ ppm}$

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	$[\text{Nd}^{3+}]$ จาก CC ppm	Volume ml	$[\text{Nd}^{3+}]$ ppm	
blank	0.147 ---> set auto zero							
F(initial)	0.682	0.683	0.682	0.682	2.246	1.5	37.433	
F(final)	3	0.083	0.083	0.083	0.083	0.273	10	0.683
	6	0.006	0.005	0.005	0.005	0.018	10	0.044
	9	0.007	0.007	0.007	0.007	0.023	10	0.058
	12	0.009	0.009	0.008	0.009	0.029	10	0.071
	15	0.016	0.016	0.016	0.016	0.053	10	0.132
S(initial)	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	10	0.003	
S(final)	3	0.682	0.683	0.682	0.682	2.246	2	28.075
	6	0.873	0.872	0.873	0.873	2.873	2.5	28.725
	9	0.856	0.856	0.856	0.856	2.818	2.5	28.176
	12	0.850	0.850	0.850	0.850	2.798	2.5	27.979
	15	0.851	0.851	0.851	0.851	2.801	2.5	28.012

:  $[\text{Nd}^{3+}]_{\text{F}} = 40 \text{ ppm}$ ,  $[\text{HNO}_3]_{\text{S}} = 0.1 \text{ M}$ ,  $V_{\text{F}} = V_{\text{S}} = 5 \text{ lit}$ ,  $[\text{D2EHPA}] = 3\text{-}15\%(\text{v/v})$ ,  $Q_{\text{F}} = Q_{\text{S}} = 200 \text{ ml/min}$

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-4 (ต่อ) :

3.  $[\text{Nd}^{3+}]_{\text{Feed}} = 60 \text{ ppm}$

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	$[\text{Nd}^{3+}]$ จาก CC ppm	Volume ml	$[\text{Nd}^{3+}]$ ppm
Blank	0.147 ---> set auto zero						
F(initial)	0.680	0.680	0.679	0.680	2.237	1	55.930
F(final)	3	0.502	0.502	0.502	0.502	1.652	4.131
	6	0.247	0.246	0.247	0.247	0.812	2.030
	9	0.002	0.002	0.003	0.002	0.008	0.019
	12	0.005	0.005	0.004	0.005	0.015	0.038
	15	0.009	0.009	0.010	0.009	0.031	0.077
S(initial)	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	-0.002	10	-0.005
S(final)	3	0.802	0.802	0.801	0.802	2.639	43.980
	6	0.820	0.820	0.820	0.820	2.699	44.986
	9	0.821	0.821	0.821	0.821	2.702	45.041
	12	0.822	0.822	0.822	0.822	2.706	45.095
	15	0.821	0.821	0.821	0.821	2.702	45.041

:  $[\text{Nd}^{3+}]_{\text{F}} = 60 \text{ ppm}$ ,  $[\text{HNO}_3]_{\text{S}} = 0.1 \text{ M}$ ,  $V_{\text{F}} = V_{\text{S}} = 5 \text{ lit}$ ,  $[\text{D2EHPA}] = 3\text{-}15\%(\text{v/v})$ ,  $Q_{\text{F}} = Q_{\text{S}} = 200 \text{ ml/min}$

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-4 (ต่อ) :

4.  $[\text{Nd}^{3+}]_{\text{Feed}} = 80 \text{ ppm}$

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	$[\text{Nd}^{3+}]$ จาก CC ppm	Volume ml	$[\text{Nd}^{3+}]$ ppm	
blank	0.147 ---> set auto zero							
F(initial)	0.735	0.735	0.735	0.735	2.419	0.8	75.605	
F(final)	3	0.766	0.767	0.767	0.767	2.524	10	6.309
	6	0.383	0.383	0.384	0.383	1.262	10	3.154
	9	0.043	0.043	0.044	0.043	0.142	10	0.355
	12	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	10	0.003
	15	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	5	0.005
S(initial)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10	0.000	
S(final)	3	0.707	0.708	0.708	0.708	2.329	1.3	44.796
	6	0.821	0.821	0.821	0.821	2.702	1.3	51.970
	9	0.896	0.896	0.897	0.896	2.950	1.3	56.739
	12	0.897	0.897	0.897	0.897	2.953	1.3	56.781
	15	0.895	0.895	0.895	0.895	2.946	1.3	56.654

:  $[\text{Nd}^{3+}]_{\text{F}} = 80 \text{ ppm}$ ,  $[\text{HNO}_3]_{\text{S}} = 0.1 \text{ M}$ ,  $V_{\text{F}} = V_{\text{S}} = 5 \text{ lit}$ ,  $[\text{D2EHPA}] = 3\text{-}15\%(\text{v/v})$ ,  $Q_{\text{F}} = Q_{\text{S}} = 200 \text{ ml/min}$

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง ข-4 (ต่อ) :

5.  $[\text{Nd}^{3+}]$  Feed = 100 ppm

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	$[\text{Nd}^{3+}]$ จาก CC ppm	Volume ml	$[\text{Nd}^{3+}]$ ppm	
blank	0.148 ---> set auto zero							
F(initial)	0.638	0.638	0.638	0.638	2.100	0.6	87.503	
F(final)	3	0.425	0.426	0.425	0.425	1.400	5	7.000
	6	0.425	0.425	0.427	0.426	1.401	10	3.503
	9	0.128	0.128	0.129	0.128	0.422	10	1.056
	12	0.046	0.046	0.046	0.046	0.151	10	0.379
	15	0.014	0.014	0.014	0.014	0.046	10	0.115
S(initial)	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	-0.002	10	-0.005	
S(final)	3	0.555	0.555	0.556	0.555	1.828	1	45.699
	6	0.699	0.699	0.698	0.699	2.300	1	57.494
	9	0.786	0.786	0.786	0.786	2.587	1	64.681
	12	0.790	0.790	0.790	0.790	2.600	1	65.010
	15	0.795	0.796	0.795	0.795	2.618	1	65.449

