

การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียม
โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นายประกร รามกุล

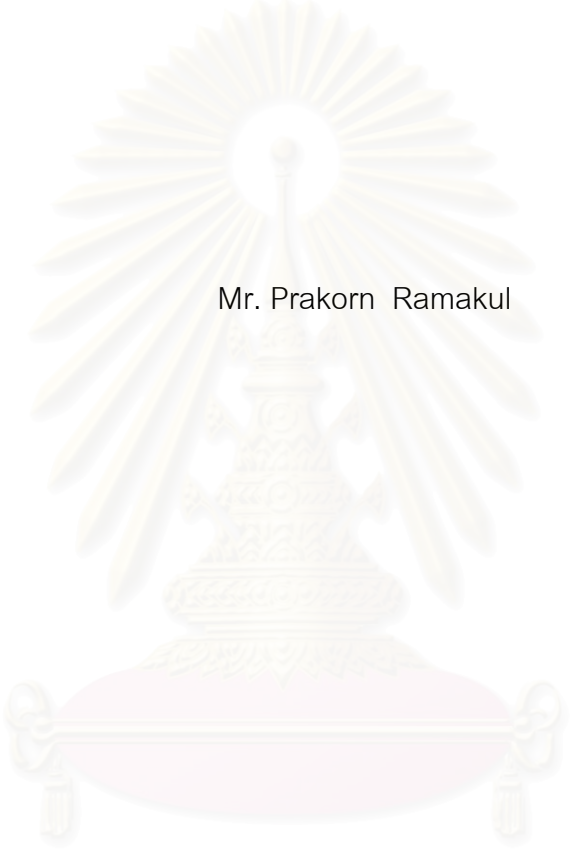
สถาบันวิทยบริการ
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรม เคมี ภาควิชาวิศวกรรม เคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1042-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SEPARATION OF MIXTURE OF LANTHANUM AND NEODYMIUM IONS BY
HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



Mr. Prakorn Ramakul

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-17-0381-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
โดย	นายประกร รามกุล
สาขาวิชา	สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะसार ประเสริฐธรรม)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุพจน์ พัฒนะศรี)

..... กรรมการ
(ดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธุ์)

ประกร รามกุล : การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดิเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่
พองด้วยเส้นใยกลวง(SEPARATION OF MIXTURE OF LANTHANUM AND NEODYMIUM
IONS BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE)

อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ, 121 หน้า. ISBN 974-03-1042-7

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนออกจากกันโดยใช้สารสกัด
Thenoyltrifluoroacetone (HTTA) ผสมกับสารสกัด Trioctylamine (TOA) ละลายในเบนซีนเป็น
สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ถูกพองไว้ในรูปทรงหลอดภาชนะชนิดไม่ชอบน้ำและได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ
ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนในช่วงที่มีความเป็นกรด ความเข้มข้นของสารสกัด
HTTA ในช่วง 0.005 - 0.04 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในช่วง 0 - 6 % โดยปริมาตร
ความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนในสารละลายป้อนในช่วง 10 - 90 ส่วนในล้านส่วน
และศึกษาถึงผลของการเพิ่มจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงจาก 1 โมดูลเป็น 2 โมดูล

ผลการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลอย่างมากต่อร้อยละการสกัดโดยได้ค่าร้อยละ
การสกัดสูงที่สุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.5 เมื่อเติมสารสกัด TOA เข้าไปผสมกับสารสกัด
HTTA จะทำให้ความสามารถในการสกัดสูงขึ้นอย่างมาก และจะสามารถสกัดแลนทานัมได้มากกว่า
นีโอดิเมียม และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ในขณะที่ความเข้มข้นของ TOA นั้นคงที่พบ
ว่าความสามารถในการสกัดไอออนทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด TOA
ในขณะที่ความเข้มข้นของ HTTA นั้นคงที่ พบว่าความแตกต่างระหว่างการสกัดแลนทานัมและ
นีโอดิเมียมไอออนจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความสามารถในการสกัดโดยรวมของไอออนทั้งสองชนิดจะ
ลดลงเนื่องจากความหนืดของเยื่อแผ่นเหลวที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย
แลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนในสารละลายป้อนนั้นไม่มีผลต่อร้อยละการสกัดเท่าใดนักแต่จะทำให้
อัตราการถ่ายเทมวลนั้นเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มโมดูลเส้นใยกลวงเป็นสองโมดูลแล้วทำการปรับค่า
ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนให้ออกห่างจากโมดูลเส้นใยกลวงโมดูลแรกก่อนที่จะป้อน
เข้าสู่โมดูลที่สองอย่างต่อเนื่อง พบว่านอกจากจะสกัดไอออนทั้งสองได้มากขึ้นแล้วยังทำให้ความ
แตกต่างระหว่างความสามารถในการสกัดไอออนทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นกว่าใช้โมดูลเส้นใยกลวงเพียง
เพียงโมดูลเดียว

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544.....

4270405321 : MAJOR MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: SYNERGISTIC EXTRACTION/LIQUID MEMBRANE/HOLLOW FIBER

PRAKORN RAMAKUL : SEPARATION OF MIXTURE OF LANTHANUM AND
NYODYNIUM IONS BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.URA PANCHAROEN,D Eng.Sc.121 pp.

ISBN 974-03-1042-7.

This research studied the synergistic extraction and separation of mixtures of lanthanum and neodymium by using the mixture of Thenoyltrifluoroacetone (HTTA) and Trioctylamine (TOA) which are extractants dissolved in benzene as a membrane solution. The membrane solution was supported by a microporous hydrophobic hollow fiber membrane extractor. The effect of variables were studied including pH of feed solutions, concentration of HTTA and TOA in membrane within the range of 0.01 to 0.04 M and 0% to 6% by volume respectively, concentration of lanthanum and neodymium in feed solution within the range of 10 to 90 ppm and number of hollow fiber module.

The results reveal that a slight change in the pH of feed solution, has a big effect on the percentage of extraction, with the maximum value at pH 2.5. Percentage of extraction is increased considerably when TOA is added to HTTA and lanthanum can be extracted and recovered more than neodymium. When the concentration of TOA is 1%, the percentage of extraction is increased in accordance with an increased concentration of HTTA and it decrease when concentration of HTTA is more that 0.01 M. The difference of percentage of extraction is larger when increase concentration of TOA. However, percentage of extraction and recovery is decreases. Finally, double - column module of supported hollow fiber membrane was used, and found that not only percentage of extraction and recovery increased , but also difference of extraction of lanthanum and neodymium increase more as compared to a single module.

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

Field of study....CHRMICAL ENGINEEERING..... Advisor's signature.....

Academic year2001.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. สุพจน์ พัฒนะศรี และ ดร. สิรินาฏ เลาะห์โรจนพันธุ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่เล็งเห็นความสำคัญของงานวิจัยโดยให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือวิเคราะห์สารเคมี

ขอบคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจ และให้เงินทุนในการศึกษาเล่าเรียนจนสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความรู้ สั่งสอน อบรม ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในห้องวิจัยและในภาควิชาฯ ที่ได้คอยช่วยเหลือ เป็นเพื่อนคู่คิด และเป็นแรงผลักดันให้ผู้วิจัยทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
สัญลักษณ์.....	ณ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	8
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	13
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
2. ทฤษฎี.....	16
2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	16
2.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	19
2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	21
2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ.....	23
2.2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....	23
2.2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พุงด้วยแผ่นม้วน.....	25
2.2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	26
2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์.....	29
2.3 ชนิดของสารสกัด.....	31
2.3.1 สารสกัดชนิดกรด.....	31
2.3.2 สารสกัดชนิดด่าง.....	33
2.3.3 สารสกัดชนิดเป็นกลาง.....	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.4	กลไกการถ่ายเทมวล..... 34
2.4.1	การถ่ายเทแบบสวนทาง..... 35
2.4.2	การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน..... 36
2.5	การสกัดแบบเสริมฤทธิ์..... 38
บทที่ 3	สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง..... 43
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 43
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 44
3.3	วิธีการทดลอง..... 46
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 55
4.1	การทดลองเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดแยก แอลทานัมและนีโอติเมียมไอออนออกจากกันด้วยเยื่อ แผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและหาเวลาที่เหมาะสม สำหรับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 57
4.2	การทดลองเพื่อหาช่วงของค่าความเป็นกรด-ด่างในสาร ละลายป้อนที่เหมาะสม..... 58
4.3	การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว..... 65
4.4	การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว..... 70
4.5	ศึกษาผลของจำนวนโมดูลเส้นใยกลวง..... 74
4.6	ผลของความเข้มข้นของแอลทานัมและนีโอติเมียม ไอออนในสารละลายป้อน..... 75
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 86
5.1	สรุปผลการทดลอง..... 86
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 87
	รายการอ้างอิง..... 89
	ภาคผนวก..... 90

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ก (ข้อมูลดิบ).....	91
ภาคผนวก ข (ผลการคำนวณ).....	103
ภาคผนวก ค (คำนิยาม).....	113
ภาคผนวก ง (ตัวอย่างการคำนวณ).....	115
ประวัติผู้วิจัย.....	121



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
1.1 คุณสมบัติของธาตุแลนทานัมและนีโอดิเมียม.....	7
2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วย เยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ	30
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.2 รายละเอียดของสมบัติต่างๆของชุดเส้นใยกลวง.....	45
ก-1 แสดงข้อมูลการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัด แยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกันและหา ปริมาณกับเวลาที่เหมาะสมสำหรับสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับ.....	94
ก-2 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างใน สารละลายป้อนต่อการสกัดแยกแลนทานัมและ นีโอดิเมียมออกจากกัน.....	95
ก-2.1 ด้านสารละลายป้อน.....	95
ก-2.2 ด้านสารละลายนำกลับ.....	96
ก-3 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกัน.....	97
ก-3.1 ด้านสารละลายป้อน.....	97
ก-3.2 ด้านสารละลายนำกลับ.....	98
ก-4 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกัน.....	99
ก-4.1 ด้านสารละลายป้อน.....	99
ก-4.2 ด้านสารละลายนำกลับ.....	100
ก-5 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของจำนวนโมดูลเส้นใยกลวง และผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออน ในสารละลายป้อนต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกัน.....	101
ก-5.1 ด้านสารละลายป้อน.....	101
ก-5.2 ด้านสารละลายนำกลับ.....	102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<p>ข-1 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันและหาปริมาณกับเวลาที่เหมาะสมสำหรับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ</p>	103
<p>ข-2 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาถึงผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกัน.....</p> <p style="padding-left: 20px;">ข-2.1 ด้านสารละลายป้อน.....</p> <p style="padding-left: 20px;">ข-2.2 ด้านสารละลายนำกลับ.....</p>	<p>104</p> <p>104</p> <p>105</p>
<p>ข-3 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกัน.....</p> <p style="padding-left: 20px;">ข-3.1 ด้านสารละลายป้อน.....</p> <p style="padding-left: 20px;">ข-3.2 ด้านสารละลายนำกลับ.....</p>	<p>106</p> <p>106</p> <p>107</p>
<p>ข-4 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกัน.....</p> <p style="padding-left: 20px;">ข-4.1 ด้านสารละลายป้อน.....</p> <p style="padding-left: 20px;">ข-4.2 ด้านสารละลายนำกลับ.....</p>	<p>108</p> <p>108</p> <p>109</p>
<p>ข-5 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาผลของจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงและผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกัน.....</p> <p style="padding-left: 20px;">ข-5.1 ด้านสารละลายป้อน.....</p> <p style="padding-left: 20px;">ข-5.2 ด้านสารละลายนำกลับ.....</p>	<p>110</p> <p>110</p> <p>110</p>

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-6 แสดงผลการคำนวณอัตราการถ่ายเทมวลทางด้านสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับในการศึกษาผลของจำนวนโมดูลเส้นใยกลวง และผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนในสาร ละลายป้อนต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกัน	111
ข-6.1 ด้านสารละลายป้อน.....	111
ข-6.2 ด้านสารละลายนำกลับ.....	112



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ปริมาณของธาตุต่างๆที่รวมตัวกันอยู่ในแร่โมนาไซต์.....	5
1.2 ปริมาณของธาตุต่างๆที่รวมตัวกันอยู่ในแร่บาสนเนไซต์.....	6
1.3 ปริมาณของธาตุต่างๆที่รวมตัวกันอยู่ในแร่ซีโนโทม.....	6
2.1 ขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับในการ สกัดแยกด้วยตัวทำละลาย.....	16
2.2 แสดงขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชัน.....	17
2.3 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ.....	20
2.4 วิธีการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	21
2.5 กระบวนการแยกโดยใช้วิธีเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	22
2.6 รูปพหุจลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่ทำจาก PTFE	24
2.7 กลไกการสกัดของกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พอง ด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....	24
2.8 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....	25
2.9 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน.....	26
2.10 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	27
2.11 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารป้อนและสารละลาย นำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัด ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	28
2.12 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์.....	29
2.13 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของไอออนโลหะและไฮโดรเนียม ไอออนของการถ่ายเทแบบสวนทาง.....	37
2.14 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของไอออนโลหะและไฮโดรเนียม ไอออนของการถ่ายเทแบบทางเดียวกัน.....	37
3.1 สูตรโครงสร้างของสารสกัด Thenoyltrifluoroacetone (HTTA)	44
3.2 สูตรโครงสร้างของ Trioctylamine (TOA)	44
3.3 ชุดการทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	41
3.4 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One through mode).....	47

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แสดงการปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียวโดยใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล.....	52
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับตามลำดับ.....	59
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียม.....	62
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับของแลนทานัมและนีโอติเมียม.....	63
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียม.....	66
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียม.....	67
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียม.....	72
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการนำกลับของแลนทานัมและนีโอติเมียม.....	73
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 10 ppm.....	76
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการนำกลับของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 10 ppm.....	76
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 30 ppm.....	77
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 30 ppm.....	77

สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 50 ppm.....	78
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการนำกลับของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 50 ppm.....	78
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 70 ppm.....	79
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 70 ppm.....	79
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 90 ppm.....	80
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการนำกลับของแลนทานัมและนีโอติเมียมที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 90 ppm.....	80
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดและใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูลในการสกัด.....	81
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับและใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูลในการสกัด.....	82
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนกับอัตราการถ่ายเทมวลในการสกัด.....	83
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนกับอัตราการถ่ายเทมวลในการนำกลับ.....	84

สัญลักษณ์

$k_{ex,1}$	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่หนึ่งชนิดเดียว
$k_{ex,2}$	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่สองชนิดเดียว
$k_{ex,1+2}$	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สองผสมกัน
$k_{f,1}$	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่หนึ่งชนิดเดียว
$k_{f,2}$	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่สองชนิดเดียว
$k_{f,1+2}$	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สองผสมกัน
$k_{r,1+2}$	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่หนึ่งชนิดเดียว
$k_{r,2}$	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่สองชนิดเดียว
$k_{r,1+2}$	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สองผสมกัน
$r_{Ln,1}$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเมื่อใช้สารสกัดชนิดหนึ่งชนิดเดียว
$r_{Ln,2}$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่สองชนิดเดียว
$r_{Ln,1+2}$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สองผสมกัน
Ln^{3+}	ไอออนของโลหะในอนุกรมแลนทาไนด์ ในที่นี้คือแลนทานัมและนีโอดีเมียม
M	ไอออนของโลหะทั่วไป
R_n	สารสกัดชนิดกรดโดยทั่วไป
S	สารชนิดที่ทำหน้าที่เป็นคอนเนอร์หรือสารสกัดชนิดที่เป็นเบส

β อัตราส่วนระหว่าง ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสัดเมื่อใช้ สารสัดชนิดที่หนึ่งชนิดเดียว ($k_{ex,1}$) กับ ค่าคงที่สมดุล ของปฏิกิริยาการสัดเมื่อใช้สารสัดชนิดที่หนึ่งและชนิดที่ สองผสมกัน ($k_{ex,1+2}$)

ตัวห้อย

f สารละลายป้อน

s สารละลายนำกลับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.ความเป็นมา

ปริมาณของโลหะที่อยู่บนเปลือกโลกเรานั้นนับวันจะลดน้อยลงไปทุกที ๆ เนื่องมาจากความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยี และอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือเครื่องใช้ที่ทันสมัย คอมพิวเตอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้า รถยนต์ โทรศัพทมือถือ จนถึงสิ่งก่อสร้าง เครื่องประดับ ฯลฯ ความเจริญก้าวหน้าเหล่านี้ทำให้มีการนำวัสดุโลหะมาใช้เป็นจำนวนมากเช่น เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง ดีบุก ถูกนำมาใช้จากเปลือกโลกเป็นเวลานานและใช้อย่างฟุ่มเฟือย จึงทำให้สินแร่โลหะเริ่มจะลดน้อยลงไป ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาโลหะวัสดุ ตลอดจนกระบวนการผลิตจึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาประเทศ เพื่อแสวงหาวัสดุและกรรมวิธีในการผลิตที่มีประสิทธิภาพ เกิดผลคุ้มค่าและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด [2] ธาตุหายาก (rare earth) แม้จะเป็นธาตุที่ไม่เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง เมื่อเทียบกับเหล็ก ทองแดง ดีบุก เงิน ฯลฯ แต่ธาตุหายากนั้นเป็นธาตุอีกกลุ่มหนึ่งที่มีปริมาณการนำมาใช้เพิ่มขึ้นอย่างมาก [3] เนื่องจากมีประโยชน์มากมายและมีราคาสูง

ธาตุหายาก (rare earth) คือธาตุที่อยู่ในอนุกรมแลนทาไนด์ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 15 ธาตุ คือธาตุที่มีเลขอะตอม 57 – 71 และอิตเทรียม (Y) และสแกนเดียม (Sc) ซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 39 และ 21 ตามลำดับ ไว้ในกลุ่มนี้ด้วย ธาตุหายากแบ่งออกเป็น ชนิดคือธาตุหายากกลุ่มเบา (Light rare earth) ซึ่งจะมีหมายเลขอะตอม 57 – 63 ได้แก่ แลนทานัม (La) ซีเรียม (Ce) เพรซีโอดีเมียม (Pr) นีโอดีเมียม (Nd) โพรมิเทียม (Pm) ซาแมเรียม (Sm) ยูโรเพียม (Eu) และธาตุหายากกลุ่มหนัก (Heavy rare earth) ประกอบด้วยธาตุหายากที่เหลือคือหมายเลขอะตอม 64 - 71 ได้แก่ แกโดลิเนียม (Gd) เทอร์เบียม (Tb) ดิสโพรเซียม (Dy) โฮล์เมียม (Ho) เออร์เบียม (Er) ทูเลียม (Tm) อิตเทอร์เบียม (Yb) และลูทีเซียม (Lu) รวมทั้งอิตเทรียม (Y) ด้วย ธรรมชาติของการเกิดของธาตุหายากคือมักเกิดในลักษณะกระจายอยู่ทั่วไป แต่มีแค่เพียง 3 ชนิดเท่านั้นที่มีปริมาณมากและมีปริมาณของธาตุหายากสูงพอที่จะจัดเป็นแหล่งกำเนิดที่สามารถนำมาสกัดธาตุหายากได้ซึ่งประมาณร้อยละ 95 ของธาตุหายากในโลกนี้อยู่ในแร่ทั้ง 3 ชนิดนี้ ได้แก่ แร่โมนาไซต์ (Monazite) บาสเนไซต์ (Basnasite) และซีโนไทม์ (Xenotime)

- แร่โมนาไซต์ เป็นแร่แรเอิร์ทฟอสเฟต ตามทฤษฎีมีแรเอิร์ทออกไซด์ (REO) 70% รวม
 อิตเทรียม-ออกไซด์ประมาณ 2% แต่หัวแร่ส่วนใหญ่มี REO 55-65% ข้อกำหนดในการซื้อขาย
 ต้องมี REO อย่างน้อย 55%

- บาสต์เนไซต์ เป็นแร่ฟลูออโรคาร์บอเนต ทางทฤษฎีมี REO 75% และมีอิตเทรียมน้อย
 มากเพียง 0.05% หัวแร่บาสต์เนไซต์ที่ได้จากการลอยแร่มี REO เฉลี่ยประมาณ 60% แต่เพิ่มเป็น
 70% เมื่อผ่านการชะละลาย (Leaching) ด้วยกรดและเพิ่มเป็น 85% เมื่อผ่านการชะละลายและ
 การเผา (Calcining)

- ซีโนไทม์ เป็นแร่ฟอสเฟตที่มีอิตเทรียมสูง ซึ่งในทางทฤษฎีซีโนไทม์มีอิตเทรียมออกไซด์
 ประมาณ 67% อย่างไรก็ตามแร่ซีโนไทม์มีอิตเทรียมออกไซด์เฉลี่ยประมาณ 25% และสามารถ
 ทำให้เป็นหัวแร่อิตเทรียมมีอิตเทรียมออกไซด์ 60% และ REO 40% ได้

เนื่องจากธาตุหายากที่อยู่ในสินแร่ต่างๆนั้นมักจะอยู่รวมกันซึ่งยากแก่การนำไปใช้ งานวิจัยนี้
 จึงเป็นการศึกษาการสกัดแยกไอออนของธาตุหายากสองชนิดออกจากกันคือธาตุแลนทานัมและ
 ธาตุนีโอดีเมียม ซึ่งประโยชน์ของธาตุทั้งสองชนิดนั้นมีดังนี้

ประโยชน์ของธาตุแลนทานัมและนีโอดีเมียม

1.ประโยชน์ของธาตุแลนทานัม [5]

- ด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมสารเรืองแสง

1. ออกไซด์ร้อยละ 5-40 ผสมในแก้วทัศนศาสตร์(optical glass) ซึ่ง
 จะทำให้แก้วมีดัชนีหักเหสูงและทำให้แสงผ่านได้มากถึง 99% ในขณะที่แก้วทั่วไปแสงจะผ่านได้
 ประมาณ 85-90 % ซึ่งทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เช่น ทำเลนส์ ปริซึม และใยแก้วนำแสง
 (optic fiber) ฯลฯ

2. ใช้ทำขั้วไฟฟ้าสำหรับเครื่องวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง

3. ใช้ผลิตสารเรืองแสง (phosphor) ที่สำคัญ 3 ด้าน ได้แก่ ใช้
 ฉาบจอของหลอดภาพโทรทัศน์ (cathod ray tube) ใช้เคลือบหรือฉาบหลอดไฟฟ้า และ ใช้
 เคลือบจอคุณภาพจากการฉายรังสีเอกซ์ (X-ray screen phosphor)

4. สารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนระหว่างแลนทานัมกับทองแดง สามารถแสดงสมบัติเป็นสารตัวนำยิ่งยวด(Superconductor) ที่อุณหภูมิ 30 – 40 เคลวิน

ด้านพลังงาน

1. แลนทานัม-นิกเกิลอัลลอยด์ (LaNi) สามารถดูดซับและคายไฮโดรเจนเป็นปริมาณมากๆได้ในอุณหภูมิและความดันที่ไม่สูงนัก และยังดูดซับและคายไฮโดรเจนด้วยอัตราที่สูงมาก ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกักเก็บไฮโดรเจนซึ่งมีปัญหาและเกิดอันตรายจากความดันสูงและการติดไฟได้ง่าย เป็นผลดีสำหรับการผลิตพลังงานหีบอนาคต

2. แลนทานัม-นิกเกิลอัลลอยด์ ถูกนำมาผลิตเป็นแบตเตอรี่แห้งชนิดที่สามารถเพิ่มประจุใหม่ได้ตระกูล Ni-MH ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดใหม่นี้มีความจุไฟฟ้าสูงกว่าชนิดนิกเกิล-แคดเมียม ถึง 1.6-2 เท่าตัว นอกจากนี้ยังเกิดข้อดีที่ไม่ทำให้เกิดมลพิษเหมือนแคดเมียมซึ่งเป็นโลหะหนัก

3. ใช้ในการผลิตพลังงาน แลนทานัมเกี่ยวข้องอย่างมากที่สุดกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดโซลิดออกไซด์ (Solid oxide fuel cell, SOFC) ที่มีส่วนประกอบสำคัญของเซลล์ทุกส่วนทำมาจากธาตุหายากเป็นองค์ประกอบทั้งสิ้นโดยแลนทานัมเป็นส่วนประกอบในขั้วลบ

2. ประโยชน์ของธาตุนีโอไดเมียม [4]

ด้านอุตสาหกรรมโลหะผสม

1. โลหะ Galfan ผสมสังกะสีกับนีโอไดเมียม จะเป็นวัสดุทนการกัดกร่อนสำหรับเคลือบผิวเช่นลวด เหล็กแผ่น

2. โลหะ Rapid Solidification Alloy เป็นโลหะอลูมิเนียมผสมกับนีโอไดเมียมเป็นสารผสมทนอุณหภูมิได้ถึง 340 องศาเซลเซียสจากเดิม 170 องศาเซลเซียส

3. ผลิตเป็นแม่เหล็กถาวรตระกูลใหม่ล่าสุดคือ NdFeB ซึ่งมีกำลังสูงมากโดยกำลังแรงกว่าแม่เหล็กทั่วไป 5-10 เท่าตัว ขณะที่ราคาสูงขึ้นไปไม่เกิน 5 เท่าตัว แม่เหล็กที่มีกำลังสูงเช่นนี้ ทำให้อุปกรณ์ที่ต้องใช้แม่เหล็กมีขนาดเล็กลงได้มาก เช่น มอเตอร์ที่ใช้กับรถยนต์ทั้งในการขับเคลื่อน บัดน้ำฝนและเปิดปิดกระจกรถยนต์ นาฬิกาข้อมือ ลำโพง หูฟัง หัวเทป มอเตอร์ควบคุมทิศทางหัวรถจรวดนำวิถี เป็นส่วนประกอบอุปกรณ์เกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ และอิเล็กทรอนิกส์

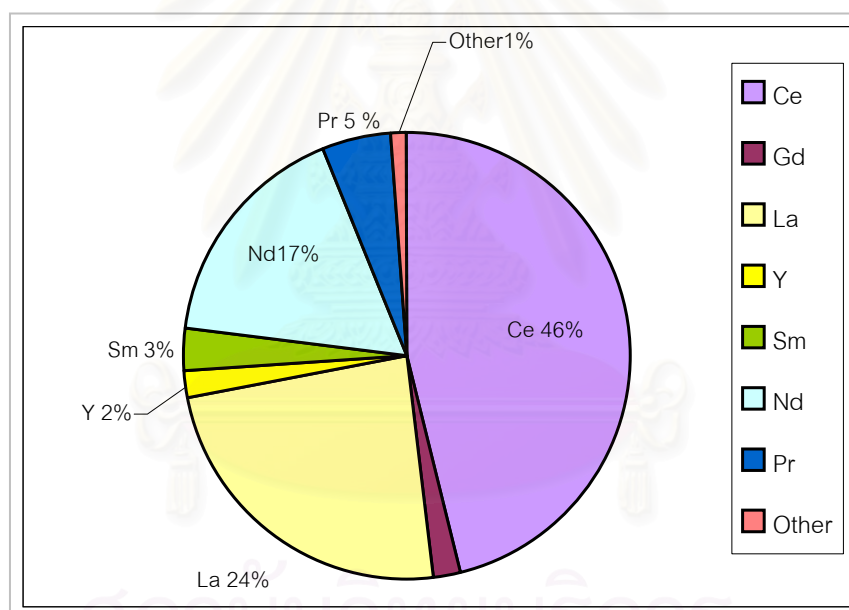
ด้านอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิกส์

1. นีโอติเมียมออกไซด์ผสมในแก้วที่ดูแสงในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตเพื่อทำภาชนะในการบรรจุเบียร์ อาหาร และยาที่ไวต่อแสงในช่วงคลื่นนี้
2. ใช้สำหรับทำให้แก้วมีสีตามต้องการ โดยที่นีโอติเมียมทำให้แก้วเป็นสีม่วงหรือแดง
3. การผลิตแก้วที่มีธาตุเหล็กผสมอยู่ ผู้ผลิตอยากให้มีสีเหลืองจากเหล็กประจุ 2+ แต่การหลอมมักจะได้เหล็กประจุ 3+ ซึ่งมีสีเขียวไม่ค่อยเป็นที่ต้องการแต่ถ้าเติมนีโอติเมียมลงไปจะช่วยเสริมสีเหลืองและลดสีเขียว จนเป็นแก้วใสได้
4. ใช้ผลิตผิวแก้วสำหรับกรองแสงของหลอดภาพโทรทัศน์ ตัวกรองชนิดนี้จะปล่อยแสงสีน้ำเงิน เขียวและแดงให้ผ่านไป และดักแสงสีเหลืองที่ไม่ต้องการเอาไว้ ทำให้ภาพที่ได้สว่างและชัดเจนขึ้น
5. ในการผลิตเลนส์แว่นตาชนิดมัลติโค้ตจะมีการเคลือบทับด้วยไอทีเอ็นตัวลงเป็นชั้นบาง ๆ ของโลหะหลายชนิดเป็นชั้น ๆ ซึ่งโลหะที่ใช้มีนีโอติเมียมอยู่ด้วย เลนส์ชนิดนี้แสงจะผ่านได้มากกว่า 99 %
6. ใช้ร่วมกับธาตุอื่น ๆ เช่น ไทเทเนียม แมงกานีส สำหรับเคลือบเลนส์ทำให้ค่าดัชนีหักเห (refractive index) ของเลนส์สูงขึ้น และช่วยลดการสะท้อนแสงของเลนส์ได้เกือบหมด

ปริมาณธาตุหายากที่พบบนผิวโลก

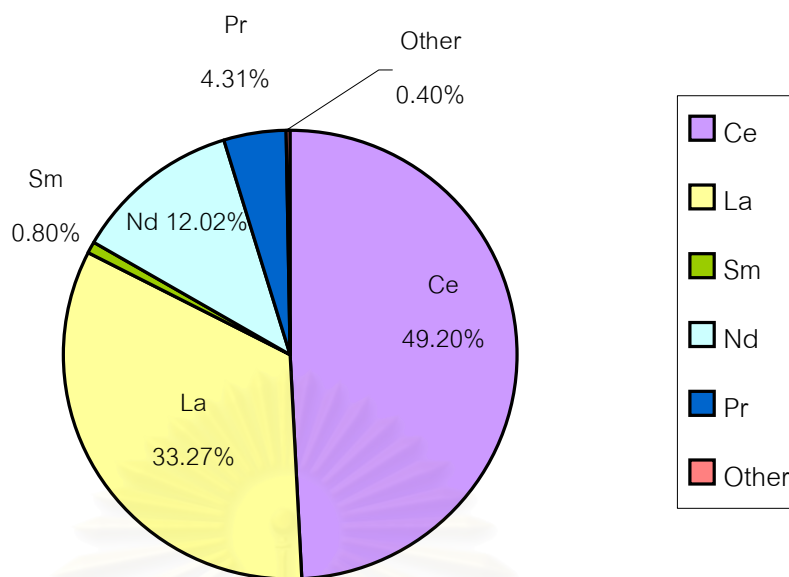
แร่หายากซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของธาตุหายากนอกจากแร่โมนาไซต์และซีไนท์ที่พบในประเทศไทยแล้วยังมีแร่หายากอยู่อีกหลายชนิด ที่สำคัญและมีปริมาณสำรองมากที่สุดในโลกคือ แร่บาสเนไซต์ (Basnasite) ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอเนต พบมากในสาธารณรัฐประชาชนจีนและสหรัฐอเมริกา ซึ่งประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนประเทศเดียวครอบครองปริมาณสำรองของธาตุหายากถึงร้อยละ 76 ของปริมาณสำรองของธาตุหายากทั้งโลก

แร่บาสเนไซต์และโมนาไซต์มีธาตุหายากชนิดเบาอยู่เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะแลนทานัมและนีโอดิเมียมมีอยู่ในปริมาณมากเป็นอันดับต้น ๆ เมื่อเทียบกับธาตุหายากตัวอื่น ๆ ดังรูปที่ 1.1 [1]

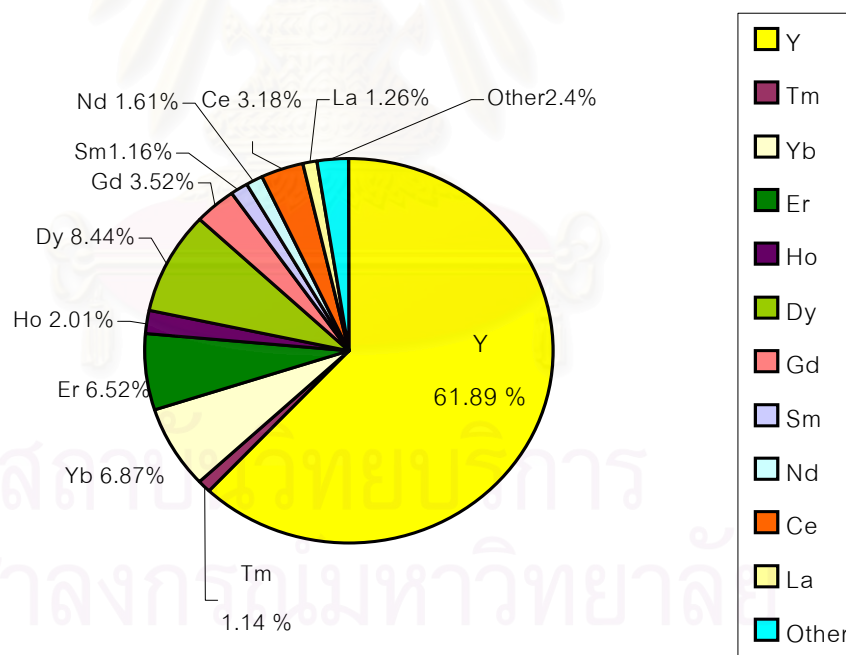


รูปที่ 1.1 ปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่รวมตัวกันอยู่ในแร่โมนาไซต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.2 ปริมาณของธาตุต่างๆ ที่รวมตัวกันอยู่ในแร่บาสนไซต์



รูปที่ 1.3 ปริมาณของธาตุต่างๆ ที่รวมตัวกันอยู่ในแร่ซีไนท์

ยิ่งไปกว่านั้นธาตุแลนทานัมและนีโอดีเมียมนั้นมักจะอยู่รวมกันและมีสมบัติที่ใกล้เคียงกันมากดัง
ตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สมบัติของธาตุแลนทานัมและนีโอดีเมียม [8]

สมบัติ	แลนทานัม	นีโอดีเมียม
เลขอะตอม	57	60
ออบิทัลด	[Xe] 5d ¹ 6s ²	[Xe] 4f ⁴ 6s ²
มวลอะตอม	138.91	144.24
รัศมีโควาเลนต์ (Å ^o)	1.69	1.64
ประจุ	+3	+3
จุดเดือด (°C)	3464	3074
จุดหลอมเหลว(°C)	918	1021
ค่าความจุความร้อน (J/g.K)	0.19	0.19

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าสมบัติต่าง ๆ ของแลนทานัมและนีโอดีเมียมนั้นใกล้เคียงกันอย่างมาก ดังนั้นการแยกธาตุสองธาตุนี้ให้ออกจากกันนั้นจึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก

ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษากระบวนการสกัดผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย
กลวง ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจในการที่จะแยกธาตุแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกัน
เนื่องจากเป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมาใหม่และได้รับความนิยมในการสกัดแบบคัดเลือก เป็น
กระบวนการที่ทำได้ง่าย มีค่าการถ่ายเทโอนมวลที่สูง มีค่าการคัดเลือกผ่านสูง ประหยัดพลังงาน
และใช้สารสกัดในปริมาณที่น้อยให้ประสิทธิภาพสูง การสกัดแบบคัดเลือกของไอออนโลหะได้รับ

ความสนใจอย่างมากจากผู้ศึกษาด้านกระบวนการทางโลหวิทยา เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพัฒนาได้รับการพิจารณาให้เป็นกระบวนการที่สำคัญในการประยุกต์ใช้เพื่อนำกลับและแยกไอออนโลหะชนิดต่างออกจากสารละลายด้วยข้อดีหลายประการของเทคนิคนี้ จึงได้ทำมาใช้ในการแยกและนำกลับไอออนของธาตุหายาก

และงานวิจัยนี้ยังเป็นการศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction) ซึ่งเป็นการนำสารสกัด 2 ชนิดมาผสมกัน แล้วทำให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดสูงกว่าเมื่อใช้สารสกัดชนิดเดียว แต่จากการค้นคว้าและศึกษาจากที่ผ่านมามีพบว่าการสกัดแบบเสริมฤทธิ์นั้นมักจะทำในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่เพียงแต่ศึกษาการแยกแ่ลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนออกจากกันเท่านั้น แต่ยังเป็นการเริ่มและศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำการสกัดแบบเสริมฤทธิ์มาใช้ในระบบเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้นั้นเป็นเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

Leonard Newman และ Paul Klotz (1966) [20] ได้ใช้วิธีการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) โดยใช้สารสกัด Thenolytrifluoroacetone (HTTA) ผสมกับ Trioctylamine (TOA) โดยมีเบนซีนเป็นตัวทำละลายสกัดไอออนของธาตุอะเมริเซียมออกจากสารละลาย โดยศึกษาผลของปริมาณของ TOA ที่ผสมอยู่กับ HTTA เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นของ TOA นั้นศึกษาในช่วง 0 จนถึง 0.01 โมลต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ TOA จะทำให้สกัดอะเมริเซียมไอออนออกจากสารละลายได้มากขึ้นเนื่องจาก TOA นั้นไปทำปฏิกิริยาเสริมฤทธิ์ (synergistic) กับ HTTA และ HCl ที่อยู่ในสารละลายได้เป็น $R_3N.HTTA$ และ $R_3N.HCl$ ตามลำดับและสารสองสารนี้ยังทำปฏิกิริยากันได้เป็น $R_3N.HCl.HTTA$ ซึ่งสารทั้งหมดนี้จะทำปฏิกิริยากับ $AmTtA_3$ ได้เป็น $AmTtA_3.R_3N.HTTA$ $AmTtA_3.R_3N.HCl$ และ $AmTtA_3.R_3N.HCl.HTTA$ ตามลำดับ ทำให้เกิดการสกัดได้ดีขึ้น ซึ่งถ้าไม่ผสม TOA จะเกิดแต่ปฏิกิริยาระหว่าง Am^{3+} กับ HTTA ได้เป็น $Am(TTA)_3$ เพียงปฏิกิริยาเดียว

R.G. Puzic and Z.B. Maskimaovic (1971) [28] ได้ศึกษาการแยกไอออนของธาตุ Pu(IV), Th(IV) และ U(IV) ออกจากสารละลายกรดไนตริก ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) โดยใช้สารสกัด HTTA ผสมกับ trilaurylamine oxide (TLAO) ในตัวทำ

ละลายเบนซีน โดยทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองชนิด จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของ HTTA คงที่ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TLAO ค่าอัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio) จะเพิ่มขึ้น และที่ความเข้มข้นของ TLAO คงที่ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ HTTA ค่า อัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio) จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ที่ความเข้มข้นของสารสกัดใดสารสกัดหนึ่งเป็นศูนย์ค่าอัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio) จะมีค่าน้อยที่สุด และพบว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกทางด้านสารละลายป้อนค่าอัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio) จะลดลง

E.F. Kassierer และ A.S.Kertes (1972) [9] ได้ศึกษาวิธีการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) ในการแยกธาตุในหมู่แลนทาไนด์ออกจากกันโดยใช้ลิแกนด์ไปเดนเทตสองชนิดมาผสมกัน คือ HTTA ผสมกับ 1,10-phenantroline หรือ 2,2-dipyridyl หรือ 4,4-dipyridyl และศึกษาผลของตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ได้แก่เบนซีน ไชโคลเฮกเซน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ และคลอโรฟอร์ม ผลการวิจัยพบว่า ลิแกนด์ที่นำมาผสมกับ HTTA แล้วทำให้ความสามารถในการสกัดเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 1,10-phenantroline รองลงมาคือ 2,2-dipyridyl และ 4,4-dipyridyl โดยแต่ละชนิดให้ผลต่างกันประมาณร้อยละ 10 ส่วนผลของตัวทำละลายนั้นให้ความสามารถเรียงตามลำดับดังนี้ ไชโคลเฮกเซน > เบนซีน > คาร์บอนเตตระคลอไรด์ > คลอโรฟอร์ม และสามารถสกัดธาตุ ลูทีเทียม ได้มากที่สุดรองลงมาคือ แกโดลิเนียม นีโอดีเมียม และแลนทานัม ตามลำดับ

Khopkar และ Mathur (1977) [18] ได้ใช้การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) ศึกษาถึงการสกัดแยกไอออนของยูโรเปียม (Eu(III)) โดยสารสกัดที่ใช้เป็นการผสมกันระหว่าง HTTA และ (donor) 3 ชนิด คือ diphenyl sulphoxide , Tributyl phosphate และ trioctylphosphine (DOSO ,TBP และ TOPO ตามลำดับ) มีเบนซีนเป็นตัวทำละลาย จากการวิจัยพบว่าทั้งไอออนของโลหะ สารสกัด และ HTTA จะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็น $M(TTA)_3S$ และ $M(TTA)_3S_2$ เมื่อ S คือ สารให้อิเล็กตรอน (donor) เมื่อศึกษาถึงผลของชนิดของ สารให้อิเล็กตรอน (donor) ที่มีต่อการสกัดพบว่า TOPO ให้ความสามารถในการสกัดสูงที่สุด รองลงมาคือ TBP และ DPSO และที่น้อยที่สุดคือไม่ได้ใส่สารให้อิเล็กตรอน (donor) เลย คือไม่เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction)

Masaaki Sugiura (1993) [23] ทำการศึกษาหาอัตราการถ่ายเทมวลของธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ผ่านเยื่อแผ่นเซลลูโลสไตรอะซีเตต โดยมีสารผสมระหว่าง o - nitrophenyl n-octyl ether และ quaternary ammonium salts มีสารสกัดคือ 4- Benzoyl - 3 methyl - 1 phenyl - 5

pyrozone (BMPP) และ 4-trifluoroacetyl-3-methyl-1-phenyl-5-pyrozone(TMPP) เป็นสารสกัด ละลายในตัวทำละลาย ตัวแปรที่ศึกษาคือ quaternary ammonium salts 5 ชนิด ได้แก่ Didpdecyldimethyl Distearyl dimethyl Tetrahexyl Tatraoctyl Tatrdecyl ammonium bromide แทนด้วยสัญลักษณ์ $(C_{12})_2 NBr$ $(C_{18})_2 NBr$ $(C_6)_4 NBr$ $(C_8)_4 NBr$ $(C_{10})_4 NBr$ ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเยื่อแผ่นเหลวที่มี $(C_{12})_2 NBr$ หรือ $(C_{18})_2 NBr$ ความเข้มข้น 0.1 M ในสารสกัด BMPP จะให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอื่น ๆ โดยเฉพาะเมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลวที่บรรจุ $(C_{12})_2 NBr$ 0.1 M ในสารสกัด BMPP จะให้อัตราการถ่ายเทมวลของแลนทานัมและซีเรียมสูงกว่าธาตุอื่น ส่วนสารสกัด TMPP นั้นไม่เหมาะสำหรับการแยกธาตุของอนุกรมแลนทาไนด์

Masaaki Sugiura (1993) [24] เป็นงานวิจัยที่ทำต่อจากงานชิ้นแรก คือทำการหาค่าการถ่ายเทมวลของธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ทั้ง 14 ธาตุ ผ่านเยื่อแผ่นชนิดเซลลูโลสไตรอะซิเตต โดยมีสารผสมระหว่าง o-nitrophenyl n-octyl ether และ สารสังเคราะห์ phospholipids เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ของเยื่อแผ่นเหลว และมี 4-benzoyl-3-methyl-1-phenyl-5-pyrazolone (BMPP) และ hinokitiol (HIPT) เป็นสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์ ในงานวิจัยนี้สารสังเคราะห์ phospholipids ที่เป็นตัวแปรในการศึกษาได้แก่ didecanoyl , dilauroyl , และ dimyristoyl - α - phosphatidylcholines (เรียกเป็น $C_{10}PC$ $C_{12}PC$ $C_{14}PC$ ตามลำดับ) ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ BMPP เป็นสารสกัดจะให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นตามรัศมีของไอออนของธาตุอนุกรมแลนทาไนด์ และมีค่าสูงสุดที่ดิสโพรเซียม หลังจากนั้นจะเริ่มลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงธาตุพราสซีโอดีเมียมจนถึงแลนทานัม ผลของตัวแปรที่ศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความยาวของหมู่อัลคิลในสารสังเคราะห์ phospholipids จะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลลดลงสำหรับสารสกัด HIPT อัตราการถ่ายเทมวลมีลักษณะคล้ายกับสารสกัด BMPP และให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงธาตุเออเปียมและยูโรเปียมหลังจากนั้นอัตราการถ่ายเทมวลจะเริ่มลดลง

Kataoka , Nishiki and Muto (1995) [17] ทำการวิจัยถึงการถ่ายโอนแลนทานัมออกจากสารละลายโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพุง เยื่อแผ่นเหลวนั้นประกอบด้วย HDEHP เป็นตัวพาซึ่งละลายอยู่ในโครซีน แลนทานัมจะถ่ายโอนจากด้านที่มี pH สูงกว่าไปยังด้านที่มี pH ต่ำกว่าผ่านเยื่อแผ่นเหลว สิ่งที่ศึกษาคือผลของความเข้มข้นของ HDEHP ในเยื่อแผ่นเหลว , ความเข้มข้นของแลนทานัมในสายป้อน , ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในเยื่อแผ่นเหลว ในการทดลองนั้นใช้สารละลายป้อนเป็นสารละลายของแลนทานัมคลอไรด์เข้มข้น 0.3 kmol/m^3 ด้านสายนำกลับใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น $0.5 - 2 \text{ kmol/m}^3$ สารลดแรงตึงผิวใช้ span 80 และ ECA4360J ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ HDEHP จะสามารถเพิ่มความเร็วในการถ่ายเทของ