:  $[\text{Nd}^{3+}]_F = 100$  ppm,  $[\text{HNO}_3]_S = 0.1$  M,  $V_F = V_S = 5$  lit,  $[\text{D2EHPA}] = 3-15\%$  (v/v),  $Q_F = Q_S = 200$  ml/min

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-4 (ต่อ) :

6.  $[\text{Nd}^{3+}]$  Feed = 120 ppm

[D2EHPA] % (v/v)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	$[\text{Nd}^{3+}]$ จาก CC ppm	Volume ml	$[\text{Nd}^{3+}]$ ppm
blank	0.148 ----> set auto zero						
F(initial)	0.675	0.675	0.675	0.675	2.222	0.5	111.095
3	0.703	0.703	0.704	0.703	2.315	2	28.939
6	0.624	0.624	0.626	0.625	2.056	2	25.698
9	0.796	0.796	0.797	0.796	2.621	3	21.844
12	0.775	0.775	0.775	0.775	2.551	3	21.259
15	0.771	0.771	0.771	0.771	2.538	3	21.149
S(initial)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10	0.000
3	0.554	0.554	0.555	0.554	1.825	1	45.617
6	0.706	0.706	0.706	0.706	2.324	1	58.097
9	0.809	0.809	0.809	0.809	2.663	1	66.573
12	0.810	0.810	0.810	0.810	2.666	1	66.656
15	0.811	0.811	0.812	0.811	2.671	1	66.765

:  $[\text{Nd}^{3+}]_F = 120$  ppm,  $[\text{HNO}_3]_S = 0.1$  M,  $V_F = V_S = 5$  lit,  $[\text{D2EHPA}] = 3-15\%$  (v/v),  $Q_F = Q_S = 200$  ml/min

โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน (CC = Calibration Curve)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-5 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตรีป การศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมโดยเชื่อมแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ที่มีต่อ

[HNO <sub>3</sub> ] mol/l	Abs 1	Abs 2	Abs 3	<Abs>	[Nd <sup>3+</sup> ]จาก CC ppm	Volume ml	[Nd <sup>3+</sup> ] ppm	
blank	0.146 ----> set auto zero							
F(initial)	0.638	0.638	0.638	0.638	2.100	0.6	87.503	
F(final)	0.01	0.397	0.397	0.398	0.397	1.308	4	8.174
	0.05	0.521	0.521	0.522	0.521	1.716	10	4.290
	0.10	0.128	0.128	0.129	0.128	0.422	10	1.056
	0.30	0.102	0.102	0.103	0.102	0.337	10	0.842
	0.50	0.045	0.045	0.045	0.045	0.148	10	0.370
S(initial)	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	-0.002	10	-0.005	
S(final)	0.01	0.501	0.501	0.500	0.501	1.648	1	41.200
	0.05	0.694	0.694	0.694	0.694	2.284	1	57.110
	0.10	0.786	0.786	0.786	0.786	2.587	1	64.681
	0.30	0.806	0.806	0.806	0.806	2.653	1	66.327
	0.50	0.815	0.814	0.815	0.815	2.682	1	67.040

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.01,0.05,0.1,0.3 และ 0.5 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=9%(v/v),

Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

( CC = Calibration Curve )

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

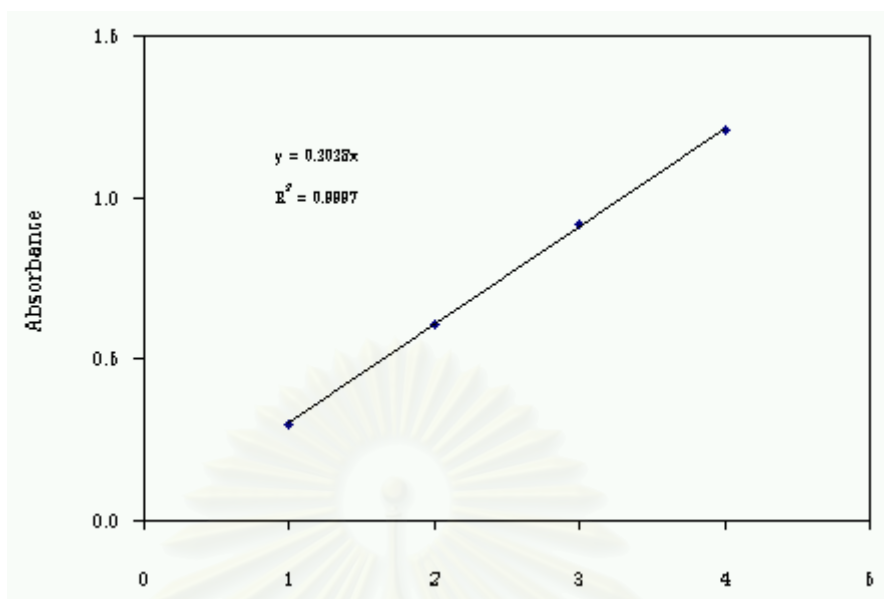
## ผลการคำนวณ

ตาราง ข-6 แสดงข้อมูลของ Calibration Curve สำหรับการทดลอง

[Nd] ppm	Absorbance at 655 nm			
	1	2	3	<ave>
blank	0.146 ---> set auto zero			
1	0.298	0.298	0.298	0.298
2	0.609	0.610	0.609	0.609
3	0.920	0.920	0.920	0.920
4	1.209	1.209	1.209	1.209

: Stock Solution ที่ใช้คือ  $[Nd^{3+}] = 50 \text{ ppm}$  form complex ด้วย 0.1% ARSENAZO III  
ปริมาตร 4 ml. ใน Volumetric Flask 25 ml

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ความเข้มข้นของนํ้าไอดีเมียม : ppm

รูปที่ ค-1 แสดง Calibration Curve สำหรับการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-2 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับสำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของการสกัดนีโอดีเมียม และหาปริมาณที่เหมาะสมสำหรับสารละลายป้อนและสารละลายstripping (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-1 และ จ-2)

Sampling time min	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] Ppm	[S(final)] ppm	ร้อยละการสกัด ด้าน Feed (%)	ร้อยละการนำกลับ ด้าน Strip (%)
5	99.945	0.182	0.000	35.886	99.82	35.906
10	99.945	0.215	0.000	46.151	99.78	46.176
15	99.945	0.199	0.000	56.829	99.80	56.860
20	99.945	0.182	0.000	61.672	99.82	61.706
30	99.945	0.207	0.000	62.417	99.79	62.451
40	99.945	0.232	0.000	62.459	99.77	62.493
50	99.945	0.248	0.000	62.500	99.75	62.534

:  $[Nd^{3+}]_F = 100 \text{ ppm}$ ,  $[HNO_3]_S = 0.1 \text{ M}$ ,  $V_F = V_S = 10 \text{ litre}$ ,  $[D2EHPA] = 20\% (v/v)$ ,  $Q_F = Q_S = 200 \text{ ml/min}$  โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-3 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับสำหรับการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับการสกัดนีโอติเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-1 และ จ-2)

[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] Ppm	[S(final)] ppm	ร้อยละการสกัด ด้าน Feed (%)	ร้อยละการ นำกลับ ด้าน Strip (%)
3	87.503	7.000	-0.005	45.699	92.00	52.23
6	87.503	3.503	-0.005	57.494	96.00	65.71
9	87.503	1.056	-0.005	64.681	98.79	73.92
12	87.503	0.379	-0.005	65.010	99.57	74.29
15	87.503	0.115	-0.005	65.223	99.87	74.55
20	87.503	0.017	-0.005	65.449	99.98	74.80

:  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm,  $[HNO_3]_S = 0.1$  M,  $V_F = V_S = 5$  lit,  $[D2EHPA] = 3-20\%$ (v/v),  $Q_F = Q_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-4 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดสำหรับการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน ที่มีต่อการศึกษากการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วย เส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-1 และ จ-2)

pH Feed	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ร้อยละการสกัด ด้าน Feed (%)	ร้อยละการ นำกลับ ด้าน Strip (%)
2	3	85.125	26.434	-0.005	55.958	68.95	65.74
	6	85.125	13.605	-0.005	72.416	84.02	85.07
	9	85.125	6.800	-0.005	72.210	92.01	84.83
	12	85.125	2.935	-0.005	70.153	96.55	82.41
	15	85.125	1.355	-0.005	69.570	98.41	81.73

:  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm,  $[HNO_3]_S = 0.1$  M,  $V_F = V_S = 5$  lit,  $[D2EHPA] = 3-15\%$ (v/v),  $Q_F = Q_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง ค-4 (ต่อ) :

pH Feed	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ร้อยละการสกัด ด้าน Feed (%)	ร้อยละการ นำกลับ ด้าน Strip (%)
2.5	3	89.880	12.536	0.000	74.645	86.05	83.05
	6	89.880	7.113	0.000	74.885	92.09	83.32
	9	89.880	4.507	0.000	69.604	94.99	77.44
	12	89.880	0.510	0.000	67.376	99.43	74.96
	15	89.880	0.165	0.000	66.073	99.82	73.51

:  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm,  $[HNO_3]_S = 0.1$  M,  $V_F = V_S = 5$  lit,  $[D2EHPA] = 3-15\%$ (v/v),  $Q_F = Q_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-4 (ต่อ) :

pH Feed	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ร้อยละการสกัด ด้าน Feed (%)	ร้อยละการ นำกลับ ด้าน Strip (%)
3	3	87.503	7.000	-0.005	45.699	92.00	52.23
	6	87.503	3.508	-0.005	57.494	95.99	65.71
	9	87.503	1.750	-0.005	64.681	98.00	73.92
	12	87.503	0.379	-0.005	65.449	99.57	74.80
	15	87.503	0.115	-0.005	65.010	99.87	74.29

:  $[\text{Nd}^{3+}]_F = 100 \text{ ppm}$ ,  $[\text{HNO}_3]_S = 0.1 \text{ M}$ ,  $V_F = V_S = 5 \text{ lit}$ ,  $[\text{D2EHPA}] = 3\text{-}15\%(\text{v/v})$ ,  $Q_F = Q_S = 200 \text{ ml/min}$  โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-4 (ต่อ) :

pH Feed	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ร้อยละการสกัด ด้าน Feed (%)	ร้อยละการ นำกลับ ด้าน Strip (%)
3.5	3	88.966	22.733	0.000	3.289	74.45	3.70
	6	88.966	12.984	0.000	7.406	85.41	8.32
	9	88.966	3.462	0.000	63.974	96.11	71.91
	12	88.966	0.908	0.000	69.307	98.98	77.90
	15	88.966	0.806	0.000	66.412	99.09	74.65

:  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm,  $[HNO_3]_S = 0.1$  M,  $V_F = V_S = 5$  lit,  $[D2EHPA] = 3-15\%$ (v/v),  $Q_F = Q_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-4 (ต่อ) :

pH Feed	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ร้อยละการสกัด ด้าน Feed (%)	ร้อยละการ นำกลับ ด้าน Strip (%)
4	3	88.829	51.185	0.000	14.339	42.38	16.14
	6	88.829	20.617	0.000	38.494	76.79	43.33
	9	88.829	5.321	0.000	63.117	94.01	71.05
	12	88.829	3.001	0.000	64.681	96.62	72.82
	15	88.829	2.458	0.000	63.556	97.23	71.55