แลนทานัม ผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่อยู่ในสายนำกลับต่อการสกัดพบว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกนั้นไม่มีผลต่อการสกัดเลย แต่ถ้าเพิ่ม pH ของสารละลายป้อนจาก 1.1 ไปเป็น 2.1 จะทำให้การสกัดเร็วขึ้นมากเนื่องจากค่าความเป็นกรดนั้นส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาที่จุดสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว

T.M. Sami and A. A. Abd el Tawab.(1996) [33] ใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) สกัดแยกไอออนของธาตุหายาก La Nd Tm Lu และ Y ที่อยู่ในสารละลาย ด้วยวิธีการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction) โดยใช้สารสกัด HTTA ผสมกับ TOA โดยทดลองกับตัวทำละลายหลายชนิดคือ เบนซีน โทลูอีน และไซลีน ในการทดลองจะใช้สารละลายป้อนเป็นกรดไนตริก 0.6 โมลต่อลิตรและมีแคลเซียมออกไซด์ละลายอยู่ 11.6 กรัมต่อลิตร ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารสกัด TOA และ HTTA แล้วศึกษาประสิทธิภาพในการสกัด ผลการทดลอง เมื่อใช้ TOA 1% และเพิ่มความเข้มข้นของ HTTA ตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.05 โมลต่อลิตร พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ HTTA ความสามารถในการสกัดไอออนของธาตุ La , Nd , Tm , Lu และ Y จะเริ่มแตกต่างกันโดยเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ Lu , Tm , Y , Nd และ La ซึ่งที่ความเข้มข้นของ HTTA เท่ากับ 0.05 M นั้นความสามารถในการสกัดของ Nd จะสูงกว่า La มาก แต่ถ้าไม่ใส่แคลเซียมออกไซด์ลงในสารละลายป้อนการสกัดจะได้รับการคัดเลือกที่ไม่ดี และถ้าใช้เบนซีนตัวทำละลายจะสามารถแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกันได้มากที่สุดและความสามารถในการสกัดสูงที่สุด

วิวัฒน์ บัตทวิคคา (1998) [6] ได้ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ของกรดอะซิติกกับไซเดียมอะซิเตตที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนของสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเตรียมจาก D2EHPA ที่มีความเข้มข้นของสารสกัดไม่เกิน 10% โดยปริมาตรในตัวทำละลาย Kerosene Jet A-1 สารละลายป้อนเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสังกะสี 100 ส่วนในล้านส่วน และสารละลายนำกลับเป็นสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

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

อิศรา เกษมเศรษฐ (1998) [7] ได้ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายที่เจือจางมาก ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อ การสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 25 โดยปริมาตร ชนิดของสารสกัดซึ่งได้แก่ สารสกัด D2EHPA สารสกัด LIX84-I และสารสกัด LIX860-I ความเข้มข้นไอออนทองแดงในสารละลายป้อนช่วง 1 ส่วนในหนึ่งล้านส่วน ถึง 100 ส่วนในหนึ่งล้านส่วน รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวง การควบคุมความเป็นกรดต่างของวัฏภาคสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ และการไหลเวียน (circulation) วัฏภาคสารละลายนำกลับ สารละลายอินทรีย์ที่ใช้ ได้แก่ เคโรซีน (kerosene) โดยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ

ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สารสกัดในกลุ่ม LIX สามารถถ่ายเทไอออนทองแดงได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อน รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อควบคุมความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 การใช้วัฏภาคสารละลายนำกลับปริมาณน้อยและให้มีการไหลเวียนยังคงทำให้การถ่ายเทไอออนทองแดงเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม ผลของการใช้วัฏภาคสารละลายนำกลับที่มีปริมาณน้อยสามารถทำให้สารละลายนำกลับมีความเข้มข้นของทองแดงสูง

วิทยา นามสว่าง (1999) [5] ได้ทำการศึกษาการสกัดแยกไอออนของธาตุแลนทานัมออกจากสารละลายด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยในการทดลองนั้นใช้กรดไดเอทิลฟอสฟอริก(D2EHPA) เป็นสารสกัดละลายในน้ำมันก๊าด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายโอนมวลของแลนทานัมไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อน และอัตราการถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดและจะคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 0.5 โมลต่อลิตร ส่วนค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมคือ 2.5 และพบว่า การปรับ pH ในสารละลายป้อนด้วยกรดไฮโดรคลอริกดีกว่าการใช้สารละลายบัฟเฟอร์

นิสิต สุลอฆาน (2001) [4] ได้ศึกษาการสกัดแยกนีโอติเมียมไอออนออกจากสารละลายด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยในการทดลองนั้นใช้กรดไดเอทิลฟอสฟอริก(D2EHPA) เป็นสารสกัดละลายในน้ำมันก๊าด ผลการศึกษานั้นพบว่าค่าความเป็นกรดต่างมีผล

อย่างมากต่อร้อยละการสกัด และที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 จะให้ร้อยละการสกัดสูงที่สุด และอัตราการถ่ายโอนมวลของนีโอดีเมียมไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนสูงกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน ที่ความเข้มข้นของสารสกัดตั้งแต่ 3 - 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการถ่ายโอนมวลมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด และจะคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด สูงกว่า 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และการเพิ่มของความเข้มข้นของกรดไนตริกในช่วงที่สูงกว่า 0.1 โมลต่อลิตรจะไม่มีผลต่อการสกัด

Naohiro KaMeta and Hisanori Imura (2001) [25] ได้ทดลองแยกธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์ด้วยใช้วิธีการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction โดยใช้สารสกัด HTTA ผสมกับ tris(4-isopropyltropolonato)cobalt(III) ($\text{Co}(\text{Iipt})_3$) โดยมีเบนซีนเป็นตัวทำละลาย จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการสกัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติม ($\text{Co}(\text{Iipt})_3$) ลงไปผสมกับสารสกัด HTTA และยังสามารถศึกษาการเกิด adduct ระหว่าง $\text{Ln}(\text{TТА})_3$ กับ $\text{Co}(\text{Iipt})_3$ โดยหาค่าคงที่การเกิด adduct ของแต่ละธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์ที่ 25°C และพบว่าสำหรับธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์นั้น ค่าคงที่ของการเกิด adduct (β) จะลดลงเมื่อเลขอะตอมของธาตุเพิ่มขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสกัดแบบคัดเลือกของไอออนของแลนทานัมและนีโอดีเมียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
2. เพื่อศึกษาถึงผลของการนำการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) มาใช้ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
3. เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอดีเมียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยมีตัวแปรที่จะศึกษาดังนี้

3.1) ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในสารละลายป้อน

3.2) ความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ในตัวทำละลายเบนซีน

3.3) ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในตัวทำละลายเบนซีน

3.4) จำนวนโมดูลเส้นใยกลวง

3.5) ความเข้มข้นของนีโอติเมียมและแลนทานัมในสารละลายป้อน

4. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกไอออนโลหะแต่ละชนิดออกจากกันผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
5. เพื่อเปรียบเทียบผลการการศึกษาที่ได้กับผลการศึกษาของผู้อื่นที่ได้ศึกษาไว้และเป็นแนวทางสำหรับผู้อื่นที่จะนำไปศึกษาและวิจัยต่อ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนออกจากสารละลายผสม โดยใช้สารสกัด Thenoyltrifluoroacetone (HTTA) ผสมกับ Trioctylamine (TOA) โดยใช้เบนซีนเป็นตัวทำละลาย เคลือบฝั่งเยื่อแผ่นเหลวในรูปพุนจุลภาคของเส้นใยกลวงโดยที่การปฏิบัติการเป็นแบบไหลผ่านครั้งเดียว (one through mode) และไหลสวนทางกัน (counter current flow)
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดแยกนีโอติเมียมไอออนโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
 - 2.1) ศึกษาผลของค่าความเป็นกรดเป็นด่างในสารละลายป้อน
 - 2.2) ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Thenoyltrifluoroacetone (HTTA) ในช่วง 0.005 - 0.04 โมลต่อลิตร
 - 2.3) ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Tri-n-Octylamine (TOA) ในช่วง 0 - 6 % โดยปริมาตร
 - 2.4) ศึกษาถึงผลของการเพิ่มจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงที่ใช้ในการสกัดโดยจะใช้ 1 โมดูลและ 2 โมดูลมาเปรียบเทียบกัน
 - 2.5) ศึกษาผลของความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อน ในช่วง 10 - 90 ppm

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียม
2. ทราบถึงผลของสภาวะแบบคัดเลือกของไอออนโลหะลักษณะที่เป็นไอออนผสม
3. เมื่อเทียบกับการสกัดธาตุเดี่ยว ๆ จากที่มีผู้อื่นเคยวิจัยมา
4. ทราบภาวะที่เหมาะสมในการสกัดไอออนโลหะแต่ละชนิดออกจากกัน
5. เป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานของการดำเนินงานวิจัยด้านสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและรวมถึงการพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ ต่อไป
6. เป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานของการนำกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

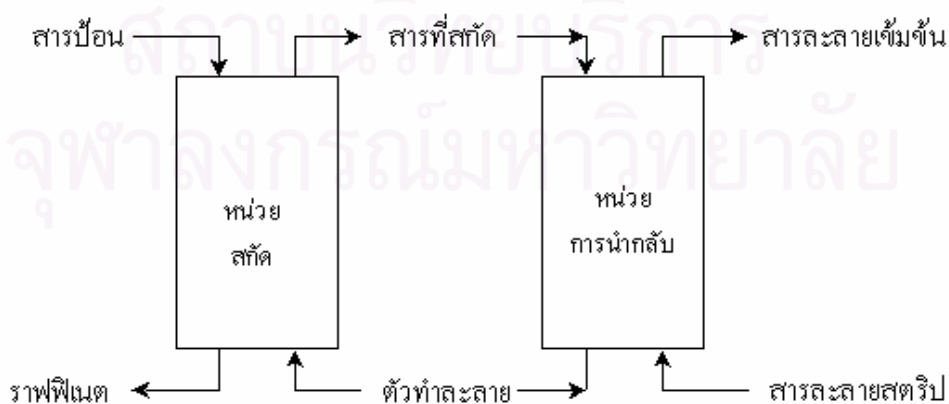
บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการต่างๆที่ใช้ในการแยกไอออนโลหะออกจากสารละลาย ข้อดี ข้อเสีย การนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ชนิดของสารสกัด และกลไกการถ่ายเทมวลสำหรับการสกัดโดยวิธีการเยื่อแผ่นเหลว และปฏิกิริยาของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction)

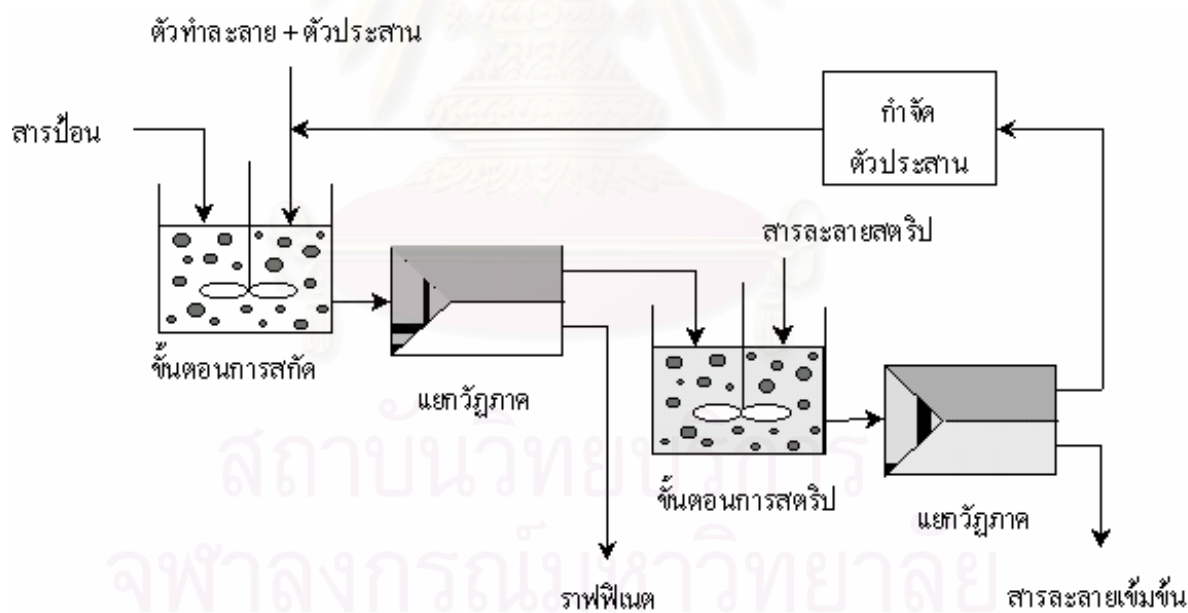
2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย [4]

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นเทคนิคการสกัดพื้นฐานที่อาศัยความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้แตกต่างกันหรือเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวทำละลายกับสารสกัดในอีกวัฏภาคหนึ่ง ซึ่งเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายนี้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้มากในทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสกัดแยกไอออนโลหะเนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนมีและกำลังการผลิตสูง โดยกระบวนการจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการปฏิบัติการอย่างน้อย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ (strip) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ ในการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย

จากรูปที่ 2.1 เป็นลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย แสดงขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการขั้นตอนการสกัด เริ่มด้วยวัฏภาคของสารป้อน (Feed) ซึ่งมีไอออนของตัวถูกละลาย (Solute) ที่ต้องการสกัด (เช่น ไอออนของโลหะ) ถูกป้อนเข้าสู่หน่วยสกัด วัฏภาคของสารป้อนจะสัมผัสกับวัฏภาคของตัวทำละลาย (Solvent) ซึ่งสองวัฏภาคนี้จะไม่ละลายกัน ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายเนื่องจากความสามารถในการละลายในตัวทำละลายแตกต่างกันหรือเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดที่อยู่ในตัวทำละลายที่มาสัมผัส การสกัดจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ซึ่งยิ่งพื้นที่ผิวสัมผัสมีมากประสิทธิภาพการสกัดจะสูงขึ้นจนกระทั่งเมื่อตัวทำละลายอิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลายแล้วก็จะถูกแยกออกมาจากสารป้อน ซึ่งขณะนี้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาคสารป้อนจะลดต่ำลง ขณะที่ตัวทำละลายที่อิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลาย (Extract) จะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยการนำกลับ ซึ่งจะเกิดการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายออกจากวัฏภาคของตัวทำละลายโดยการผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสไปยังสารละลายนำกลับ (Stripping solution) โดยตัวทำละลายที่ผ่านการนำกลับซึ่งถูกแยกสารที่ต้องการออกไปแล้วจะถูกป้อนไหลเวียนกลับเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดเพื่อนำกลับไปใช้ต่อไป ซึ่งรูปของกระบวนการแสดงไว้ในดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชัน

จากรูปที่ 2.2 เป็นกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water in oil, W/O) ซึ่งมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลายน้ำ (Aqueous Phase) กระบวนการเริ่มต้นโดยสารป้อน ซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลายเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดผสมกับตัวทำละลายซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ (Organic Phase) ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันในถังปฏิกรณ์การสกัด ภายในถังปฏิกรณ์วัฏภาคทั้งสองจะถูกตีกวนจนอยู่ในรูปอิมัลชันซึ่งเป็นหยดของสารป้อนที่มีขนาดเล็กมีวัฏภาคของสารอินทรีย์อยู่ล้อมรอบ พื้นที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคทั้งสองที่สัมผัสกันรอบเม็ดอิมัลชันจะเป็นพื้นที่ในการถ่ายเทมวล ตัวถูกละลายในสารป้อนจะเกิดการถ่ายเทมวลผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสองจนกระทั่งวัฏภาคของสารอินทรีย์อิมัลชันไปด้วยตัวถูกละลาย จากนั้นวัฏภาคทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันโดยที่วัฏภาคของสารอินทรีย์ที่อิมัลชันไปด้วยตัวถูกละลายนั้นจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการนำกลับ โดยนำไปผสมกับสารละลายนำกลับซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายที่ไม่ละลายเข้าด้วยกันกับตัวทำละลายในถังปฏิกรณ์ (Reactor) การนำกลับ ภายในถังปฏิกรณ์วัฏภาคทั้งสองจะถูกตีกวนให้เกิดอิมัลชันและเกิดการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคสารอินทรีย์ไปสู่วัฏภาคของสารละลายนำกลับจนกระทั่งวัฏภาคของสารละลายนำกลับอิมัลชันไปด้วยตัวถูกละลาย จากนั้นวัฏภาคของสารละลายนำกลับซึ่งเต็มไปด้วยตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากวัฏภาคของสารอินทรีย์ซึ่งมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายเจือจางลง โดยที่วัฏภาคของสารอินทรีย์จะถูกปรับสภาพด้วยการกำจัดตัวประสานเพื่อนำกลับเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดอีกครั้ง

จากกระบวนการข้างต้นจะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีความสำคัญต่อการถ่ายเทมวลอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารลดแรงตึงผิว เพื่อรักษาเสถียรภาพของเม็ดอิมัลชันเอาไว้จนกระทั่งเกิดการถ่ายเทมวลผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคจนอิมัลชัน โดยในกระบวนการวัฏภาคของสารอินทรีย์จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องมีวัฏภาคภายในเป็นสารละลายดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) ในทางกลับกันหากกระบวนการมีวัฏภาคของสารละลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) แม้ว่าสารลดแรงตึงผิวจะมีความสำคัญในการรักษาเสถียรภาพอิมัลชันที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาครอบหยดอิมัลชันมากขึ้น แต่สารลดแรงตึงผิวซึ่งช่วยผสมผสานผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคให้อิมัลชันมีเสถียรภาพอยู่ได้นั้น จะก่อตัวกลายเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคทั้งในขั้นตอนการแยกวัฏภาคทั้งสองออกจากกันและการบำบัดสารอินทรีย์ที่ใช้งานแล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ก็ยังคงมีความยุ่งยากในการปฏิบัติ โดยทั่วไปมีวิธีการบำบัด อยู่ 2 วิธีคือวิธีทางกาย

ภาพและวิธีทางเคมี วิธีทางเคมีจะใช้งานได้โดยเติมสารลดการประสาน (Demulsifier) ซึ่งจะทำให้ตัวประสานแยกออกจากสารอินทรีย์ได้ดีแต่สารอินทรีย์ที่ได้จากการบำบัดด้วยกระบวนการนี้จะมีคุณสมบัติที่ด้อยคุณภาพลงทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนวิธีทางกายภาพเป็นการบำบัดด้วยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ซึ่งจะให้ผลในการบำบัดที่ดีมาก สามารถแยกวัฏภาคและทำลายโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวได้ดี อีกทั้งสารเคมีในกระบวนการก็มีคุณภาพด้อยลงเพียง เล็กน้อย แต่อุปกรณ์ที่ใช้มีความยุ่งยากซับซ้อน มีอันตรายสูงและยังมีราคาสูงอีกด้วย

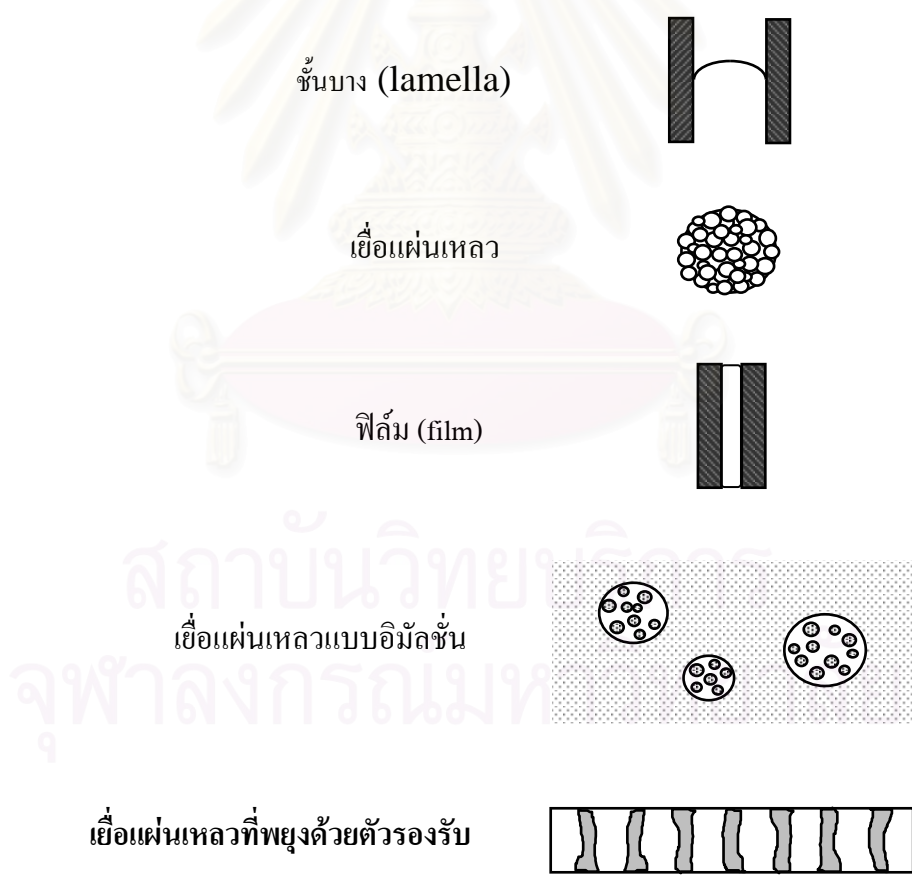
จะเห็นว่ากระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายถึงแม้จะเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการปฏิบัติและมีกำลังการผลิตสูงซึ่งเหมาะสมในการพัฒนาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมก็ตาม แต่ก็มีข้อด้อยอยู่เช่น กระบวนการมีหลายขั้นตอนประสิทธิภาพในการสกัดต่ำเนื่องจากจะถูกจำกัดไว้ด้วยสมดุลระหว่างวัฏภาคที่ผสมผสาน นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติ ในการเลือกสกัดต่ำอีกทั้งยังใช้สารเคมีและพลังงานในปริมาณสูงอีกด้วย [29, 31] จากการที่กลไกการถ่ายเทมวลของเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายถูกจำกัดไว้ด้วยสมดุลระหว่างวัฏภาคที่ผสมผสานทำให้เกิดการพัฒนาขยายขีดจำกัดในการถ่ายเทมวล เพื่อเกิดกลไกการสกัดอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา จึงเป็นจุดเริ่มของการรวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับจากเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายไปสู่เทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

2.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane process) นั้นประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1. ส่วนของสารละลายป้อน (feed phase) ซึ่งเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ซึ่งส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลาย 2. ส่วนเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยสารสกัด (extractant) ละลายในตัวทำละลายส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายของน้ำมัน 3. ส่วนของสารละลายนำกลับ (strip phase) ซึ่งจะทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาจากสารละลายป้อน ส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลายเช่นเดียวกับส่วนของสารละลายป้อน โดยส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมากระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสาร

สกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับและแยกตัวออกมาละลายอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับได้

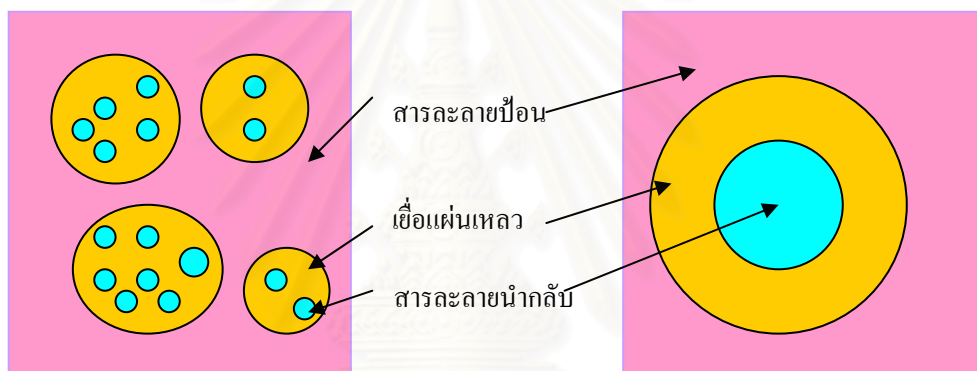
ฉะนั้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจึงจำเป็นต้องมีการสร้างเยื่อแผ่นเหลวมากขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวที่น่าจะเกิดขึ้นได้โดยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่ากรณีอื่น ๆ [30]



รูปที่ 2.3 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ [30]

2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process)

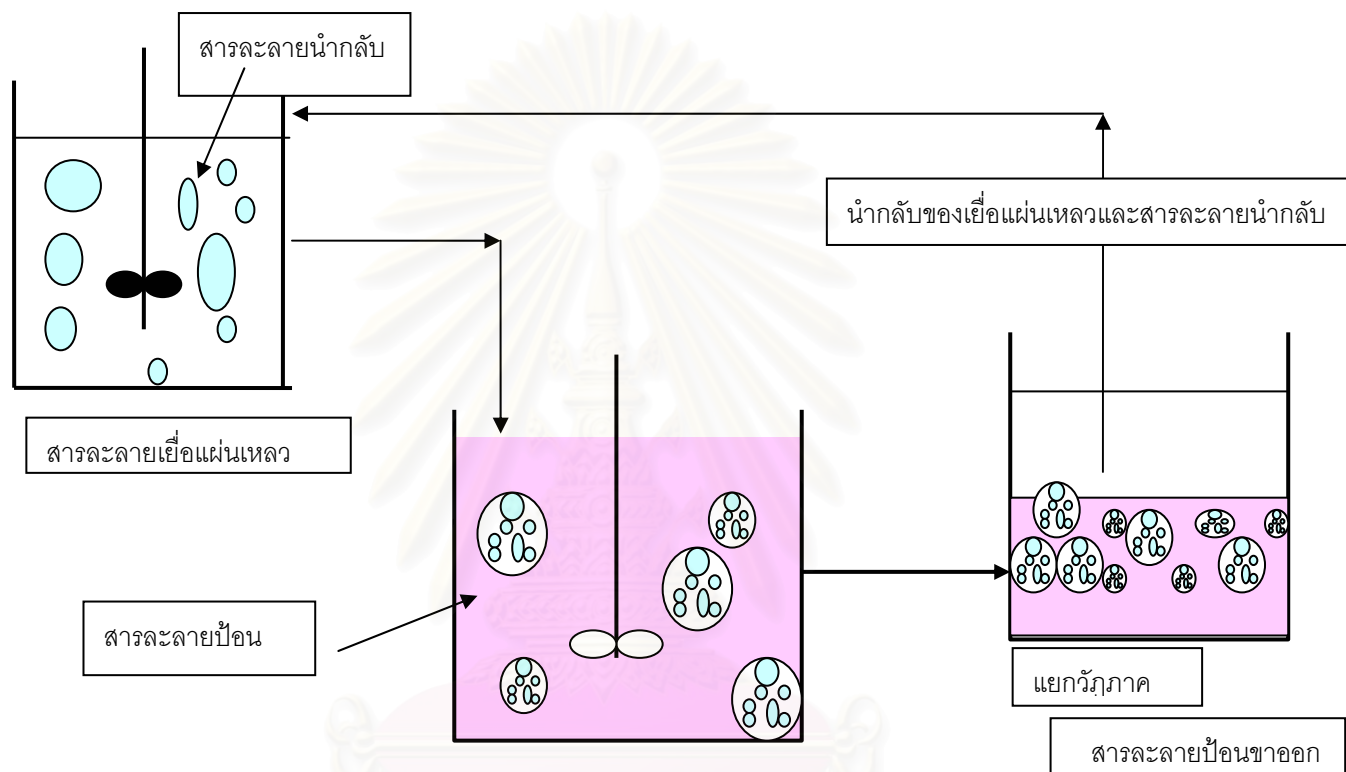
กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน คือ การนำเอาระบบเยื่อแผ่นเหลวที่อธิบายในหัวข้อ 2.1 มาจัดเรียงให้อยู่รูปแบบหนึ่งซึ่งเราเรียกว่าแบบอิมัลชัน ในแบบนี้สารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายน้ำมันอยู่ภายในซึ่งเป็นลักษณะวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (dispersion phase) ดังรูปที่ 2.4 และจะเกิดกระบวนการถ่ายเทองค์ประกอบดังที่ได้อธิบายหัวข้อ 2.1 องค์ประกอบที่เกิดปฏิกริยานั้นจะแพร่เข้าสู่สารละลายน้ำมันและไปอยู่ที่สารละลายนำกลับ ซึ่งสารละลายนำกลับนั้นจะอยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอีกที



รูปที่ 2.4 วิธีการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน

การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน สามารถเตรียมได้โดยนำสารละลายที่จะทำเป็นสารละลายนำกลับมาผสมกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะต้องไม่ละลายกัน แล้วนำมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงเพื่อให้วัฏภาคสารละลายนำกลับมีขนาดเป็นเม็ดเล็กๆอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ได้จะมีความเสถียรต่ำ จึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียร เมื่อเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเสร็จแล้วจึงนำเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันใส่ลงในสารละลายป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ทำให้เกิดการการเรียงวัฏภาคใหม่เป็น 3 ชั้น เรียงจากด้านในไปด้านนอก คือ สารละลายนำกลับ สารละลายเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายป้อนตามลำดับ เรียกว่าอิมัลชันเชิงซ้อน (Double Emulsion) เมื่อเกิดการแยกแล้วองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะไปอยู่ในสารละลายนำกลับ แล้วจึงนำไปแยกสารละลายป้อน (ที่ถูกสกัดองค์ประกอบที่

ต้องการออกไปแล้ว) ให้ออกจากเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน สุดท้ายจึงนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ผ่านการสกัดแล้วไปแยกวัฏภาคภายในออกได้เป็นสารละลายผลิตภัณฑ์ ส่วนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวนั้นสามารถนำกลับไปใช้ได้อีก กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแสดงดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการแยกโดยใช้วิธีเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน

ชนิดของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด [22] คือ

- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (Water in Oil(W/O) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ
- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (Oil in Water(O/W) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน

ในกรณีที่สารละลายนำกลับเป็นสารละลายของน้ำ เมื่อนำอิมัลชันของน้ำในน้ำมันมากระจายในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เป็นสารละลายของน้ำ ระบบจะเรียงจากวัฏภาคด้านในไปยังวัฏภาคด้านนอกคือ น้ำ - น้ำมัน - น้ำ (w/o/w) แต่ถ้าสารละลายนำกลับเป็นสารละลายน้ำมันก็จะกลับกันคือจะเรียงจาก น้ำมัน - น้ำ - น้ำมัน (o/w/o) ดังนั้นจึงมีสารลดแรงตึงผิวสองประเภทได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surfactant) สำหรับอิมัลชันน้ำในน้ำมัน และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic surfactant) สำหรับอิมัลชันน้ำมันในน้ำ

2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ จะใช้พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนเป็นตัวยึดเยื่อแผ่นเหลวเอาไว้ ในรูพรุนด้วยแรงคาпилลารี (capillary force) [22,30] ไม่ให้เยื่อแผ่นเหลวไม่มีการเคลื่อนที่และมีความเสถียรมากขึ้น จึงสามารถเรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้ชื่อหนึ่งว่า Immobilize Liquid Membrane [30] และสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสานซึ่งเป็นปัญหาของกระบวนการสกัด [11] รูพรุนจุลภาคที่ใช้เป็นตัวรองรับนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติดอยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น และอีกชนิดในทางกลับกันคือรูพรุนจุลภาคชนิดไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคที่มีน้ำมันเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติดอยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น ตัวรองรับนั้นมีหลายชนิดได้แก่ ชนิดแผ่นแบน (flat sheet) ชนิดแผ่นม้วน (spiral - wound) และชนิดเส้นใยกลวง (hollow fiber) ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวพองด้วยตัวรองรับคือ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและสารสกัดที่ใช้มีปริมาณน้อย [26]

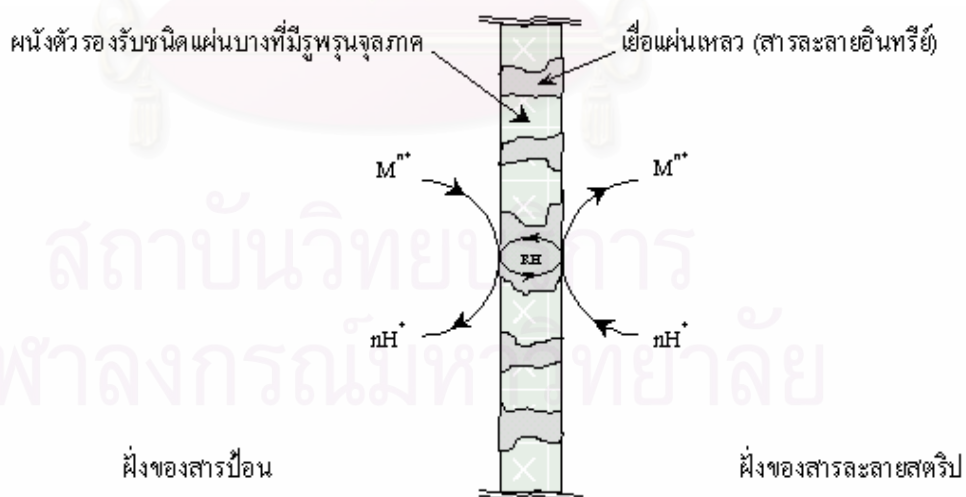
2.2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (flat sheet supported liquid membrane)

ตัวรองรับชนิดนี้มีลักษณะเป็นชนิดแผ่นบาง มีความพรุน (porosity) สูง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เช่น polypropylene (PP) polyethylene (PE) polytetrafluoroethylene (PTFE) เป็นต้น ลักษณะของรูพรุนแสดงดังรูปที่ 2.6



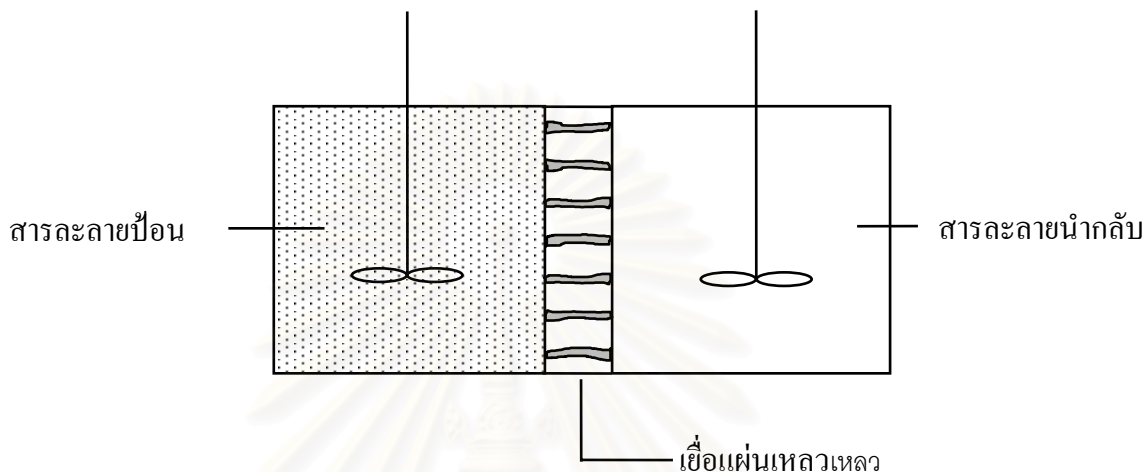
รูปที่ 2.6 รูปพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่ทำจาก PTFE [21]

จากรูปที่ 2.6 รูปพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นบางนี้จะเป็นแหล่งรองรับและยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวไว้ด้วยสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน (Electro Affinity), แรงแคปิลลารี (Capillary Force) และชนิดของรูปพรุน (Hydrophilic or Hydrophobic Microporous) ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิต โดยแผ่นตัวรองรับซึ่งยึดพองเยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างภูมิภาคของสารป้อนและภูมิภาคของสารละลายนำกลับ เกิดการสกัดตามกลไกการสกัดดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการสกัดของกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง

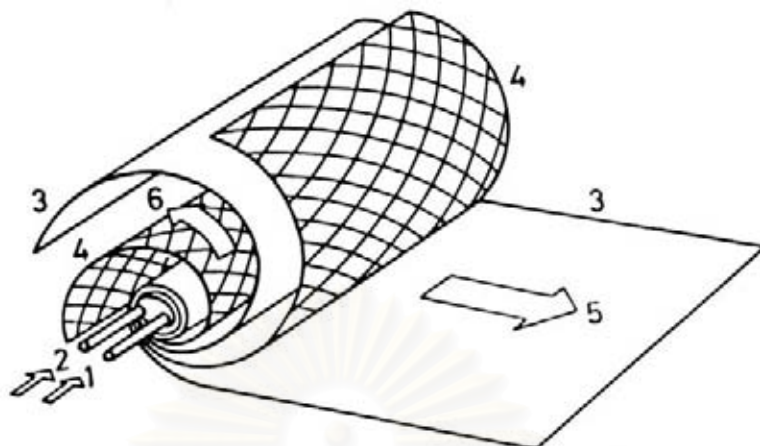
เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายเทมวลเนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อย รูปที่ 2.8 เป็นลักษณะโดยทั่วไปของการสกัดแยกไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง



รูปที่ 2.8 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง [19]

2.2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พองด้วยแผ่นม้วน (spiral-type supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วนแสดงไว้ดังรูปที่ 2.9 ตัวรองรับแบบแผ่นม้วนผลิตขึ้นโดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และแผ่นตาข่าย (mesh spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อ นำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของโมดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี (epoxy) ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว (raffinate) และสารละลายนำกลับที่ได้ (strip) จะไหลออกจากท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของโมดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้คือ โมดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน



รูปที่ 2.9 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน [36]

หมายเลข 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน

หมายเลข 2 ทางเข้าของสารละลายนำกลับ

หมายเลข 3 เยื่อแผ่นเหลว

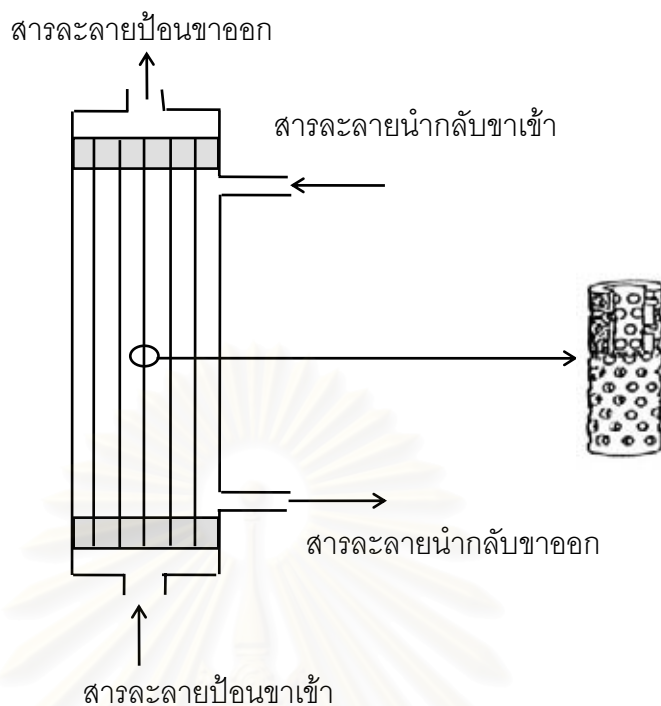
หมายเลข 4 แผ่นกั้น

หมายเลข 5 สารละลายป้อน

หมายเลข 6 สารละลายนำกลับ

2.2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane; HFSLM)

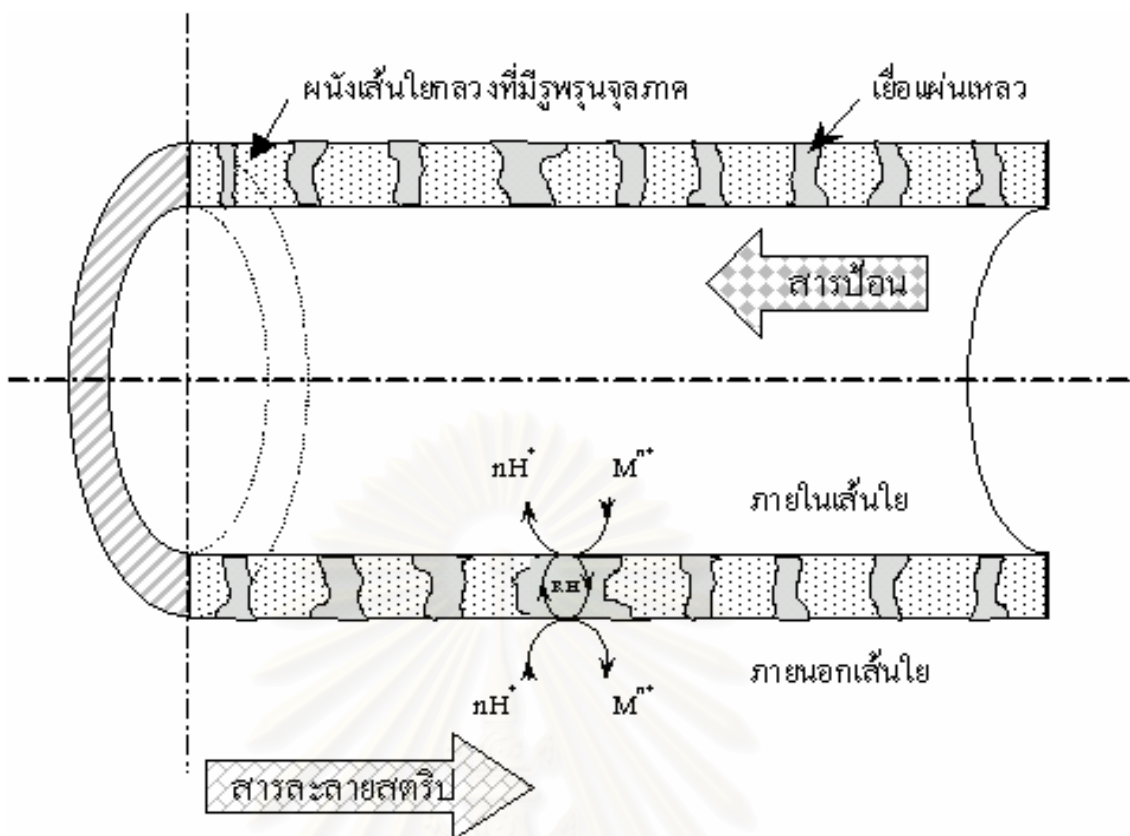
ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงจะใช้วิธีนำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงในโมดูลรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของโมดูลด้วยเรซิน (resin) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ในการสกัดสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในเส้นใยกลวงที่เรียกว่าฝั่งท่อ (tube side) และฝั่งเปลือก (shell side) ซึ่งแล้วแต่ว่าผู้ใช้จะให้สายใดอยู่ฝั่งไหน และมีเยื่อแผ่นเหลวฝังอยู่ภายในเส้นใยกลวงซึ่งอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับนั้นสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบไหลแบบทางเดียวกันและแบบสวนทางกัน รูปที่ 2.10 แสดงถึงการไหลของสายป้อนและสายนำกลับที่เกิดขึ้นภายในท่อซึ่งในที่นี้เป็นลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน



รูปที่ 2.10 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง [15]

การเตรียมกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับทำโดยนำเยื่อแผ่นเหลวมาเคลือบฝังไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลวพุงด้วยตัวรองรับ เมื่อนำตัวรองรับนี้มาขึ้นระหว่างสารละลายสองชนิดที่ไม่ละลายกับเยื่อแผ่นเหลว ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทไอออนโลหะจากสารละลายชนิดแรกไปยังสารละลายอีกชนิดหนึ่งดังรูปที่ 2.11 ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังจะเป็นสารละลายอินทรีย์ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังต้องเป็นวัฏภาคสารละลายของน้ำ