:  $[Nd^{3+}]_F = 100$  ppm,  $[HNO_3]_S = 0.1$  M,  $V_F = V_S = 5$  lit,  $[D2EHPA] = 3-15\%$  (v/v),  $Q_F = Q_S = 200$  ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตาราง ค-5** : แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับสำหรับการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายสตริปที่มีต่อการศึกษากการสกัดนีโอดีเมียม โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-1 และ จ-2)

[HNO <sub>3</sub> ] mol/l	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ร้อยละการสกัด ด้าน Feed (%)	ร้อยละการ นำกลับ ด้าน Strip (%)
0.01	87.503	8.174	-0.005	41.200	90.66	47.08
0.05	87.503	4.290	-0.005	57.110	95.10	65.27
0.10	87.503	1.056	-0.005	64.681	98.79	73.92
0.30	87.503	0.842	-0.005	66.327	99.04	75.80
0.50	87.503	0.370	-0.005	67.040	99.58	76.61

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.01,0.05,0.1,0.3 และ 0.5 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=9%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min  
 โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-6 แสดงผลการคำนวณปริมาณนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายสำหรับการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับการสกัดนีโอดีเมียมไอออน โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-3)

[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			
					F(initial)	F(final)	S(initial)	S(final)
3	87.503	7.000	-0.005	45.699	437.515	35.000	-0.025	228.495
6	87.503	3.503	-0.005	57.494	437.515	17.515	-0.025	287.470
9	87.503	1.056	-0.005	64.681	437.515	5.280	-0.025	323.405
12	87.503	0.379	-0.005	65.010	437.515	1.895	-0.025	325.050
15	87.503	0.115	-0.005	65.233	437.515	0.575	-0.025	326.165
20	87.503	0.017	-0.005	65.449	437.515	0.085	-0.025	327.245

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-20%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-7 แสดงผลการคำนวณปริมาณนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายสำหรับการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-3)

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			
						F(initial)	F(final)	S(initial)	S(final)
20	3	19.119	0.658	0.000	12.138	95.595	3.290	0.000	60.690
	6	19.119	0.058	0.000	11.774	95.595	0.290	0.000	58.870
	9	19.119	0.085	0.000	12.179	95.595	0.425	0.000	60.895
	12	19.119	0.060	0.000	12.419	95.595	0.300	0.000	62.095
	15	19.119	0.112	0.000	11.877	95.595	0.560	0.000	59.385

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=20 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการศึกษาการปฏิบัติกรแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-7 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			
						F(initial)	F(final)	S(initial)	S(final)
40	3	37.433	0.683	0.003	28.075	187.165	3.415	0.015	140.375
	6	37.433	0.044	0.003	28.725	187.165	0.220	0.015	143.625
	9	37.433	0.058	0.003	28.176	187.165	0.290	0.015	140.880
	12	37.433	0.071	0.003	27.979	187.165	0.355	0.015	139.895
	15	37.433	0.132	0.003	28.012	187.165	0.660	0.015	140.060

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=40 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง ค-7 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			
						F(initial)	F(final)	S(initial)	S(final)
60	3	55.930	4.131	-0.005	43.980	279.650	20.655	-0.025	219.900
	6	55.930	2.030	-0.005	44.986	279.650	10.150	-0.025	224.930
	9	55.930	0.019	-0.005	45.041	279.650	0.095	-0.025	225.205
	12	55.930	0.038	-0.005	45.095	279.650	0.190	-0.025	225.475
	15	55.930	0.077	-0.005	45.041	279.650	0.385	-0.025	225.205

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=60 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-7 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			
						F(initial)	F(final)	S(initial)	S(final)
80	3	75.605	6.309	0.000	44.796	378.025	31.545	0.000	223.980
	6	75.605	3.154	0.000	51.970	378.025	15.770	0.000	259.850
	9	75.605	0.355	0.000	56.739	378.025	1.775	0.000	283.695
	12	75.605	0.003	0.000	56.781	378.025	0.015	0.000	283.905
	15	75.605	0.005	0.000	56.654	378.025	0.025	0.000	283.270

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=80 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-7 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			
						F(initial)	F(final)	S(initial)	S(final)
100	3	87.503	7.000	-0.005	45.699	437.515	35.000	-0.025	228.495
	6	87.503	3.503	-0.005	57.494	437.515	17.515	-0.025	287.470
	9	87.503	1.056	-0.005	64.681	437.515	5.280	-0.025	323.405
	12	87.503	0.379	-0.005	65.010	437.515	1.895	-0.025	325.050
	15	87.503	0.115	-0.005	65.449	437.515	0.575	-0.025	327.245

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-7 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	[F(initial)] ppm	[F(final)] ppm	[S(initial)] ppm	[S(final)] ppm	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			
						F(initial)	F(final)	S(initial)	S(final)
120	3	111.095	28.939	0.000	45.617	555.475	144.695	0.000	228.085
	6	111.095	25.698	0.000	58.097	555.475	128.490	0.000	290.485
	9	111.095	21.844	0.000	66.573	555.475	109.220	0.000	332.865
	12	111.095	21.259	0.000	66.656	555.475	106.295	0.000	333.280
	15	111.095	21.149	0.000	66.765	555.475	105.745	0.000	333.825

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=120 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-8 แสดงผลการคำนวณอัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับสำหรับการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-4 และ จ-5)