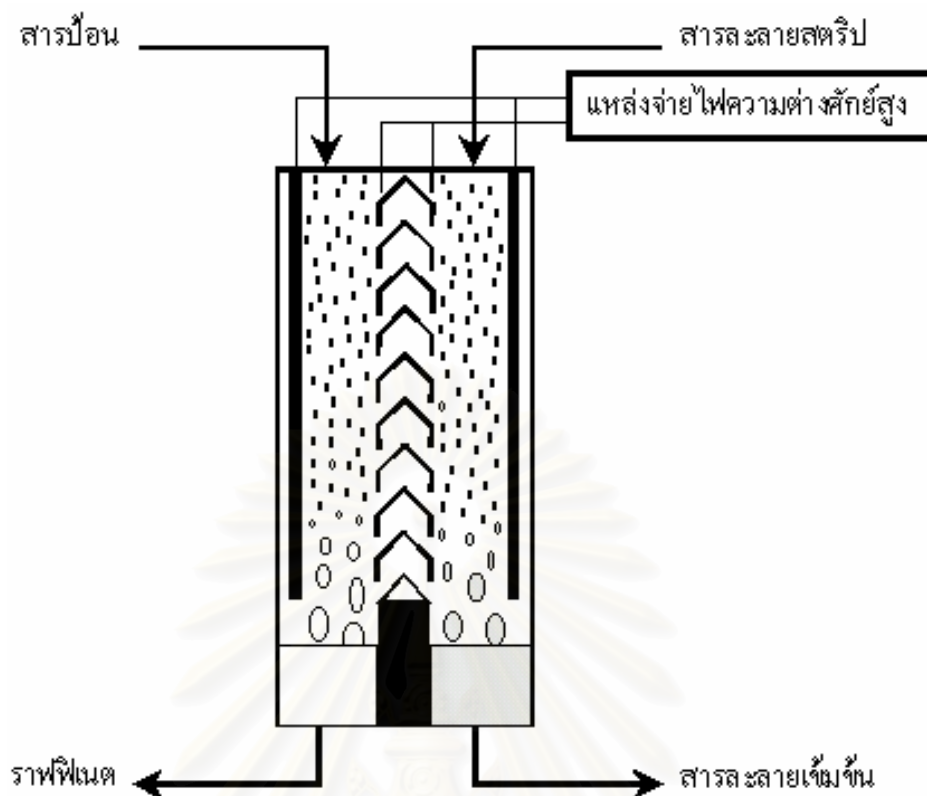
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารป้อนและสารละลายนำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลางหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง

2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Pseudo - Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์มีการพัฒนาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลัมน์ (ชนิดหอสกัดแบบหยด), หลักไฟฟ้าสถิตย์ และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวรวมเข้าด้วยกันซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆได้ เช่นความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย และระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน, ความเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น โดยลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์

จากรูปที่ 2.12 ชุดอุปกรณ์เป็นถังปฏิกรณ์ที่ทำขึ้นเป็นพิเศษ โดยถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์นำกลับ มีแผ่นกั้น (Baffle plate) เป็นโลหะตัวอักษรรูปตัว V ค้ำเรียงต่อกันเว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่ากันโดยมีลวดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอาไว้ อีกทั้งยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะที่บิสำหรับแบ่งกันวิภาคระหว่างสารละลายป้อนขาออก (raffinate) กับสารละลายสตริปขาออกในเซลล์สกัดและเซลล์การนำกลับ มีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มแช่อยู่ซึ่งต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟกระแสตรงความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ ขั้นตอนทำงานเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวิภาคของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์จนได้ระดับของปริมาตรที่ต้องการโดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี้อจะเป็นวิภาคต่อเนื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์จากนั้นป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของวิภาค เกิดการสกัดแยกและนำกลับออกตามกลไกการสกัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตย์ เป็นปัจจัยส่งเสริมให้ประ

สิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น ถึงปฏิกิริยาที่ใช้จะออกแบบเป็นพิเศษเพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อน ผสมกันของภูมิภาคต่างๆ โดยหากมีหยดของสารป้อนหรือสารละลายนำกลับหลุดเข้าไปในช่อง ของแผ่นกันซึ่งกันภูมิภาคทั้งสอง หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดภูมิภาคของสารละลายมีรูป ทรงยืดยาวออกเป็นรูปทรงรี เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของภูมิภาคสารละลาย ดังนั้นเมื่อมีหยดของภูมิภาคของสารละลาย ซึ่งอยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตย์จะรวมกันเป็น หยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและค่าความแตกต่างของความหนา แน่นของภูมิภาคของสารละลายกับภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ที่ จะส่งผลให้ภูมิภาคทั้งสองเคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ อีกทั้งยังมีแผ่นกันที่ได้รับการออกแบบเป็น พิเศษ ซึ่งจะช่วยให้หยดของภูมิภาคที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกันให้รวมตัวกันเองและตก กลับไปยังเซลล์ของมันตามเดิม [13]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ [4]

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพุง		เยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิตย์	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - มีสัดส่วนพื้นที่ ต่อปริมาตรสูง - มีกำลังการผลิตสูง - กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารอินทรีย์ ปริมาณสูง - ใช้พลังงานสูง - ปัญหาการปนเปื้อน - ปัญหาในการใช้ สารลดแรงตึงผิวและการ บำบัด 	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าการคัด เล็กสูง - ไม่ต้องใช้สาร ลดแรงตึงผิว - ใช้สารอินทรีย์ ปริมาณต่ำ - ใช้พลังงานต่ำ - ขยายขนาดง่าย - อัตราการถ่ายเทมวลสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - สัดส่วนพื้นที่ ต่อปริมาตรต่ำ - เยื่อแผ่นเหลวมี ประสิทธิภาพต่ำ - การสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว 	<ul style="list-style-type: none"> - มีเสถียรภาพสูง - ประสิทธิภาพสูง - การปนเปื้อนต่ำ - ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว 	<ul style="list-style-type: none"> - กำลังการผลิตต่ำ - สารอินทรีย์ ต้องมีความ เป็นขั้วต่ำ - สารอินทรีย์ ต้องเป็น ภูมิภาคต่อเนื่อง เท่านั้น - ใช้สารอินทรีย์ ปริมาณมาก

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตย์จะมีข้อดีอยู่มากมาย เช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ ต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็น ขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรไม่สูง วัฏภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ และใช้กับกระบวนการที่วัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวัฏภาคต่างๆ ในกระบวนการต่ำ อันเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นต้น [14] ดังนั้น เทคนิคการสกัดแยกด้วยเทคนิคต่างๆ ก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งานและพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไป ตารางที่ 2.1 เป็นการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่ารูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีข้อดีอยู่มากมายดังที่งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับในการสกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกัน

2.3 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด [35] ดังนี้

2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อยคือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractant) และสารสกัดชนิดคีเลท (Chelate extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-COOH$, $=P(O)OH$, $-SO_3H$ ส่วนประเภทหลังสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะไอออนโลหะชนิดที่มีประจุ

บวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ดังสมการ



เครื่องหมายขีดด้านบนหมายความว่าสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารอินทรีย์ สมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ [35] สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (Di-2-ethylhexyl phosphoric acids, D2EHPA) สารสกัดประเภทคีเลตได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วย ดอนเนอร์กรุป (Donor groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลตเชิงพาณิชย์มีอยู่ 2 ประเภทได้แก่ (ก) กลุ่มของ 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)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเป็นเกลือในขณะสัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด ใช้กันมากจะเป็นพวกเอมีน และแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary, RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary, R_2NH) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary, R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium salts, R_3N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Anionic species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้นเอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



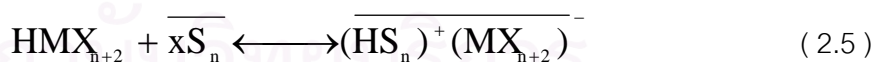
นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีชื่อ $\text{R}_3\text{N}^+\text{HA}^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ $[\text{MY}]^{n-}$ จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการ 2.2

2.3.3. สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral Extractant)

สารสกัดประเภทกลาง (Neutral) หรือชนิดโซลเวท (Solvating Extractant) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะดอนเนอร์กรุ๊ปจึงไม่สามารถแตกโปรตรอนได้ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถของไอออนโลหะในการที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำ เช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมกลางของสาร ประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตรอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดโซลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดโซลเวทดังสมการ 2.4 และสมการ 2.5



2.4 กลไกการถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวลในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นการถ่ายเทแบบควบคู่ (couple transport) [21] คือ กระบวนการถ่ายเทมวลของไอออนสองชนิดที่เกิดขึ้นพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งเราต้องการที่จะถ่ายเทไอออนโลหะที่ต้องการแยกให้เดินทางจากด้านสารละลาย

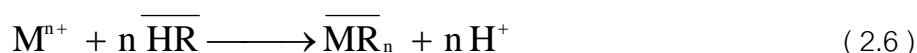
ป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ แต่แรงขับของการถ่ายเทมวลคือผลต่างของความเข้มข้นของไอออนชนิดหนึ่งไม่ใช่ไอออนของโลหะที่เราต้องการจะแยก ดังนั้นจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่เราต้องการได้ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อนก็ตาม

เยื่อแผ่นเหลวที่คั่นอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับนั้นจะผสมสารสกัดซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ ไอออนที่ต้องการสกัดจะเกิดสารเชิงซ้อนกับสารสกัดที่ผิวสัมผัสด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นไอออนของสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลาง สารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ข้ามเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านตรงข้ามซึ่งมีสารละลายนำกลับ และจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว ไอออนของโลหะจะหลุดไปอยู่ที่ด้านสารละลายนำกลับในขณะที่สารประกอบเชิงซ้อนจะกลายเป็นสารสกัดดั้งเดิมแล้วแพร่กลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาอยู่ที่ด้านเดิม(ด้านสารละลายป้อน)เพื่อมารับไอออนโลหะอีกครั้ง ดังนั้นสารสกัดจะทำหน้าที่คล้ายกับตัวขนย้ายไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวนั่นเอง

การถ่ายเทมวลแบบควบคู่กันแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

2.4.1 การถ่ายเทแบบสวนทาง (Counter-Transport)

คือการถ่ายเทที่ไอออนทั้งสองเคลื่อนที่สวนทางกันผ่านเยื่อแผ่นเหลวการเกิดปฏิกิริยาไอออนโลหะ M^{n+} ที่อยู่ในสารละลายป้อน ทำปฏิกิริยากับสารสกัด RH ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n และไฮโดรเนียมไอออน H^+ ดังสมการ 2.6 ซึ่งไฮโดรเนียมไอออนนั้นอยู่ในสารละลายป้อน และสารประกอบเชิงซ้อน MR_n อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว

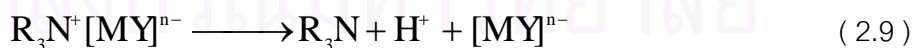
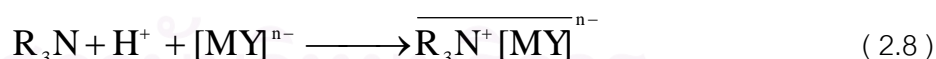


สารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) ที่เกิดขึ้นในจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสนี้ (MR_n) จะทำปฏิกิริยาแบบย้อนกลับกับไฮโดรเนียมไอออนที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับดังสมการ 2.7 และได้สารสกัด (RH) กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.13



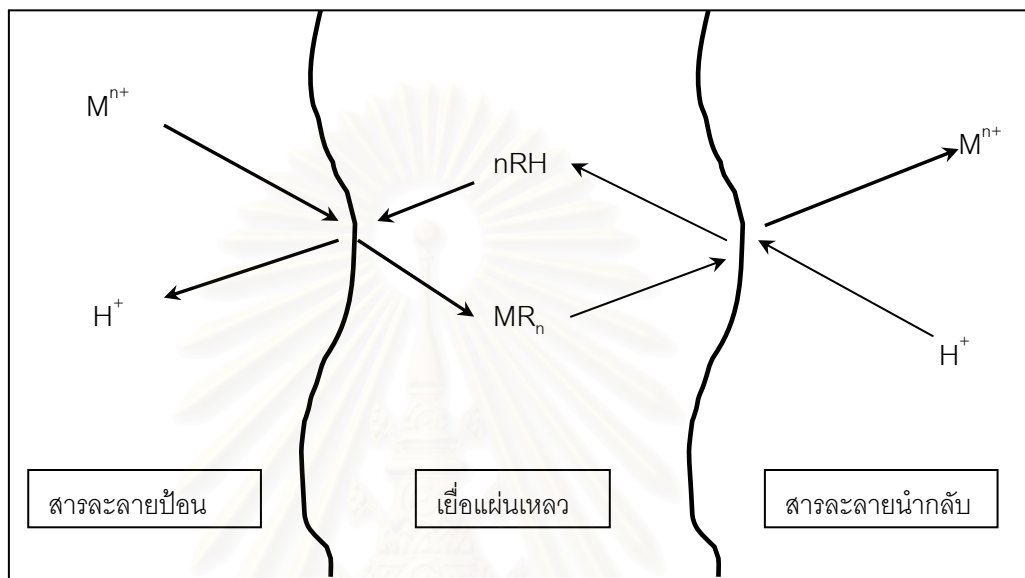
2.4.2 การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (Counter-Transport)

การถ่ายเทชนิดไปทางเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่เป็นเบส ไอออนของโลหะและ H^+ จะเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว ในการเกิดปฏิกิริยานั้น ทั้งไอออนโลหะที่อยู่ในรูปประจุลบ $[MY]^{n-}$ และไฮโดรเนียมไอออน H^+ ที่อยู่ในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัด R_3N ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $R_3NH^+[MY]^{n-}$ ดังสมการ 2.8 ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน $R_3NH^+[MY]^{n-}$ อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว

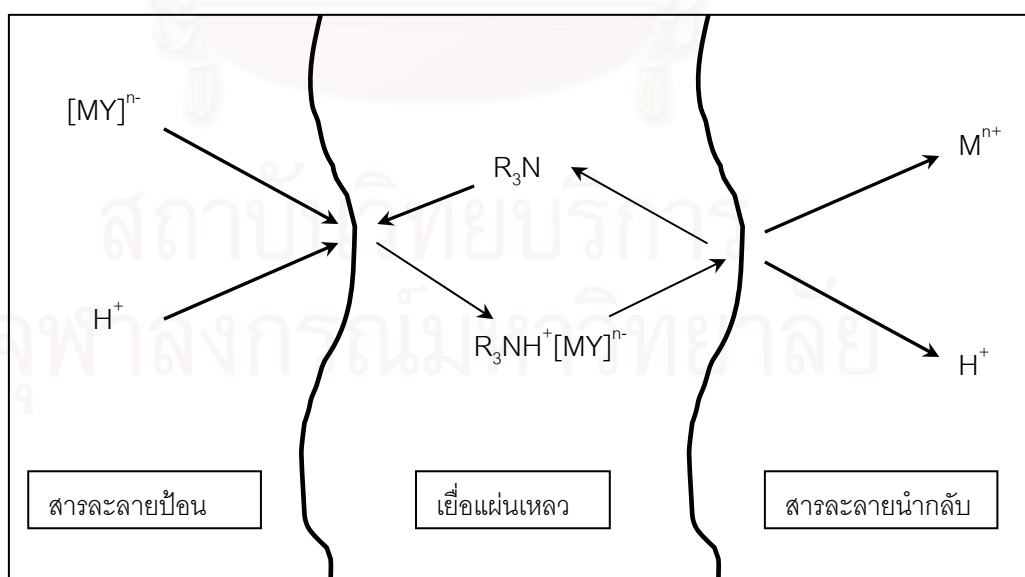


สารประกอบเชิงซ้อน $R_3NH^+[MY]^{n-}$ ที่เกิดขึ้นในจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสนี้ สารประกอบเชิงซ้อน $R_3NH^+[MY]^{n-}$ จะทำปฏิกิริยาแบบย้อน

กลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับดังสมการ 2.9 และได้สารสกัด R_3N กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของไอออนโลหะและไฮโดรเนียมไอออนของการถ่ายเทแบบสวนทาง



รูปที่ 2.14 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของไอออนโลหะและไฮโดรเนียมไอออนของการถ่ายเทแบบทางเดียวกัน

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน [5]

- 1) การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
- 2) การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
- 3) การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ
- 4) การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ
- 5) การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ

2.5 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction)

การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction) หมายถึง การสกัดแยกไอออนโลหะโดยใช้สารสกัดสองชนิดมาผสมกันแล้วได้ประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับการนำสารสกัดทั้งสองชนิดนั้นมาแยกกันสกัดแล้วนำผลการสกัดมารวมกัน [16] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Coefficient, S.C.) Taube และ Siekierski [34] ได้ให้นิยามไว้ดังนี้

$$S.C. = \log \left(\frac{D_{(1,2)}}{D_{(1)} + D_{(2)}} \right) \quad (2.10)$$

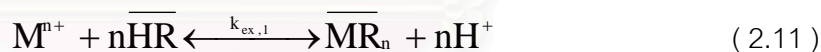
เมื่อ $D_{(1)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) เมื่อใช้สารสกัดชนิดแรก

$D_{(2)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) เมื่อใช้สารสกัดชนิดที่สอง

$D_{(1,2)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) เมื่อนำสารสกัดทั้งสองชนิดนั้น ผสมกัน

เมื่อ D คือ อัตราส่วนการกระจาย หรือ Distribution ratio หมายถึง อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน ถ้าค่า $S.C.$ มากกว่า 0 หมายความว่า การเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) แต่ถ้าค่า $S.C.$ น้อยกว่า 0 หมายความว่า ชนิดของสารสกัดที่นำมาผสมกันนี้ทำให้ความสามารถในการสกัดด้อยลง [16]

สารสกัดทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันเพื่อที่จะให้เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์นั้นจะต้อง มีสารสกัดชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นสารสกัดหลักซึ่งโดยมากจะใช้ HTTA เป็นสารสกัดหลักและสารสกัดอีกชนิดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน(ดอเนอร์)คอยเสริมการสกัด สารสกัดจำทำให้อิเล็กตรอน(ดอเนอร์)นี้จะเป็นสารสกัดที่ไม่สามารถแตกโปรตอนได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวไว้เกิดปฏิกิริยาซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักและไปจับโลหะอีกทีหนึ่ง [27] สารสกัดที่เป็นพวกดอเนอร์เช่น Tri-n-octylamine(TOA) Tri-n-butylphosphate(TBP) Tri-n-octylphosphineoxide (TOPO) aliquat chloride ฯลฯ ปฏิกิริยาของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) จะเริ่มจากปฏิกิริยา



$$k_{ex,1} = \frac{[H^+]^n [\overline{MR}_n]}{[M^{n+}] [\overline{HR}]^n} \quad (2.12)$$

ซึ่งสมการ 2.11 เป็นการสกัดของสารสกัดหลักซึ่งเป็นสารสกัดชนิดกรดโดยทั่วไป เมื่อ R คือสารสกัดหลัก และ $k_{ex,1}$ คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาในกรณีที่สารสกัดหลักทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะโดยตรง ส่วนปฏิกิริยาของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) คือ สารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นดอเนอร์ (S) จะทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลัก HR แล้วไปทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะในสารละลายป้อนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอีกชนิดคือ MR_nS_x ดังสมการ 2.13 ทำให้สกัด

โลหะได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้สารสกัดที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (ดอนเนอร์) ยังสามารถไปจับโลหะโดยไม่ต้องทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักก่อนดังสมการ 2.14 ซึ่งจะยิ่งทำให้สกัดโลหะได้มากยิ่งขึ้นและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนคือ $\overline{MX_nS_p}$ เมื่อ X คือไอออนประจุลบที่อยู่ในสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของน้ำ



จากสมการ 2.13 และ 2.14 จะได้ว่า

$$k_{ex,1+2} = \frac{[H^+][\overline{MR_nS_x}]}{[M^{n+}][\overline{S}]^x[\overline{HR}]^n} \quad (2.15)$$

$$k_{ex,2} = \frac{[\overline{MX_nS_p}]}{[M^{n+}][\overline{X^-}]^n[\overline{S}]^p} \quad (2.16)$$

เมื่อ $k_{ex,1+2}$ และ $k_{ex,2}$ คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ และค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดโดยสารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นดอนเนอร์โดยตรงตามลำดับและอัตราส่วนการกระจาย (distribution ratio) คือ

$$D_{(1)} = \frac{[\overline{MR_n}]}{[M^{n+}]} = \frac{k_{ex,1}[\overline{HR}]^n}{[H^+]} \quad (2.17)$$

$$D_{(2)} = \frac{[MX_n S_p]}{[M^{n+}]} = k_{ex,2} [X^-] [S]^p \quad (2.18)$$

$$D_{(1+2)} = D_{(1)} + D_{(2)} + \frac{[MR_n S_x]}{[M^{n+}]} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.17 , 2.18 , 2.19 จะได้ว่า

$$D_{(1+2)} = \frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-] [\overline{S}]^p + K_{ex,1+2} \frac{[\overline{S}]^x [\overline{HR}]^n}{[H^+]} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ 2.10 จะได้ว่า

$$S.C. = \log \left(\frac{\frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-] [\overline{S}]^p + K_{ex,1+2} \frac{[\overline{S}]^x [\overline{HR}]^n}{[H^+]}}{\frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-] [\overline{S}]^p}} \right) \quad (2.21)$$

เนื่องจากค่าของ $K_{ex,2}$ นั้นมีค่าน้อยมากเพราะสารสกัดที่เป็นดอเนอรันั้นสามารถจับโลหะที่เป็นไอออนบวกได้น้อยมากจึงให้เทอมที่มี $K_{ex,2}$ นั้นเป็นศูนย์จากสมการ 2.11 จะได้ว่า

$$S.C. = \log \left(1 + \frac{K_{ex,1+2} [\overline{S}]^x}{K_{ex,1}} \right) \quad (2.22)$$

$$S.C. = \log (1 + \beta_{n,x} [S]^x) \quad (2.23)$$

โดยที่

$$\beta_{n,x} = \frac{K_{ex,1+2}}{K_{ex,1}} \quad (2.24)$$

$\beta_{n,x}$ หมายถึงค่าคงที่ความเสถียรของปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) ที่เกิดในวัฏภาคน้ำมันหรือในเมมเบรน จะเห็นได้ว่า $\beta_{n,x}$ คืออัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดผสมกันกับ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดหลักเพียงชนิดเดียว นั่นคืออัตราส่วนของค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2.13 กับสมการที่ 2.11 ดังนั้น $\beta_{n,x}$ ก็คือค่าคงที่สมดุลของสมการที่ 2.13 ลบด้วยสมการที่ 2.11 คือ



ซึ่งสมการที่ 2.15 นี้เป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) ที่เกิดในเมมเบรนโดยมี $\beta_{n,x}$ เป็นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ถ้า $\beta_{n,x}$ มีค่ามาก หมายถึงเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction) มาก และถ้าสารสกัดที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนนั้นมีการทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนหลายตัวสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยารวม

$$S.C. = \left(1 + \sum_{i=1}^{i=x} \beta_{n,i} [\overline{S}]^i\right) \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.26 จะเห็นได้ว่าไอออนที่อยู่ในสารละลายป้อน เช่น M^{n+} , X^- , H^+ นั้นไม่มีผลต่อค่า $\beta_{n,x}$ นั่นคือไม่มีผลต่อการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction)

บทที่ 3

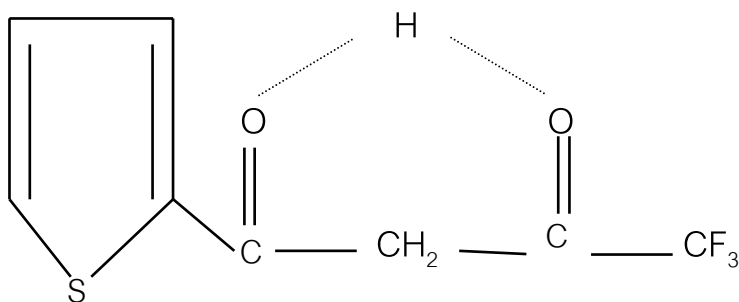
สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ต่าง ๆ ขั้นตอนและวิธีการทดลองในแต่ละตัวแปร ในการศึกษาการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

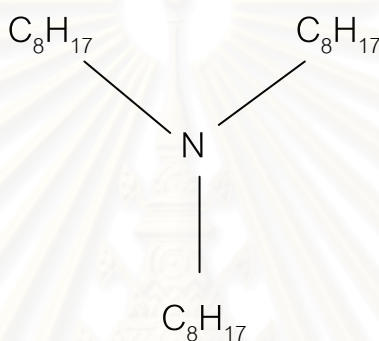
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	ระดับคุณภาพ	บริษัท
ไอออนโลหะ	Nd_2O_3	Analytical	Aldrich
	$\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Analytical	Merck
สารละลายป้อน	HNO_3	Analytical	Merck
	LiOH	Analytical	Aldrich
สารละลายสตรีป	HNO_3	Analytical	Merck
สารสกัด	Thenoyltrifluoroacetone (HTTA)	Analytical	Sigma
	Trioctylamine (TOA)	Analytical	Merck
ตัวทำละลาย	เบนซีน	Analytical	Merck



รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้างของสารสกัด Thenoyltrifluoroacetone (HTTA)

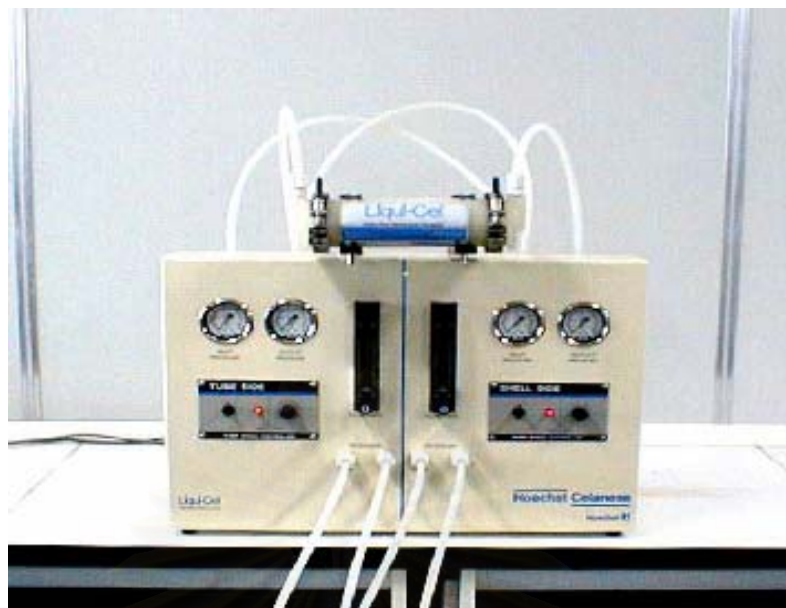


รูปที่ 3.2 สูตรโครงสร้างของ Trioctylamine (TOA) ที่ใช้ผสมกับ HTTA

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ประกอบด้วยเครื่องสูบ ชุดควบคุมความเร็ว มาตรฐานวัดการไหล และมาตรฐานวัดความดัน ทั้งหมดอย่างละสองชุดเพื่อวัดในด้านฝั่งท่อ (tube) และฝั่งเปลือก (shell) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4

3.2.2 ตัวรองรับชุดเส้นใยกลวงของ Celgard[®] X-30 240 Microporous Polypropylene Hollow Fiber โดยที่ชุดเส้นใยกลวงมีข้อมูลรายละเอียดดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 ชุดการทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของสมบัติต่าง ๆ ของชุดเส้นใยกลวง

สมบัติ	ชนิด / ขนาด
วัสดุเส้นใยกลวง	พอลิโพรไพลีน (Polypropylene)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลวง	30 %
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 Kg/cm ² (60 psi)
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m ² (15.2 ft ²)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 cm ² /cm ³ (74.4 m ² / m ³)
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1° c ถึง 60° c
มิติของชุดเส้นใยกลวง (D x L)	8' 28 cm (2.5' 8 inch)

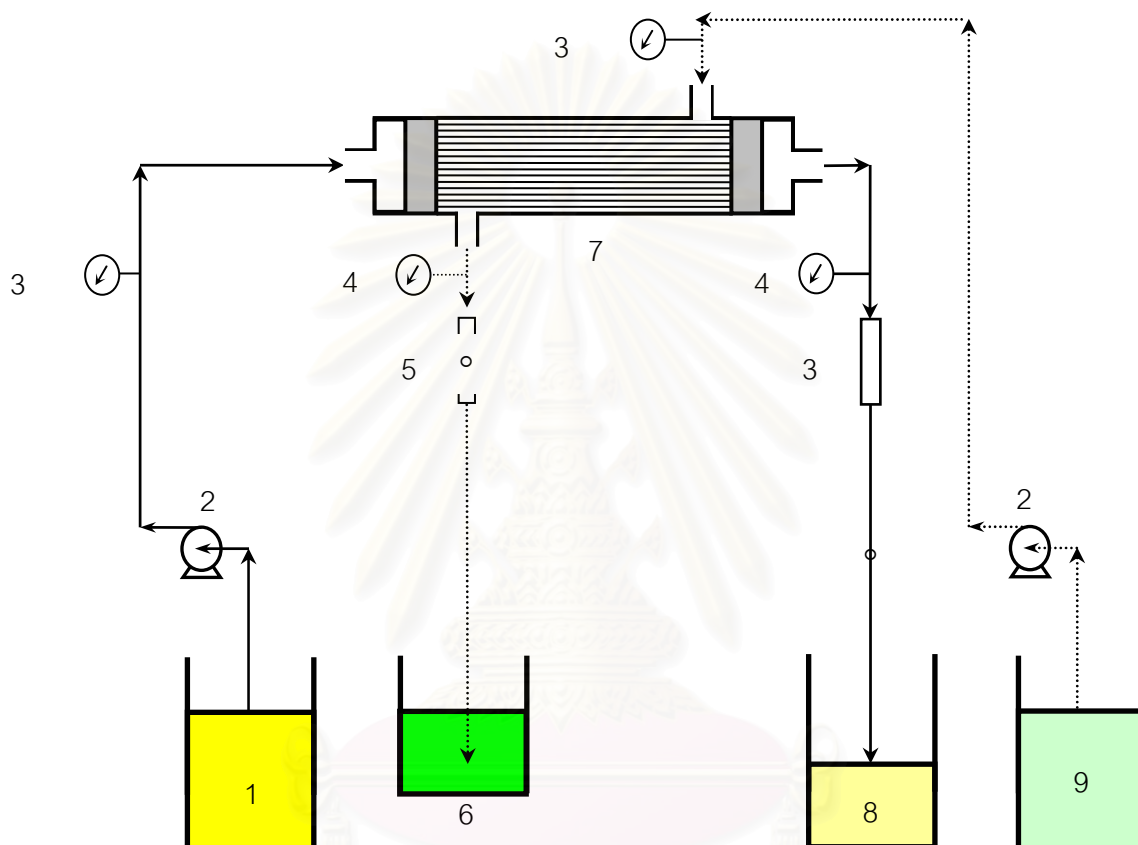
- 3.2.3 เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH Meter) รุ่น HI 8417 Microprocess Bench pH/ °C Meter ของบริษัท Hanna Instruments
- 3.2.4 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP) เพื่อใช้ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดีเมียม

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียม ไอออนออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและหาเวลาที่เหมาะสมในการปฏิบัติการ มีขั้นตอนการทำดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเอาไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร แล้วเก็บตัวอย่างของสารละลายนำกลับเข้าเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเริ่มต้น
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด HTTA ผสมกับ TOA ในตัวทำละลายเบนซีนความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร และ 1% โดยปริมาตรตามลำดับ
- (4) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของตัวพุงเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่งท่อและฝั่งเปลือกให้ไหลเวียนประมาณ 20 นาที เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง
- (5) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อม ๆ กันในลักษณะสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียวโดยมีอัตราการไหลทั้งสองฝั่งที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.4
- (6) เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนขออกและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 5 , 10 , 15 , 20 , 30 , 40 และ 50 นาที

- (7) นำตัวอย่างที่เก็บมาได้ทั้งหมดไปวิเคราะห์หาปริมาณของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนด้วยเครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)



รูปที่ 3.4 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (one through mode) ซึ่งของไหลในกระบวนการมีทิศทางการไหลสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง โดยที่ 1 คือ ถังของสารป้อนขาเข้า, 2 คือ ปั๊มสูบ, 3 คือ เกจวัดความดันขาเข้า, 4 คือ เกจวัดความดันขาออก, 5 คือ มาตรฐานวัดอัตราการไหล, 6 คือ ถังของสารละลายนำกลับขาออก, 7 คือ ชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง, 8 คือ ถังของสารป้อนขาออก, 9 คือ ถังของสารละลายนำกลับขาเข้า [6]

3.3.2 **ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนต่อการสกัดแยกสารละลาย ผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงที่สุดมีขั้นตอนการทำดังนี้**

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 1.0 โดยใช้ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) และเก็บตัวอย่างสารละลาย ป้อนเริ่มต้นเอาไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรปริมาตร 5 ลิตรแล้วเก็บตัวอย่างของสารละลายนำกลับเข้าเพื่อนำวิเคราะห์หาปริมาณของแลนทานัมและนีโอติเมียมเริ่มต้น
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด HTTA ผสมกับสารสกัด TOA ในตัวทำละลายเบนซีนความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร และ 1% โดยปริมาตรตามลำดับ
- (4) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของตัวพองเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่งทอ และฝั่งเปลือก ให้ไหลเวียนประมาณ 20 นาที เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง
- (5) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อม ๆ กันในลักษณะสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียวโดยมีอัตราการไหลของทั้งสองฝั่งที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีดังรูปที่ 3.4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (6) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเป็น 1.5 , 2.0 , 2.5 , 3.0 , 3.5 , 4.0
- (7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากทุกการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมด้วยเครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)

3.3.3 ศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ต่อการสกัดแยกสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและหาค่าความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงสุด มีขั้นตอนการทำดังนี้

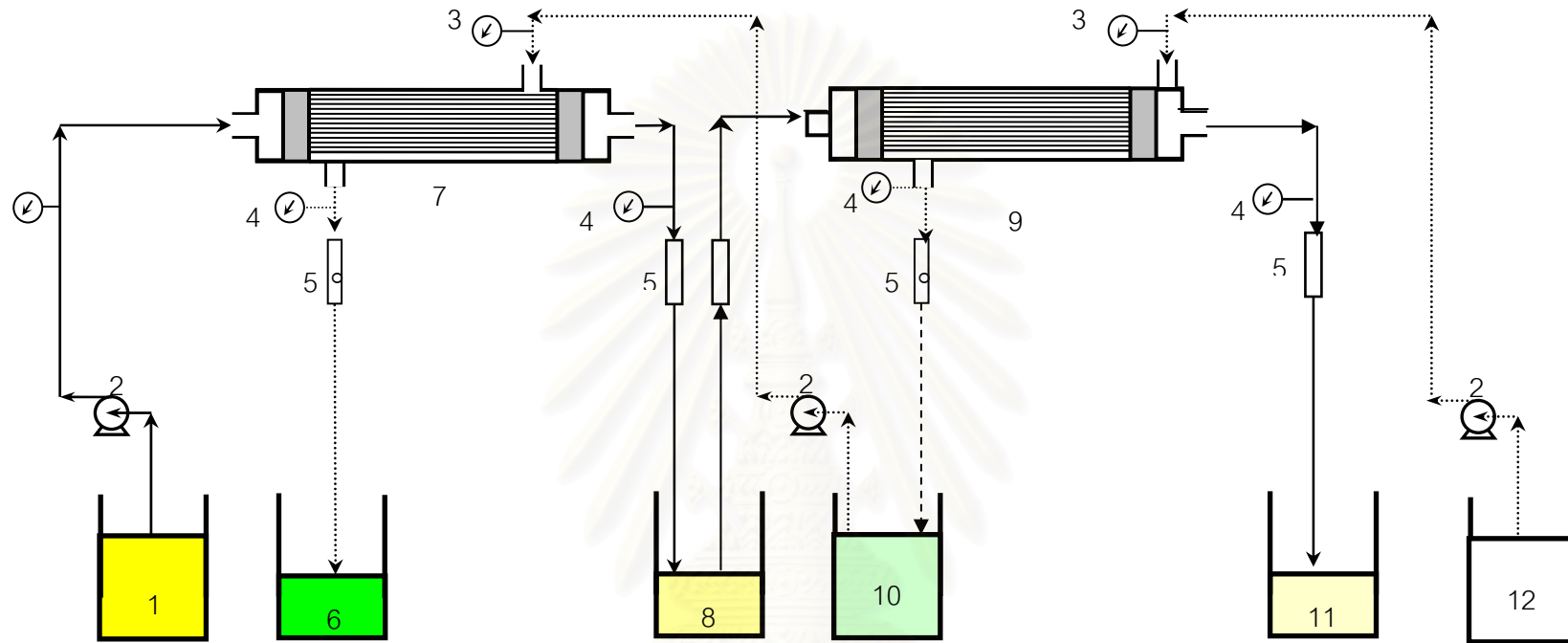
- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.5 ซึ่งเป็นค่าที่สกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้ดีที่สุด (จากข้อ 3.3.2) โดยใช้ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรปริมาตร 5 ลิตร แล้วเก็บตัวอย่างของสารละลายนำกลับเข้าเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนเริ่มต้น
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด HTTA ผสมกับ TOA ในตัวทำละลายเบนซีนความเข้มข้น 0.005 โมลต่อลิตร และ 1% โดยปริมาตรตามลำดับ
- (4) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของตัวพองเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่งท่อและฝั่งเปลือก ให้ไหลเวียนประมาณ 20 นาที เพื่อให้เยื่อแผ่น เหลวยึดตรึงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง
- (5) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อม ๆ กันในลักษณะสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว โดยมีอัตราการไหลทั้งสองฝั่งที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีดังรูปที่ 3.4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (6) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ HTTA เป็น 0.01, 0.02 และ 0.04 โมลต่อลิตร
- (7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากทุกการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมด้วยเครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)

3.3.4 ศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของ TOA ต่อการสกัดแยกสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและหาค่าความเข้มข้นของ TOA ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงสุด มีขั้นตอนการทำดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 10 ลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.5 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถสกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้ดีที่สุด (จากข้อ 3.3.2) โดยใช้ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร แล้วเก็บตัวอย่างของสารละลายนำกลับเข้าเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนเริ่มต้น
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด HTTA ในตัวทำละลายเบนซีนความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้ดีที่สุด (จากข้อ 3.3.3)
- (4) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของตัวพองเส้นใยกลวงทั้งทางด้านฝั่งท่อและฝั่งเปลือก ให้ไหลเวียนประมาณ 20 นาที เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง
- (5) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อม ๆ กันในลักษณะสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว โดยมีอัตราการไหลทั้งสองฝั่งที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีดังรูปที่ 3.4 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (6) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 5 โดยผสม TOA เข้าไปในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ TOA เป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6% โดยปริมาตร
- (7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากทุกการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมด้วยเครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)

3.3.5 ศึกษาถึงผลของจำนวนโมดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดแยกสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงมีขั้นตอนการทำดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร และปรับค่าความเป็นกรด - ด่างเป็น 2.5 ซึ่งเป็นค่าที่สกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้ดีที่สุด (จากข้อ 3.3.2) โดยใช้ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรปริมาตร 5 ลิตร แล้วเก็บตัวอย่างของสารละลายนำกลับเข้าเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของแลนทานัมและนีโอติเมียม
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด HTTA ในตัวทำละลายเบนซีนความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้ดีที่สุด (จากข้อ 3.3.3) และความเข้มข้นของ TOA เท่ากับ 3% โดยปริมาตรตามลำดับ (จากข้อ 3.3.4) ซึ่งเป็นค่าที่สกัดแยกไอออนทั้งสองชนิดออกจากกันได้ดีที่สุด
- (4) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของตัวพองเส้นใยกลวงเป็นจำนวนสองโมดูลทั้งทางด้านฝั่งท่อและฝั่งเปลือกให้ไหลเวียนประมาณ 20 นาที เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง
- (5) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อม ๆ กันในลักษณะสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว โดยมีอัตราการไหลทั้งสองฝั่งที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีตั้งรูปที่ 3.5
- (6) เนื่องจากเมื่อสารละลายป้อนขาออกออกจากโมดูลที่หนึ่งแล้วจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลง จึงมีการปรับค่าความเป็นกรดต่างของละลายป้อนขาออกที่ออกจากโมดูลที่หนึ่งให้มีค่าเป็น 2.5 ดังเดิมโดยใช้ LiOH เช่นกัน จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่โมดูลที่สองต่อไป
- (7) เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อน สารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับที่ออกจากโมดูลที่หนึ่ง สารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับที่ออกจากโมดูลที่สองเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)



รูปที่ 3.5 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (one through mode) ซึ่งของไหลในกระบวนการมีทิศทางไหลสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวงโดยที่ 1 คือ ถังของสารป้อนเข้า, 2 คือ ปั๊มสูบ, 3 คือ เกจวัดความดันขาเข้า, 4 คือ เกจวัดความดันขาออก, 5 คือ มาตรการวัดอัตราการไหล, 6 คือ ถังของสารละลายนำกลับขาออกจากโมดูลที่หนึ่ง, 7 คือ ชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวงโมดูลที่หนึ่ง, 8 คือ ถังของสารละลายป้อนเข้าขาออกจากโมดูลที่หนึ่งและป้อนเข้าสู่โมดูลที่สองอย่างต่อเนื่อง, 9 คือ ชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวงโมดูลที่สอง, 10 คือ ถังของสารละลายนำกลับขาออกจากโมดูลที่สอง, 11 คือ ถังของสารละลายป้อนเข้าขาออกจากโมดูลที่สอง, 12 คือ ถังของสารละลายนำกลับขาเข้าโมดูลที่สอง

3.3.6 ศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนต่อการสกัดแยกสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทำดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมเข้มข้น 10 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.5 ซึ่งเป็นค่าที่สกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้ดีที่สุด (จากข้อ 3.3.2) โดยใช้ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น
- (2) เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร แล้วเก็บตัวอย่างของสารละลายนำกลับเข้าเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนเริ่มต้น
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด HTTA ในตัวทำละลายเบนซีนความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้ดีที่สุด (จากข้อ 3.3.3) และความเข้มข้นของ TOA เท่ากับ 3% โดยปริมาตรตามลำดับ (จากข้อ 3.3.4) ซึ่งเป็นค่าที่สกัดแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้ดีที่สุด
- (4) ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในโมดูลของตัวพุงเส้นใยกลวงเป็นจำนวนสองโมดูลทั้งทางด้านฝั่งท่อและฝั่งเปลือกให้ไหลเวียนประมาณ 20 นาที เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง
- (5) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อม ๆ กันในลักษณะสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว โดยมีอัตราการไหลทั้งสองฝั่งที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที่ดังรูปที่ 3.5
- (6) เนื่องจากเมื่อสารละลายป้อนขาออกออกจากโมดูลที่หนึ่งแล้วจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลง จึงมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของละลายป้อนขาออกที่ออกจากโมดูลที่หนึ่งให้มีค่าเป็น 2.5 ดังเดิมโดยใช้ LiOH เช่นกัน จากนั้นจึงป้อนเข้าสู่โมดูลที่สองต่อไป
- (7) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 6 โดยผสม TOA เข้าไปในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยเปลี่ยนความเข้มข้นแลนทานัมและนีโอติเมียมในสารละลายป้อนเป็น 30 , 50 , 70 , และ 90 ppm

- (8) เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อน สารละลายป้อนขาออก สารละลายนำกลับที่ออกจากโมดูลที่หนึ่ง สารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับที่ออกจากโมดูลที่สองเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแวนทານัมและนีโอติเมียมด้วยเครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

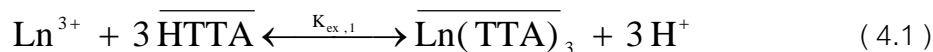
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่ ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ผลของความเข้มข้นของสารสกัด Thenoyltrifluoroacetone (HTTA) และผลของความเข้มข้นของสารสกัด Trioctylamine (TOA) ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว และผลของการเพิ่มจำนวนโมดูลที่พุงเส้นใยกลวงและผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อน ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

กระบวนการสกัดในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลแบบคู่ควบ (Coupled transport) ชนิดการถ่ายเทแบบสวนทาง มีสารที่แพร่ผ่าน (Permeate) เป็นไอออนสามตัวคือ แลนทานัมไอออน (La^{3+}) นีโอดีเมียมไอออน (Nd^{3+}) และไฮโดรเจนไอออน (H^+) โดยแลนทานัมไอออนและนีโอดีเมียมไอออนจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ แต่ไฮโดรเจนไอออนจะแพร่สวนทางกันคือจากด้านสารละลายนำกลับไปยังด้านสารละลายป้อน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีสองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาการสกัดที่เกิดจากการสกัดของสารสกัด HTTA เพียงชนิดเดียว และปฏิกิริยาการช่วยสกัดของสารสกัด TOA

1. ปฏิกิริยาของสารสกัดหลัก HTTA

ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะมีแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนเป็นสารตั้งต้นอยู่โดยจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด HTTA ที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยจะทำปฏิกิริยากันที่ผิวสัมผัสเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สองชนิดคือสารประกอบเชิงซ้อน $M(TTA)_3$ ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและไฮโดรเจนไอออนในวัฏภาคสารละลายป้อน และจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเรื่อยๆจนกว่าจะเข้าสู่สมดุล สามารถแสดงให้เห็นได้ดังสมการ



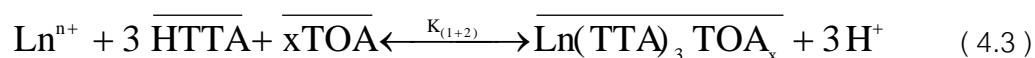
โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{\text{ex},1} = \frac{[\text{LnR}_3][\text{H}^+]^3}{[\text{Ln}^{3+}][\text{HA}]^3} \quad (4.2)$$

ในทำนองเดียวกันที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุล และมีค่าคงที่สมดุลค่าเดียวกันกับปฏิกิริยาไปข้างหน้า แต่แรงขับของปฏิกิริยาการสกัดนี้คือไฮโดรเจนไอออน ฉะนั้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนทางด้านสารละลายนำกลับมากกว่าด้านสารละลายป้อนก็ยังสามารถสกัดไอออนของโลหะจากสารละลายป้อนให้แพร่มาทางด้านสารละลายนำกลับได้ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านสารละลายนำกลับจะมีค่ามากกว่าก็ตาม