[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side			Strip Side		
	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การสกัด) mg/m <sup>2</sup> min	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การนำกลับ) mg/m <sup>2</sup> min
	ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
3	437.515	35.000	230.009	-0.025	228.495	51.009
6	437.515	17.515	240.000	-0.025	287.470	64.173
9	437.515	5.280	246.991	-0.025	323.405	72.194
12	437.515	1.895	248.926	-0.025	325.050	72.561
15	437.515	0.575	249.680	-0.025	326.165	72.810
20	437.515	0.085	249.960	-0.025	327.245	73.051

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-20%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-9 แสดงผลการคำนวณอัตราการถ่ายโอนมวลทั้งในส่วนของการสกัดและการนำกลับสำหรับการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก ๑-4 และ ๑-5)

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side			Strip Side		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การสกัด) mg/m <sup>2</sup> min	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การนำกลับ) mg/m <sup>2</sup> min
		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
20	3	95.595	3.290	52.746	0.000	60.690	13.547
	6	95.595	0.290	54.460	0.000	58.870	13.141
	9	95.595	0.425	54.383	0.000	60.895	13.593
	12	95.595	0.300	54.454	0.000	62.095	13.860
	15	95.595	0.560	54.306	0.000	59.385	13.256

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=20 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-9 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side			Strip Side		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การสกัด) mg/m <sup>2</sup> min	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การนำกลับ) mg/m <sup>2</sup> min
		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
40	3	187.165	3.415	105.000	0.015	140.375	31.330
	6	187.165	0.220	106.826	0.015	143.625	32.056
	9	187.165	0.290	106.786	0.015	140.880	31.443
	12	187.165	0.355	106.749	0.015	139.895	31.223
	15	187.165	0.660	106.574	0.015	140.060	31.260

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=40 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-9 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side			Strip Side		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การสกัด) mg/m <sup>2</sup> min	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การนำกลับ) mg/m <sup>2</sup> min
		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
60	3	279.650	20.655	147.997	-0.025	219.900	49.090
	6	279.650	10.150	154.000	-0.025	224.930	50.213
	9	279.650	0.095	159.746	-0.025	225.205	50.275
	12	279.650	0.190	159.691	-0.025	225.475	50.335
	15	279.650	0.385	159.580	-0.025	225.205	50.275

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=60 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง ค-9 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side			Strip Side		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การสกัด) mg/m <sup>2</sup> min	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การนำกลับ) mg/m <sup>2</sup> min
		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
80	3	378.025	31.545	197.989	0.000	223.980	49.996
	6	378.025	15.770	207.003	0.000	259.850	58.002
	9	378.025	1.775	215.000	0.000	283.695	63.325
	12	378.025	0.015	216.006	0.000	283.905	63.372
	15	378.025	0.025	216.000	0.000	283.270	63.230

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=80 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-9 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side			Strip Side		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การสกัด) mg/m <sup>2</sup> min	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การนำกลับ) mg/m <sup>2</sup> min
		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
100	3	437.515	35.000	230.009	-0.025	228.495	51.009
	6	437.515	17.515	240.000	-0.025	287.470	64.173
	9	437.515	5.280	246.991	-0.025	323.405	72.194
	12	437.515	1.895	248.926	-0.025	325.050	72.561
	15	437.515	0.575	249.680	-0.025	327.245	73.051

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-9 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side			Strip Side		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การสกัด) mg/m <sup>2</sup> min	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ฟลักซ์ (การนำกลับ) mg/m <sup>2</sup> min
		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
120	3	555.475	144.695	234.731	0.000	228.085	50.912
	6	555.475	128.490	243.991	0.000	290.485	64.840
	9	555.475	109.220	255.003	0.000	332.865	74.300
	12	555.475	106.295	256.674	0.000	333.280	74.393
	15	555.475	105.745	256.989	0.000	333.825	74.515

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=120 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-10 แสดงผลการคำนวณสมดุลมวลสำหรับการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับการสกัดนีโอดิเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-6)

[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)
	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
3	437.515	35.000	-0.025	228.495	174.00
6	437.515	17.515	-0.025	287.470	132.51
9	437.515	5.280	-0.025	323.405	108.81
12	437.515	1.895	-0.025	325.050	110.55
15	437.515	0.575	-0.025	326.165	110.75
20	437.515	0.085	-0.025	327.245	110.16

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-20%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-11 แสดงผลการคำนวณสมดุลมวลสำหรับการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของนีโอดีเมียมในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการสกัด นีโอดีเมียมไอออนโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-6)

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
20	3	95.595	3.290	0.000	60.690	31.62
	6	95.595	0.290	0.000	58.870	36.44
	9	95.595	0.425	0.000	60.895	34.28
	12	95.595	0.300	0.000	62.095	33.20
	15	95.595	0.560	0.000	59.385	35.65

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=20 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-11 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
40	3	187.165	3.415	0.015	140.375	43.39
	6	187.165	0.220	0.015	143.625	43.34
	9	187.165	0.290	0.015	140.880	46.01
	12	187.165	0.355	0.015	139.895	46.93
	15	187.165	0.660	0.015	140.060	46.46

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=40 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-11 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
60	3	279.650	20.655	-0.025	219.900	39.07
	6	279.650	10.150	-0.025	224.930	44.55
	9	279.650	0.095	-0.025	225.205	54.33
	12	279.650	0.190	-0.025	225.475	53.96
	15	279.650	0.385	-0.025	225.205	54.04

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=60 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-11 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
80	3	378.025	31.545	0.000	223.980	122.50
	6	378.025	15.770	0.000	259.850	102.41
	9	378.025	1.775	0.000	283.695	92.56
	12	378.025	0.015	0.000	283.905	94.11
	15	378.025	0.025	0.000	283.270	94.73

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=80 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน



ตาราง ค-11 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
100	3	437.515	35.000	-0.025	228.495	174.00
	6	437.515	17.515	-0.025	287.470	132.51
	9	437.515	5.280	-0.025	323.405	108.81
	12	437.515	1.895	-0.025	325.050	110.55
	15	437.515	0.575	-0.025	327.245	109.67

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-11 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	
120	3	555.475	144.695	0.000	228.085	182.70
	6	555.475	128.490	0.000	290.485	136.50
	9	555.475	109.220	0.000	332.865	113.39
	12	555.475	106.295	0.000	333.280	115.90
	15	555.475	105.745	0.000	333.825	115.91

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=120 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-12 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบปริมาณ [D2EHPA] กับปริมาณของนีโอดีเมียมไอออนที่สะสมในขบวนการของชุดทดลองสำหรับการศึกษาเพื่อเลือกช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมสำหรับการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-7)

[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)	D2EHPA		
	ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			ที่ใช้ในการทดลอง mole	ที่ใช้ในการ form complex mole	excess mole
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
3	437.515	35.000	-0.025	228.495	174.00	9.12E-03	3.62E-03	5.50E-03
6	437.515	17.515	-0.025	287.470	132.51	1.82E-02	2.76E-03	1.55E-02
9	437.515	5.280	-0.025	323.405	108.81	2.74E-02	2.26E-03	2.51E-02
12	437.515	1.895	-0.025	325.050	110.55	3.65E-02	2.30E-03	3.42E-02
15	437.515	0.575	-0.025	326.165	110.75	4.56E-02	2.30E-03	4.33E-02
20	437.515	0.085	-0.025	327.245	110.16	6.08E-02	2.29E-03	5.85E-02

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-20%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-13 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบปริมาณ [D2EHPA] กับปริมาณของนีโอดีเมียมไอออนที่สะสมในขบวนการของชุดทดลอง สำหรับการศึกษากิจกรรมของความสัมพันธ์ของนีโอดีเมียมในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก จ-7)

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)	D2EHPA		
		ปริมาณ Nd3+ : mg		ปริมาณ Nd3+ : mg			ที่ใช้ในการทดลอง mole	ที่ใช้ในการ form complex mole	excess mole
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
20	3	95.595	3.290	0.000	60.690	31.62	9.12E-03	6.58E-04	8.46E-03
	6	95.595	0.290	0.000	58.870	36.44	1.82E-02	7.58E-04	1.75E-02
	9	95.595	0.425	0.000	60.895	34.28	2.74E-02	7.13E-04	2.66E-02
	12	95.595	0.300	0.000	62.095	33.20	3.65E-02	6.91E-04	3.58E-02
	15	95.595	0.560	0.000	59.385	35.65	4.56E-02	7.41E-04	4.49E-02

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=20 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-13 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)	D2EHPA		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			ที่ใช้ในการทดลอง mole	ที่ใช้ในการ form complex mole	excess mole
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
40	3	187.165	3.415	0.015	140.375	43.39	9.12E-03	9.02E-04	8.22E-03
	6	187.165	0.220	0.015	143.625	43.34	1.82E-02	9.01E-04	1.73E-02
	9	187.165	0.290	0.015	140.880	46.01	2.74E-02	9.57E-04	2.64E-02
	12	187.165	0.355	0.015	139.895	46.93	3.65E-02	9.76E-04	3.55E-02
	15	187.165	0.660	0.015	140.060	46.46	4.56E-02	9.66E-04	4.46E-02

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=40 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-13 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)	D2EHPA		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			ที่ใช้ในการทดลอง mole	ที่ใช้ในการ form complex mole	excess mole
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
60	3	279.650	20.655	-0.025	219.900	39.07	9.12E-03	8.13E-04	8.31E-03
	6	279.650	10.150	-0.025	224.930	44.55	1.82E-02	9.26E-04	1.73E-02
	9	279.650	0.095	-0.025	225.205	54.33	2.74E-02	1.13E-03	2.62E-02
	12	279.650	0.190	-0.025	225.475	53.96	3.65E-02	1.12E-03	3.54E-02
	15	279.650	0.385	-0.025	225.205	54.04	4.56E-02	1.12E-03	4.45E-02

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=60 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-13 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)	D2EHPA		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			ที่ใช้ในการทดลอง mole	ที่ใช้ในการ form complex mole	excess mole
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
80	3	378.025	31.545	0.000	223.980	122.50	9.12E-03	2.55E-03	6.57E-03
	6	378.025	15.770	0.000	259.850	102.41	1.82E-02	2.13E-03	1.61E-02
	9	378.025	1.775	0.000	283.695	92.56	2.74E-02	1.93E-03	2.54E-02
	12	378.025	0.015	0.000	283.905	94.11	3.65E-02	1.96E-03	3.45E-02
	15	378.025	0.025	0.000	283.270	94.73	4.56E-02	1.97E-03	4.36E-02

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=80 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

ตาราง ค-13 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)	D2EHPA		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			ที่ใช้ในการทดลอง mole	ที่ใช้ในการ form complex mole	excess mole
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
100	3	437.515	35.000	-0.025	228.495	174.00	9.12E-03	3.62E-03	5.50E-03
	6	437.515	17.515	-0.025	287.470	132.51	1.82E-02	2.76E-03	1.55E-02
	9	437.515	5.280	-0.025	323.405	108.81	2.74E-02	2.26E-03	2.51E-02
	12	437.515	1.895	-0.025	325.050	110.55	3.65E-02	2.30E-03	3.42E-02
	15	437.515	0.575	-0.025	327.245	109.67	4.56E-02	2.28E-03	4.33E-02

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=100 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน



ตาราง ค-13 (ต่อ) :

[Nd <sup>3+</sup> ] <sub>Feed</sub> ppm	[D2EHPA] % (v/v)	Feed Side		Strip Side		Accumulate of Nd <sup>3+</sup> (mg)	D2EHPA		
		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg		ปริมาณ Nd <sup>3+</sup> : mg			ที่ใช้ในการทดลอง mole	ที่ใช้ในการ form complex mole	excess mole
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
120	3	555.475	144.695	0.000	228.085	182.70	9.12E-03	3.80E-03	5.32E-03
	6	555.475	128.490	0.000	290.485	136.50	1.82E-02	2.84E-03	1.54E-02
	9	555.475	109.220	0.000	332.865	113.39	2.74E-02	2.36E-03	2.50E-02
	12	555.475	106.295	0.000	333.280	115.90	3.65E-02	2.41E-03	3.41E-02
	15	555.475	105.745	0.000	333.825	115.91	4.56E-02	2.41E-03	4.32E-02

: [Nd<sup>3+</sup>]<sub>F</sub>=120 ppm, [HNO<sub>3</sub>]<sub>S</sub>=0.1 M, V<sub>F</sub>=V<sub>S</sub>=5 lit, [D2EHPA]=3-15%(v/v), Q<sub>F</sub>=Q<sub>S</sub>=200 ml/min โดยการปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวในทิศทางสวนทางกัน

## ภาคผนวก ง

### คำนิยาม

ง-1 ประสิทธิภาพในการสกัด (% Extract)

$$\% \text{การสกัด}(\% \text{Extract}) = \frac{\text{ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนที่สกัดได้(mg)}}{\text{ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนตั้งต้น(mg)}}$$

ง-2 ประสิทธิภาพในการนำกลับ(% Recovery)

$$\% \text{การนำกลับ}(\% \text{Recovery}) = \frac{\text{ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนที่นำกลับได้(mg)}}{\text{ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนตั้งต้น(mg)}}$$

ง-3 ฟลักซ์ หรือ อัตราการถ่ายโอนมวลในการสกัด ( $\text{Flux}_{\text{Extract}}$ )

$$\text{ฟลักซ์ในการสกัด}(\text{Flux}_{\text{Extract}}) = \frac{\text{อัตราการถ่ายโอนมวลในการสกัด}}{\text{พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ}}$$

ง-4 ฟลักซ์ หรือ อัตราการถ่ายโอนมวลในการนำกลับ ( $\text{Flux}_{\text{Recovery}}$ )

$$\text{ฟลักซ์ในการนำกลับ}(\text{Flux}_{\text{Recovery}}) = \frac{\text{อัตราการถ่ายโอนมวลในการนำกลับ}}{\text{พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ}}$$

## ภาคผนวก จ

### จ-1 ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัด (% Extract)

ข้อมูลจากภาคผนวก ข : ตาราง ข-2 (พิจารณาข้อมูลที่ 3% โดยปริมาตร D2EHPA)

- ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA = 3 % โดยปริมาตร
- ความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า = 87.503 ppm (mg/l)
- ความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาออก = 7.000 ppm (mg/l)
- ปริมาตรของสารละลายป้อนขาเข้า = 5 ลิตร
- ปริมาตรของสารละลายป้อนขาออก = 5 ลิตร

$$\begin{aligned} \text{ได้ว่า เปอร์เซ็นต์การสกัด (\% Extract)} &= \left[ \frac{(87.503 \times 5) - (7.000 \times 5)}{(87.503 \times 5)} \right] \times 100 \\ &= 92.00\% \quad (\text{ตาราง ค-3}) \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### จ-3 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณไนโอดีเมียมไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย

ข้อมูลจากภาคผนวก ข : ตาราง ข-2 (พิจารณาข้อมูลที่ 3% โดยปริมาตร D2EHPA)

- ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA	=	3	% โดยปริมาตร
- ความเข้มข้นของไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า	=	87.503	ppm (mg/l)
- ความเข้มข้นของไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาออก	=	7.000	ppm (mg/l)
- ความเข้มข้นของไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายสตรีปขาเข้า	=	-0.005	ppm (mg/l)
- ความเข้มข้นของไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายสตรีปขาออก	=	45.699	ppm (mg/l)
- ปริมาตรของสารละลายป้อนขาเข้า	=	5	ลิตร
- ปริมาตรของสารละลายป้อนขาออก	=	5	ลิตร
- ปริมาตรของสารละลายสตรีปขาเข้า	=	5	ลิตร
- ปริมาตรของสารละลายสตรีปขาออก	=	5	ลิตร

ได้ว่า

ปริมาณไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า	=	$87.503 \times 5$	=	437.515	mg
ปริมาณไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาออก	=	$7.000 \times 5$	=	35.000	mg
ปริมาณไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายสตรีปขาเข้า	=	$-0.005 \times 5$	=	-0.025	mg
ปริมาณไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายสตรีปขาออก	=	$45.699 \times 5$	=	228.495	mg

(ตาราง ค-6)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### จ-4 ตัวอย่างการคำนวณฟลักซ์ในการสกัด ( $\text{Flux}_{\text{Extract}}$ )

ข้อมูลจากภาคผนวก ข : ตาราง ข-2 (พิจารณาข้อมูลที 3% โดยปริมาตร D2EHPA)  
และภาคผนวก จ-3

- ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA = 3 % โดยปริมาตร
- ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า = 437.515 mg
- ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาออก = 35.000 mg

ในการทดลองปฏิบัติการที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป 200 ml/min

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นได้ว่า Resident Time} &= \text{Volume of Tube} / \text{Mass Flow Rate} \\ &= (250 \text{ ml}) / (200 \text{ ml/min}) \\ &= 1.25 \text{ min} \end{aligned}$$