2 ปฏิกิริยาการช่วยสกัดของสารสกัด TOA

ภายในเยื่อแผ่นเหลวจะมีสารดอเนอร์ในนี้คือ Trioctylamine จะร่วมกันกับสารสกัด HTTA ในการทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะ โดยจะทำปฏิกิริยากันที่ผิวสัมผัสเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สองชนิดเช่นกันคือสารประกอบเชิงซ้อน MR_nS_x อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและไฮโดรเจนไอออนในวัฏภาคสารละลายป้อน และจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเรื่อยๆจนกว่าจะเข้าสู่สมดุล ดังสมการที่ 4.3 [27]



โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$k_{\text{ex.1+2}} = \frac{[\text{H}^+]^3 [\text{Ln}(\text{TTA})_3 \text{TOA}_x]}{[\text{Ln}^{3+}] [\text{TOA}]^x [\text{HTTA}]^3} \quad (4.4)$$

ในทำนองเดียวกันกับการปฏิกิริยาสกัดด้วย HTTA ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุล และมีค่าคงที่สมดุลค่าเดียวกันกับปฏิกิริยาไปข้างหน้า แต่แรงขับของปฏิกิริยาการสกัดนี้คือไฮโดรเจนไอออน ฉะนั้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนทางด้านสารละลายนำกลับมากกว่าด้านสารละลายป้อนก็ยังสามารถสกัดไอออนของโลหะจากสารละลายป้อนให้แพร่มาทางด้านสารละลายนำกลับได้ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านสารละลายนำกลับจะมีค่ามากกว่าก็ตาม

สำหรับสารสกัด TOA นั้นจะไม่เกิดปฏิกิริยาการสกัดกับไอออนของโลหะได้โดยตรง เนื่องจาก TOA นั้นเป็นสารสกัดชนิดที่เป็นเบส จะทำปฏิกิริยากับไอออนลบหรือไอออนโลหะเชิงซ้อนที่เป็นประจุลบเท่านั้น แต่ในสารละลายป้อนนั้นมีแต่ไอออนที่เป็นบวกคือ La^{3+} และ Nd^{3+} ทำให้ TOA ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะในสารละลายป้อนได้ ดังนั้นปฏิกิริยาของการสกัดในสมการที่ 2.14 จึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้

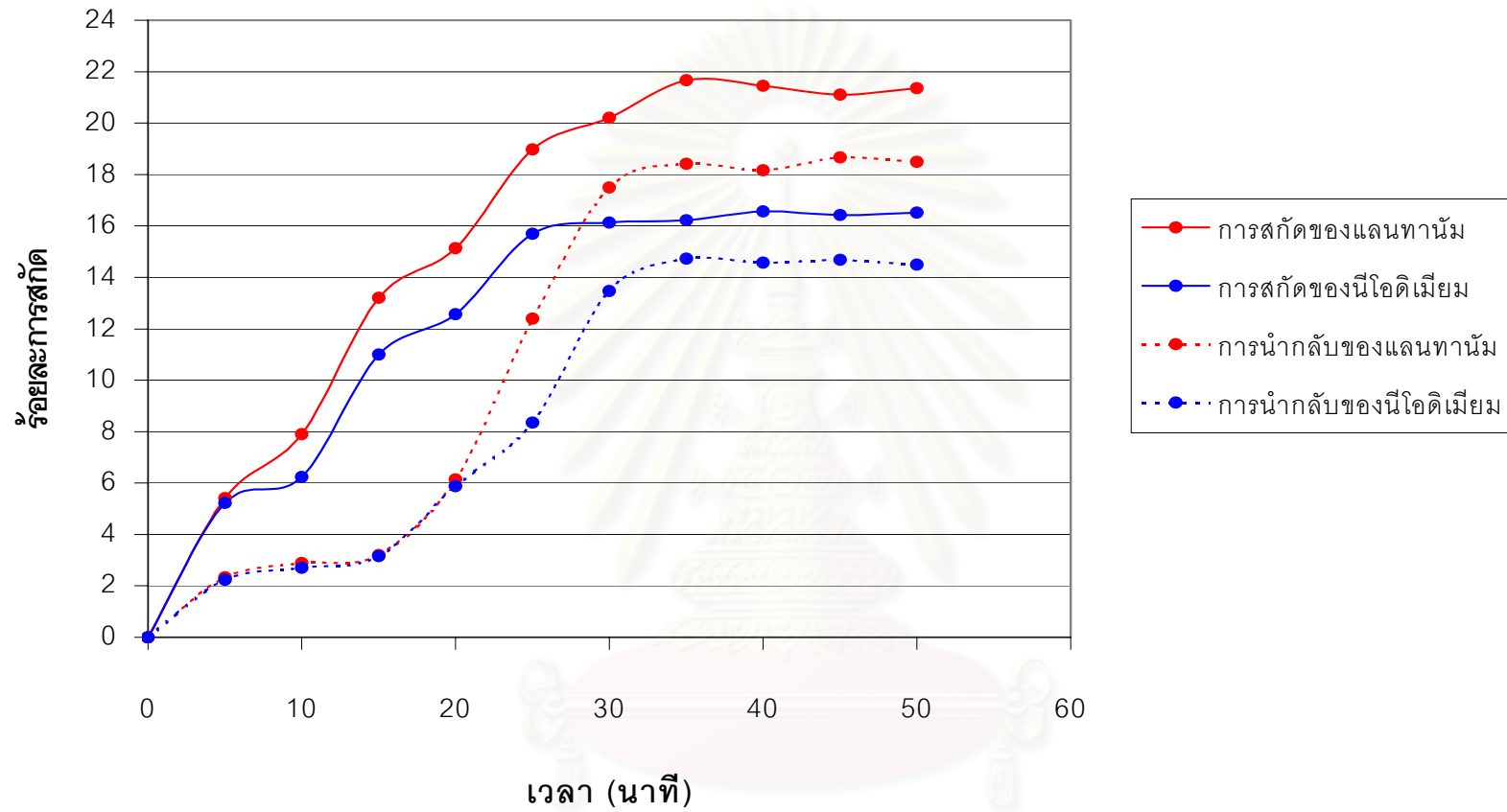
4.1 การทดลองเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

ในการทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการสกัดนั้น ให้ความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่า 10 ppm ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร จากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในแต่ละครั้งของการทดลองให้เป็น 2.5 ด้วยลิเทียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายนำกลับมีค่าเป็น 0.5 โมลต่อลิตร การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นการไหลแบบสวนทางกัน โดยให้สารละลายป้อนไหลในด้านที่ฝั่งท่อ สารละลายนำกลับไหลด้านฝั่งเปลือก ควบคุมอัตราการ

ไหลให้มีค่าเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาทีทั้งสายป้อนและสายนำกลับ แล้วเก็บตัวอย่างสารละลาย ป้อนและสารละลายนำกลับทุกๆ 5 นาที จนกว่าจะเสร็จสิ้นการทดลอง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 จากรูปเมื่อพิจารณาทางด้านการสกัดป้อนพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปจะสามารถสกัดแลนทานัมได้มากขึ้น โดยช่วงแรกความแตกต่างระหว่างแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนยังไม่มากนัก จนกระทั่งเมื่อเวลามากกว่า 25 นาที ความแตกต่างจึงค่อยๆเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ที่เวลา 35 นาที ส่วนทางด้านกรนำกลับนั้นจะมีค่าน้อยกว่าการสกัด ช่วงแรกความแตกต่างระหว่างแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนนั้นเกือบไม่ต่างกันเลย แต่จะเริ่มต่างกันเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาทีและจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาประมาณ 30 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสำหรับสภาวะการปฏิบัติการนั้นทั้งด้านการสกัดและการนำกลับจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 35 นาที ถ้าใช้อัตราการไหลทั้งด้านสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาทีจะต้องใช้ปริมาตรเป็น 3.5 ลิตร เพราะฉะนั้นในการทำการทดลองเพิ่มศึกษาการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยมีแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนเป็นสารละลายป้อนและมี HTTA และ TOA เป็นสารสกัดและมีกรดไนตริกเป็นสารละลายนำกลับนั้น ใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับปริมาตร 5 ลิตรต่อ 1 ชุดการทดลองก็เพียงพอต่อการศึกษา เนื่องจากปริมาตรดังกล่าวเป็นปริมาตรที่ระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว

4.2 การทดลองเพื่อหาช่วงของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่เหมาะสม

ในการทดลองเพื่อหาช่วงของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่ทำให้ได้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุดนั้น ในทุกการทดลองความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่า 10 ppm ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร จากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในแต่ละครั้งของการทดลองให้เป็น 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 ตามลำดับด้วยลิเทียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายนำกลับมีค่าเป็น 0.5 โมลต่อลิตร การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นการไหลแบบสวนทางกัน โดยให้สารละลายป้อนไหลในด้านที่ฝั่งท่อ สารละลายนำกลับไหลด้านฝั่งเปลือก ควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาทีทั้งสายป้อนและสายนำกลับ และทำการทดลองทั้งหมดซ้ำอีกสองครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดลองนั้นถูกต้อง



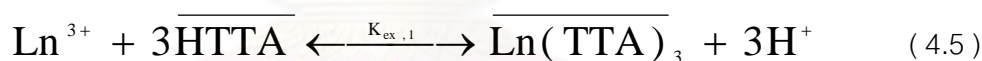
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับตามลำดับ

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น จะทำให้ได้ค่าร้อยละการสกัดเพิ่มขึ้นจนได้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.5 จากนั้นค่าร้อยละการสกัดจะเริ่มลดลงเล็กน้อย และมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันเมื่อทำการทดลองซ้ำที่สภาวะเดิม ผลการทดลองสามารถแบ่งการวิเคราะห์หรือออกเป็น 2 ช่วงคือ

1. ช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าจาก 1.0 ถึง 2.5

1.1 ปฏิริยาการสกัดด้วยสารสกัดหลัก HTTA

เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างจะทำให้การสกัดเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า การสกัดถูกกำหนดโดยค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant) จากสมการแสดงปฏิกิริยาไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนและสมการค่าคงที่สมดุล ดังนี้



$$K_{\text{ex},1} = \frac{[\text{H}^+]^3 [\text{Ln}(\text{TTA})_3]}{[\text{Ln}^{3+}] [\text{HTTA}]^3} \quad (4.6)$$

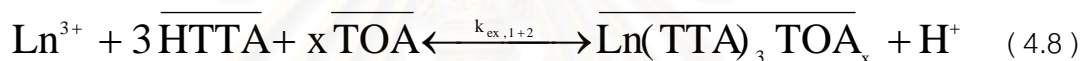
เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีเพิ่มจาก 1.0 ถึง 2.5 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนน้อยลง สมการที่ 4.5 จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น ส่งผลให้การสกัดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักของนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ เฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ (Henryi Louis Le Chatelier) และเมื่อพิจารณาอัตราการหายไปของไอออนโลหะ ดังสมการ

$$r_{\text{Ln},1} = -k_{f,1}[\text{Ln}^{3+}][\text{HTTA}]^3 + k_{r,1}[\text{Ln}(\text{TTA})_3][\text{H}^+]^3 \quad (4.7)$$

เนื่องจาก $[H^+]^3$ อยู่ในเทอมที่เป็นลบและยกกำลังถึงสาม เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าลดลงอย่างมาก จึงได้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดต่ำ

1.2 ปฏิกิริยาการช่วยสกัดของ TOA

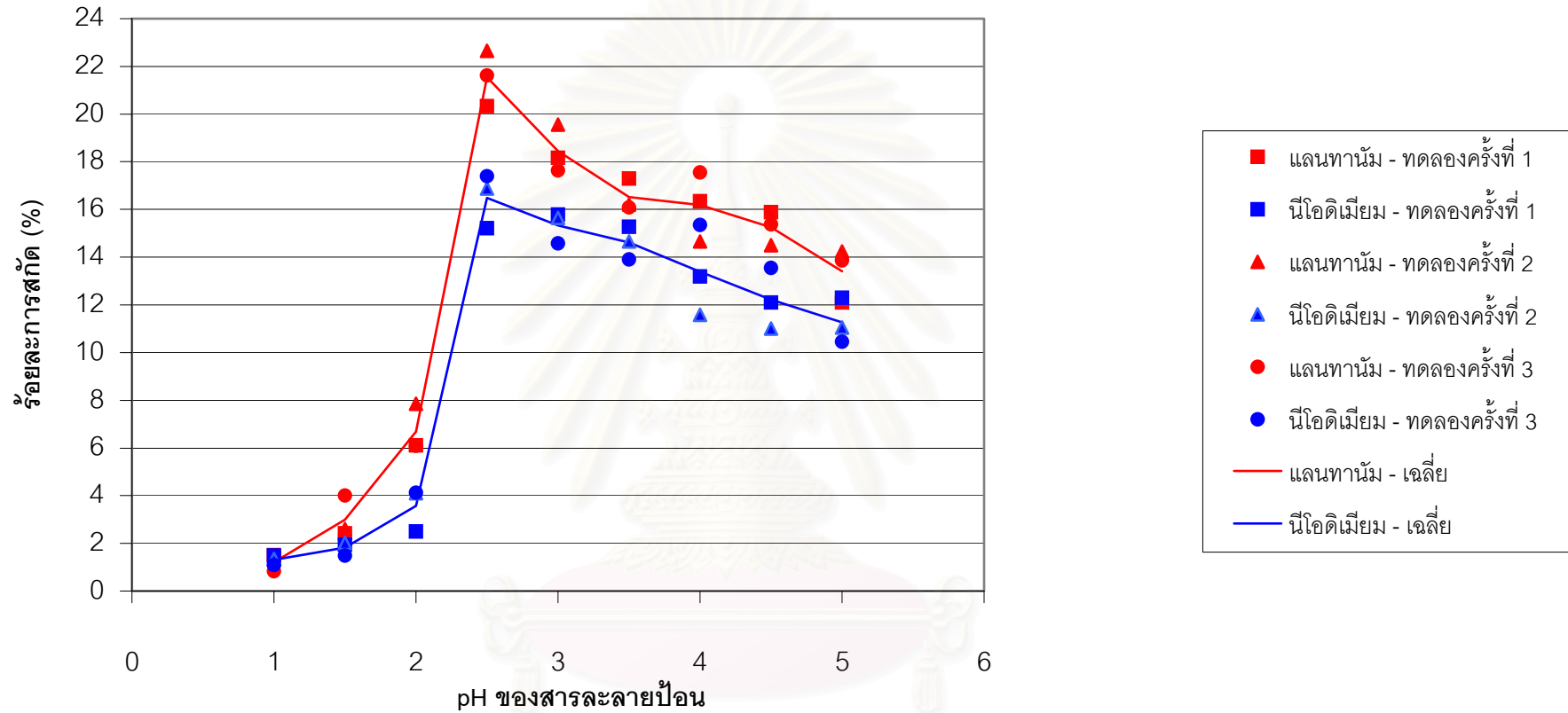
จากผลการทดลอง เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างจะทำให้การสกัดเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า การสกัดถูกกำหนดโดยค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant) จากสมการแสดงปฏิกิริยาไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนและสมการค่าคงที่สมดุล ดังนี้



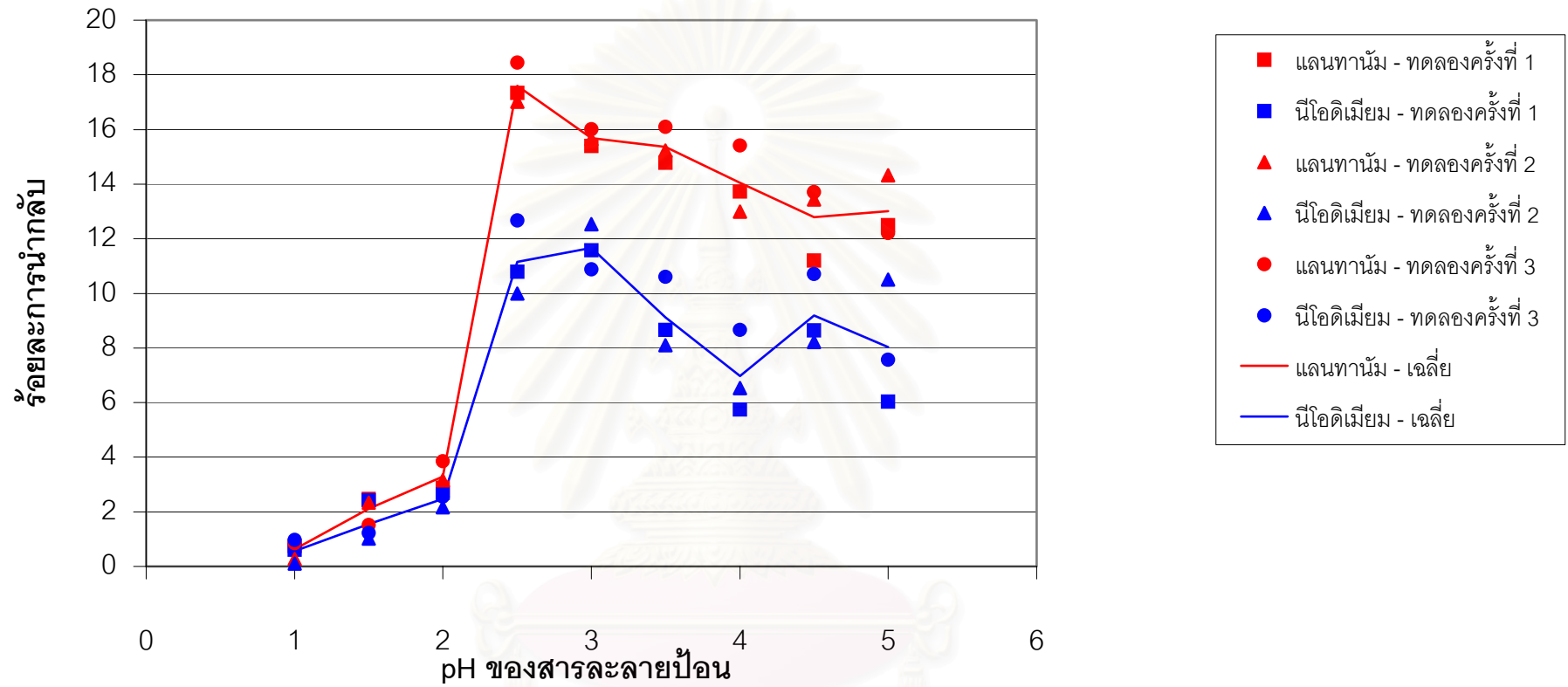
$$k_{ex,1+2} = \frac{[H^+][Ln(TTA)_3 TOA_x]}{[Ln^{3+}][TOA]^x [HTTA]^3} \quad (4.9)$$

เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีเพิ่มจาก 1.0 ถึง 2.5 หรือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนน้อยลง สมการที่ 4.8 จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้มากขึ้น ส่งผลให้การสกัดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับสมการที่ 4.5 และเมื่อปฏิกิริยาเกิดได้มากขึ้น สารประกอบเชิงซ้อน $Ln(TTA)_3(TOA)_x$ ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวจึงมีมากขึ้นนั่นหมายความว่าสามารถสกัดสารได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาอัตราการหายไปของไอออนโลหะดังสมการ

$$r_{Ln} = -k_{f,1+2}[Ln^{3+}][HTTA]^3[TOA]^x + k_{r,1+2}[Ln(TTA)_3 TOA][H^+]^3 \quad (4.10)$$



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10 \text{ ppm}$, $[HTTA] = 0.01 \text{ mol/l}$, $[TOA] = 1 \text{ \%v/v}$, $[HNO_3]_{\text{strip}} = 0.5 \text{ M}$, $\text{Volume}_{\text{feed}} = \text{Volume}_{\text{strip}} = 5 \text{ liter}$, $\text{Flowrate}_{\text{feed}} = \text{Flowrate}_{\text{Strip}} = 100 \text{ ml / min}$



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับของ

แลนทานัมและนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10 \text{ ppm}$, $[HTTA] = 0.01 \text{ mol/l}$,

$[TOA] = 1 \text{ \%v/v}$, $[HNO_3]_{\text{strip}} = 0.5 \text{ M}$, $\text{Volume}_{\text{feed}} = \text{Volume}_{\text{strip}} = 5 \text{ liter}$, $\text{Flowrate}_{\text{feed}} =$

$\text{Flowrate}_{\text{Strip}} = 100 \text{ ml / min}$

เนื่องจาก $[H^+]^3$ อยู่ในเทอมที่เป็นลบ เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าลดลง จึงได้ค่าร้อยละการสกัดต่ำ

2. ช่วงค่าความเป็นกรด-ต่างจาก 2.5 ถึง 5.0

2.1 ปฏิบัติการสกัดด้วยสารสกัด HTTA

ในกรณีที่ค่าความเป็นกรด-ต่างมีค่าสูงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนต่ำแต่จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดลดลงเนื่องจากสารสกัด HTTA เป็นสารสกัดประเภทที่เป็นกรด ซึ่งตามคุณสมบัติเฉพาะของมันจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับไอออนโลหะในช่วงที่สารละลายมีความเป็นกรดสูง จึงทำให้ได้ค่าการสกัดที่ดีที่สุดที่ค่าความเป็นกรด-ต่างประมาณ 2.5 ใกล้เคียงกับ T.M. Sami and A. A. Abd el Tawab [33] ที่ใช้ HTTA และ TOA ผสมกันในการสกัดธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์หลายชนิด

2.2 ปฏิบัติการช่วยสกัดของ TOA

จากข้อ 2.1 เมื่อ HTTA สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่ค่าความเป็นกรด-ต่างสูงๆได้น้อย HTTA.TOA ซึ่งเกิดจาก HTTA ทำปฏิกิริยากับ TOA จึงทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะดังสมการที่ 4.8 ได้น้อยด้วยเช่นกัน และถึงแม้ว่าสารสกัด TOA ควรจะทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะได้ดีเมื่อค่าความเป็นกรด-ต่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นสารสกัดชนิดเป็นเบส แต่ TOA ไม่สามารถไปทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะโดยตรงได้เนื่องจาก TOA สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนลบเท่านั้น แต่ในสารละลายป้อนมีแต่ไอออนบวก คือ La^{3+} และ Nd^{3+} ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด-ต่างจึงไม่มีผลต่อการสกัดของ TOA แต่อย่างใด จากรูปจะเห็นได้ว่าแลนทานัมไอออนสามารถถูกสกัดได้มากกว่านีโอไดเมียมไอออนเนื่องจากค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบ

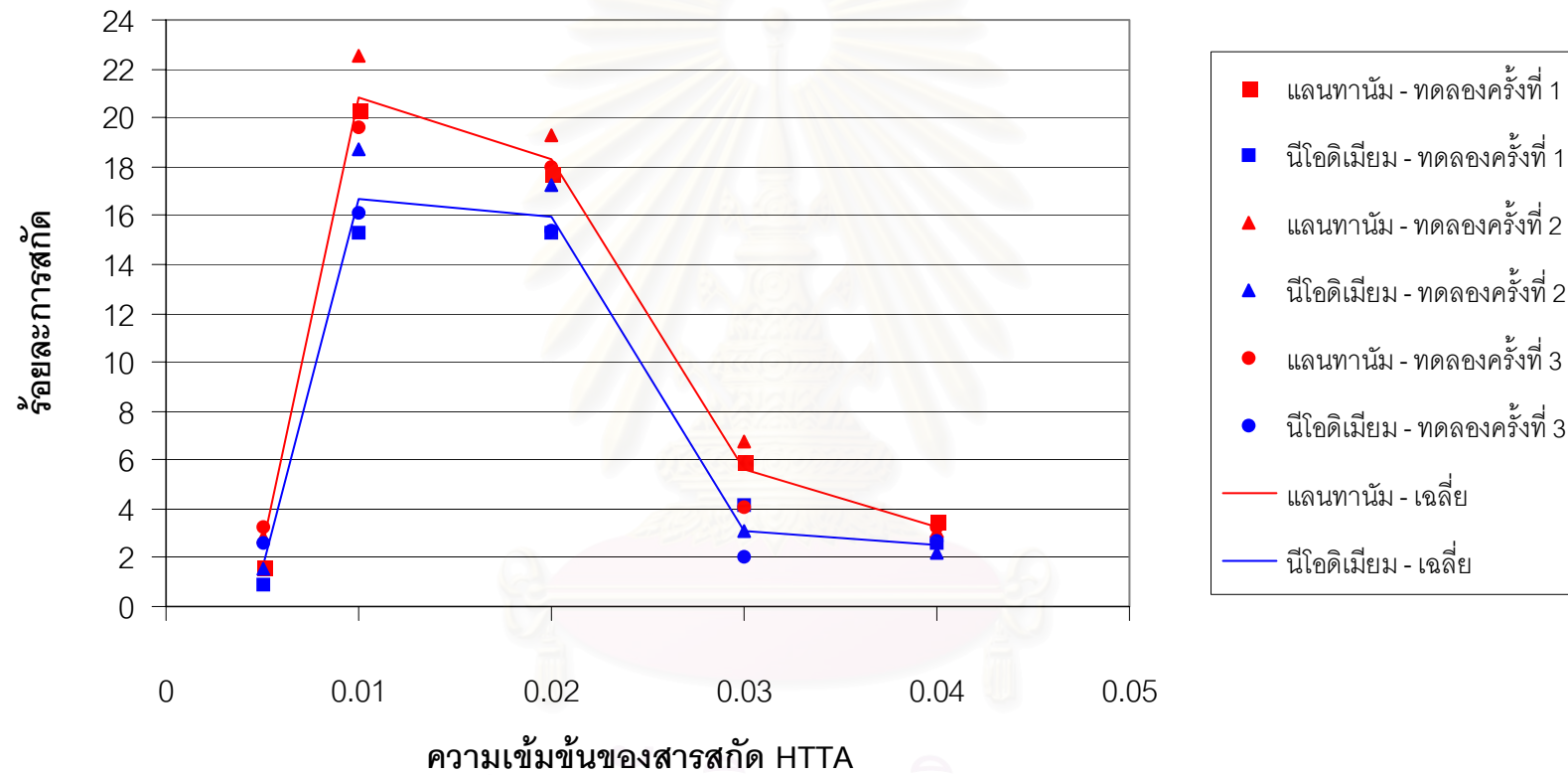
เชิงซ้อน (β) ในสมการ 2.24 หรือ $\frac{K_{ex,1+2}}{K_{ex,1}}$ ของแลนทานัมมีค่ามากกว่าของนีโอไดเมียม สาเหตุ

เพราะค่า β นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อรัศมีไอออนิกลดลง [10,25] และธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์นั้นรัศมีไอออนิกจะมีค่าลดลงเมื่อเลขอะตอมเพิ่มมากขึ้น แลนทานัมมีเลขอะตอมมากกว่านีโอดีเมียม จึงมีรัศมีไอออนิกมากกว่าและมีค่า β มากกว่าจึงสามารถสกัดแลนทานัมได้ดีกว่านีโอดีเมียม

สำหรับผลการทดลองในด้านของการนำกลับนั้นแสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการสกัดและการนำกลับนั้นไปในแนวเดียวกันเพราะปฏิกิริยาการนำกลับคือปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาการสกัด ไม่ว่าจะปฏิกิริยาการสกัดโดยตรงจากสารสกัด HTTA หรือปฏิกิริยาช่วยสกัดจากสารสกัด TOA ก็ตาม ต่างกันตรงที่ปฏิกิริยาการสกัดนั้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อนแต่ปฏิกิริยานำกลับนั้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับและเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ ฉะนั้นเมื่อมีการสกัดเพิ่มขึ้นการนำกลับจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ใน สารละลายเยื่อแผ่นเหลว

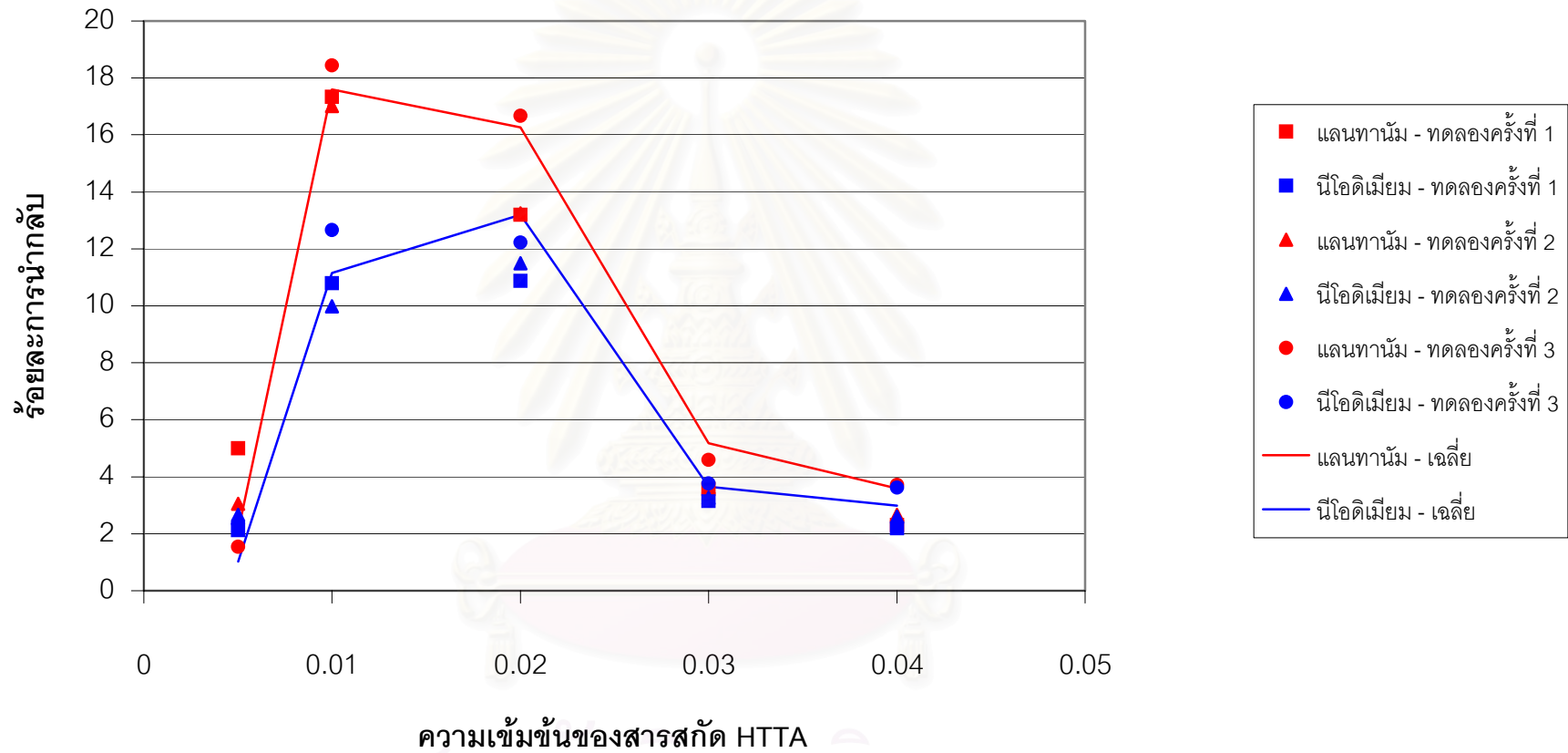
ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ที่มีต่อความสามารถในการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนออกจากกัน ทำได้โดยการทดลองให้ความเข้มข้นของ HTTA ในตัวทำละลายเบนซีนมีค่าต่างกัน ได้แก่ 0.005, 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 โมลต่อลิตร ในขณะที่ความเข้มข้นของ TOA คงที่คือ 1 % โดยปริมาตร ทุกการทดลองความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่า 10 ppm ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.5 และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในละลายป้อนให้เป็น 2.5 ด้วยลิเทียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างที่สามารถให้ร้อยละการสกัดสูงที่สุด โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายนำกลับมีค่าเป็น 0.5 โมลต่อลิตร โดยให้สารละลายป้อนไหลในด้านที่ฝั่งท่อสารละลายนำกลับไหลด้านฝั่งเปลือกควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาที และปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว จากผลการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัด

ของแลนทานัมและนีโอดิเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10 \text{ ppm}$, $[HTTA] = 0.01 \text{ mol/l}$

$[TOA] = 1 \text{ \%v/v}$, $[HNO_3]_{strip} = 0.5 \text{ M}$, $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5 \text{ liters}$



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอดิเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10 \text{ ppm}$, $[HTTA] = 0.01 \text{ mol/l}$, $[TOA] = 1 \text{ \%v/v}$, $[HNO_3]_{\text{strip}} = 0.5 \text{ M}$, $\text{Volume}_{\text{feed}} = \text{Volume}_{\text{strip}} = 5 \text{ liters}$

1 ช่วงความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ตั้งแต่ 0 ถึง 0.01 โมลต่อลิตร

1.1 ปฏิริยาการสกัดด้วยสารสกัดหลัก HTTA

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด HTTA จะสามารถสกัดไอออนโลหะได้มากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการของปฏิริยาการสกัด



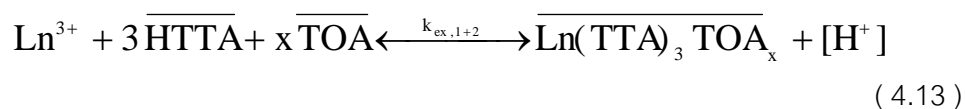
ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงอัตราการหายไปของไอออนโลหะได้ดังนี้

$$r_{\text{Ln}} = -k_{f,1}[\text{Ln}^{3+}][\text{HTTA}]^3 + k_{r,2}[\overline{\text{Ln}(\text{TTA})}_3][\text{H}^+]^3 \quad (4.12)$$

จากสมการ (4.12) จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของ HTTA อยู่ในเทอมที่เป็นลบ ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของ HTTA มากขึ้นอัตราการหายไปของโลหะจึงเพิ่มมากขึ้น

1.2 ปฏิริยาการช่วยสกัดด้วยสารสกัด TOA

สำหรับปฏิริยาของสารสกัด TOA นั้นเมื่อพิจารณาสมการของปฏิริยาและอัตราการหายไปของไอออนโลหะดังสมการ



$$r_{Ln} = -k_{f,1+2}[Ln^{3+}][HTTA]^3[TOA]^x + k_{r,1+2}[Ln(TTA)_3 TOA][H^+]^3 \quad (4.14)$$

เมื่อความเข้มข้นของ HTTA เพิ่มมากขึ้น HTTA จะทำปฏิกิริยากับ TOA ได้มากขึ้น และทำให้สามารถสกัดไอออนโลหะได้มากขึ้นเช่นกัน แต่จากการที่ค่า β ของแลนทานัมนี้มีค่ามากกว่าของนีโอดีเมียม [10,25] จึงทำให้สามารถสกัดแลนทานัมไอออนได้มากกว่านีโอดีเมียมไอออน

2. ช่วงความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.04 โมลต่อลิตร

เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 0.01 โมลต่อลิตร นั้นเปอร์เซ็นต์การสกัดจะเริ่มลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด (รวมกับ TOA 1%) นั้นทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืด (viscosity) เพิ่มขึ้น เพราะค่าความหนืดของสารสกัดชนิดที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมักจะมีค่าสูงกว่าตัวทำละลาย จึงมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายมีค่าลดลง [4,5,7] และเมื่อยังคงเพิ่มความเข้มข้นของ HTTA ต่อไป ในขณะที่ความเข้มข้นของ TOA นั้นคงที่ ทำให้ปริมาณของ HTTA มีมากเกินไปที่จะทำปฏิกิริยากับ TOA และเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ดังในสมการที่ 2.13 มี HTTA เพียงบางส่วนเท่านั้นที่ทำปฏิกิริยากับ TOA แต่ HTTA ที่เหลือจะเกิดปฏิกิริยาการสกัดโดยตรงกับไอออนโลหะในสารละลายป้อนดังในสมการ 4.11 เป็นเช่นนี้ทำให้ความแตกต่างของความสามารถในการสกัดระหว่างแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนลดลงเชิงซ้อนของแลนทานัมไอออนในสารละลายมีค่าลดลงค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดจึงลดลง

สำหรับผลการทดลองในด้านของการนำกลับนั้นแสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการสกัดและการนำกลับนั้นไปในแนวเดียวกันเพราะปฏิกิริยาการนำกลับคือปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาการสกัด ไม่ว่าจะเป็นปฏิกิริยาการสกัดโดยตรงจากสารสกัด HTTA หรือปฏิกิริยาช่วยสกัดจากสารสกัด TOA ก็ตาม ต่างกันตรงที่ปฏิกิริยาการสกัดนั้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อนแต่ปฏิกิริยานำกลับนั้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับและเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับและการถ่ายเทมวลเป็นแบบสภาวะคงที่ ฉะนั้นเมื่อมีการสกัดเพิ่มขึ้นการนำกลับจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ที่มีต่อความสามารถในการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนออกจากกัน ทำได้โดยการทดลองให้ความเข้มข้นของ TOA ในตัวทำละลายเบนซีนมีค่าต่างกัน ได้แก่ 0% 1% 2% 3% 4% 5% และ 6% โดยปริมาตร ในขณะที่ความเข้มข้นของ HTTA คงที่คือ 0.01 โมลต่อลิตร ทุกการทดลองความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่า 10 ppm ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตรและปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในละลายป้อนให้เป็น 2.5 ด้วยลิเทียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายนำกลับมีค่าเป็น 0.5 โมลต่อลิตร โดยให้สารละลายป้อนไหลในด้านที่ฝั่งท่อ สารละลายนำกลับไหลด้านฝั่งเปลือกควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาทีทั้งสายป้อนและสายนำกลับและปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 สำหรับด้านการสกัดและรูป 4.7 สำหรับการนำกลับ จากผลการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงความเข้มข้นของสารสกัด TOA มีค่า 0% โดยปริมาตร

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 0% หรือไม่ได้ผสมสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวนั้นจะมีแต่สารสกัด HTTA จึงเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับไอออนโลหะโดยตรงดังสมการที่ 4.11 จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีสารสกัด TOA นั้นเปอร์เซ็นต์การสกัดจะน้อยมากคือประมาณ 2% และไม่เห็นความแตกต่างของการสกัดแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออน

2. ช่วงความเข้มข้นของสารสกัด TOA มีค่ามากกว่า 0% และน้อยกว่า 1% โดยปริมาตร

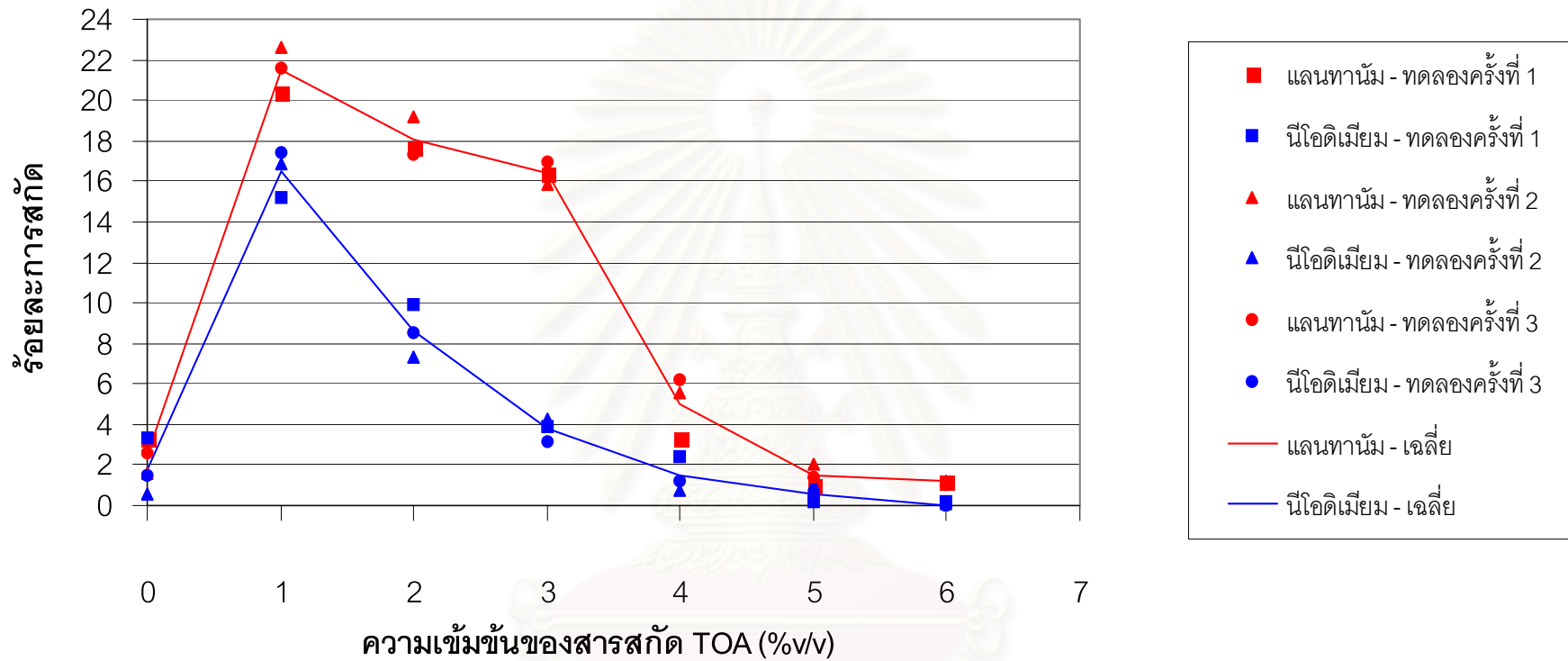
เมื่อเติมสารสกัด TOA เข้าผสมกับสารสกัด HTTA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ความสามารถในการสกัดจะสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากสารสกัด TOA จะทำปฏิกิริยากับ HTTA เกิด

เป็น TOA.HTTA ซึ่ง TOA.HTTA นี้สามารถทำปฏิกิริยาการสกัดกับไอออนโลหะได้ ดังสมการ 4.13 และสารสกัด HTTA ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับไอออนโลหะได้โดยตรงดังอีกตั้งในสมการ 4.11 ทำให้ความสามารถในการสกัดสูงขึ้นอย่างมาก การสกัดในลักษณะนี้เรียกว่า *การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (synergistic extraction)* และสารสกัด TOA นั้นนอกจากจะทำให้ความสามารถในการสกัดเพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างการสกัดไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมอีกด้วย โดย HTTA.TOA ในปฏิกิริยาการสกัดในสมการที่ 4.3 นั้นจะสามารถทำปฏิกิริยาการสกัดไอออนของแลนทานัมได้มากกว่าไอออนของนีโอติเมียมเนื่องจากค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (β) ในสมการ 2.24 หรือ $\frac{K_{ex,1+2}}{K_{ex,1}}$ ของแลนทานัมมีค่ามากกว่าของนีโอติเมียมเพราะค่าของ β นั้นจะลดลงเมื่อรัศมีไอออนลดลง [10, 25] และธาตุในอนุกรมแลนทานาในดันดับรัศมีไอออนิกจะมีค่าลดลงเมื่อเลขอะตอมเพิ่มมากขึ้น แลนทานัมมีเลขอะตอมมากกว่านีโอติเมียมจึงมีรัศมีไอออนิกมากกว่าและมีค่า β มากกว่าจึงสามารถสกัดแลนทานัมไอออนได้ดีกว่านีโอติเมียมไอออน

3. ช่วงความเข้มข้นของ TOA มีค่ามากกว่า 1% โดยปริมาตร

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TOA จนกระทั่งมากกว่า 1% โดยปริมาตร ความแตกต่างระหว่างความสามารถในการสกัดไอออนทั้งสองชนิดจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีปริมาณของ TOA มาทำปฏิกิริยากับ HTTA เป็น TOA.HTTA ในสมการที่ 4.3 มากขึ้น และเนื่องจากแลนทานัมมีค่า β สูงกว่านีโอติเมียม TOA.HTTA จึงทำปฏิกิริยาการสกัดกับแลนทานัมไอออนได้มากกว่านีโอติเมียมไอออนและที่ความเข้มข้นของ TOA เท่ากับ 3% โดยปริมาตร จะสามารถสกัดไอออนของแลนทานัมได้ประมาณ 16.4% ในขณะที่นีโอติเมียมไอออนถูกสกัดเพียงประมาณ 3.7% แต่ร้อยละการสกัดโดยรวมจะลดลงเนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TOA ทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหนียวมีความหนืด (viscosity) เพิ่มขึ้น เพราะค่าความหนืดของสารสกัดชนิดที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมักจะมีค่าสูงกว่าตัวทำละลาย จึงมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ของสารประกอบเชิงซ้อนของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายมีค่าลดลงค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดจึงลดลง [4,5,7]

สำหรับผลการทดลองในด้านของการนำกลับนั้นแสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการสกัดและการนำกลับนั้นไปในแนวเดียวกันเพราะปฏิกิริยาการนำกลับคือปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาการสกัด ไม่ว่าจะเป็นปฏิกิริยาการสกัดโดยตรงจากสารสกัด HTTA หรือปฏิกิริยาช่วยสกัดจากสารสกัด TOA ก็ตาม ต่างกันตรงที่ปฏิกิริยาการสกัดนั้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่น