(Volume of Tube = 250 ml : วีรวัฒน์ บัตทวิคองคา, 2541 : 114)

จากตาราง 3-2 : พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ =  $1.4 \text{ m}^2$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ฟลักซ์ในการสกัด } (\text{Flux}_{\text{Extract}}) &= \frac{437.515 - 35.000}{(1.4 \times 1.25)} \\ &= 230.009 \text{ mg} / \text{m}^2 \text{ min} \quad (\text{ตาราง ค-8}) \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### จ-5 ตัวอย่างการคำนวณฟลักซ์ในการนำกลับ ( $\text{Flux}_{\text{Recovery}}$ )

ข้อมูลจากภาคผนวก ข : ตาราง ข-2 (พิจารณาข้อมูลที่ 3% โดยปริมาตร D2EHPA)  
และภาคผนวก จ-3

- ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA = 3 % โดยปริมาตร
- ปริมาณไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายสตริปขาเข้า = -0.025 mg
- ปริมาณไนโอดีเมียมไอออนในสารละลายสตริปขาออก = 228.495 mg

ในการทดลองปฏิบัติการที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริป 200 ml/min

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นได้ว่า Resident Time} &= \text{Volume of Shell} / \text{Mass Flow Rate} \\ &= (640 \text{ mg}) / (200 \text{ mg/min}) \\ &= 3.20 \text{ min} \end{aligned}$$

(Volume of Tube = 640 ml : วีรวัฒน์ บัตทวิคองคา, 2541 : 114)

จากตาราง 3-2 : พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ =  $1.4 \text{ m}^2$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ฟลักซ์ในการนำกลับ } (\text{Flux}_{\text{Recovery}}) &= \left[ \frac{228.495 - (-0.025)}{(1.4 \times 3.20)} \right] \\ &= 51.009 \text{ mg} / \text{m}^2 \text{ min} \end{aligned}$$

(ตาราง ค-8)

## จ-6 ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลในการทดลอง

ข้อมูลจากภาคผนวก ข : ตาราง ข-2 (พิจารณาข้อมูลที่ 3% โดยปริมาตร D2EHPA)  
และภาคผนวก จ-3

- ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า = 437.515 mg
- ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนขาออก = 35.000 mg
- ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายstripxขาเข้า = -0.025 mg
- ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายstripxขาออก = 228.495 mg

ดังนั้นปริมาณนีโอดีเมียมไอออนที่สะสมในกระบวนการ (Accumulate : mg) มีค่าดังนี้

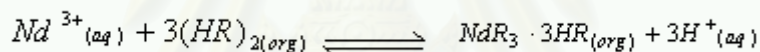
$$\begin{aligned}
 \text{Nd}^{3+} \text{ Accumulate} &= [ \text{Nd}^{3+}_{\text{Feed}} + \text{Nd}^{3+}_{\text{Strip}} ]_{\text{inlet}} - [ \text{Nd}^{3+}_{\text{Feed}} + \text{Nd}^{3+}_{\text{Strip}} ]_{\text{outlet}} \\
 &= [ 437.515 + (-0.025) ] - [ 35.000 + 228.495 ] \\
 &= 174.00 \text{ mg} \qquad \qquad \qquad (\text{ตาราง ค-10})
 \end{aligned}$$

## จ-7 ตัวอย่างการคำนวณเปรียบเทียบปริมาณ D2EHPA กับนีโอดีเมียมไอออน ที่สะสมในกระบวนการ

Basis : ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนที่สะสมอยู่ในระบบ สะสมอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน  
 $NdR_3 \cdot 3HR$  ข้อมูลจากภาคผนวก ข : ตาราง ข-2 (พิจารณาข้อมูลที่ 3% โดยปริมาตร  
D2EHPA)

- ปริมาณนีโอดีเมียมไอออนที่สะสมในระบบ (จากภาคผนวก จ-6) = 174.00 mg
- MW. ของนีโอดีเมียม = 144.24
- MW. ของ D2EHPA = 322.40
- Density ของ D2EHPA = 0.98 g/ml

จากสมการการสกัด



นีโอดีเมียมไอออนที่สะสม 1 mole ต้องเข้าทำปฏิกิริยากับ D2EHPA 3 mole

ถ้ามีนีโอดีเมียมไอออนที่สะสม 174.00 mg =  $174.00 \times 10^{-3} / 144.24 = 1.21 \times 10^{-3}$  mole

ต้องเข้าทำปฏิกิริยากับ D2EHPA  $1.21 \times 10^{-3} \times 3$  mole =  $3.62 \times 10^{-3}$  mole

แต่จากการทดลองใช้ D2EHPA 3% โดยปริมาตร

คิดเป็นปริมาณ D2EHPA  $(3 \times 0.98) / 322.40 = 9.12 \times 10^{-3}$  mole

พบว่า  $D2EHPA_{\text{excess}} = D2EHPA_{\text{ที่ใช้ในการทดลอง}} - D2EHPA_{\text{ที่ใช้ในการ form complex}}$

$$= (9.12 \times 10^{-3}) - (3.62 \times 10^{-3})$$

$$= 5.50 \times 10^{-3} \text{ mole}$$

(ตาราง ค-12)



## ประวัติผู้วิจัย

นายนิสิต สุไลมาน เกิดที่โรงพยาบาลราชวิถี กรุงเทพมหานคร แล้วไปเติบโตที่จังหวัดปัตตานี เป็นบุตรคนสุดท้องในจำนวนบุตรทั้งสิ้น 4 คน ของนายแพทย์นิปา สุไลมาน และนางนิลุบล สุไลมาน จบการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนวรคามินอนุสรณ์ จังหวัดปัตตานี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-5 จากโรงเรียนสาธิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2539 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย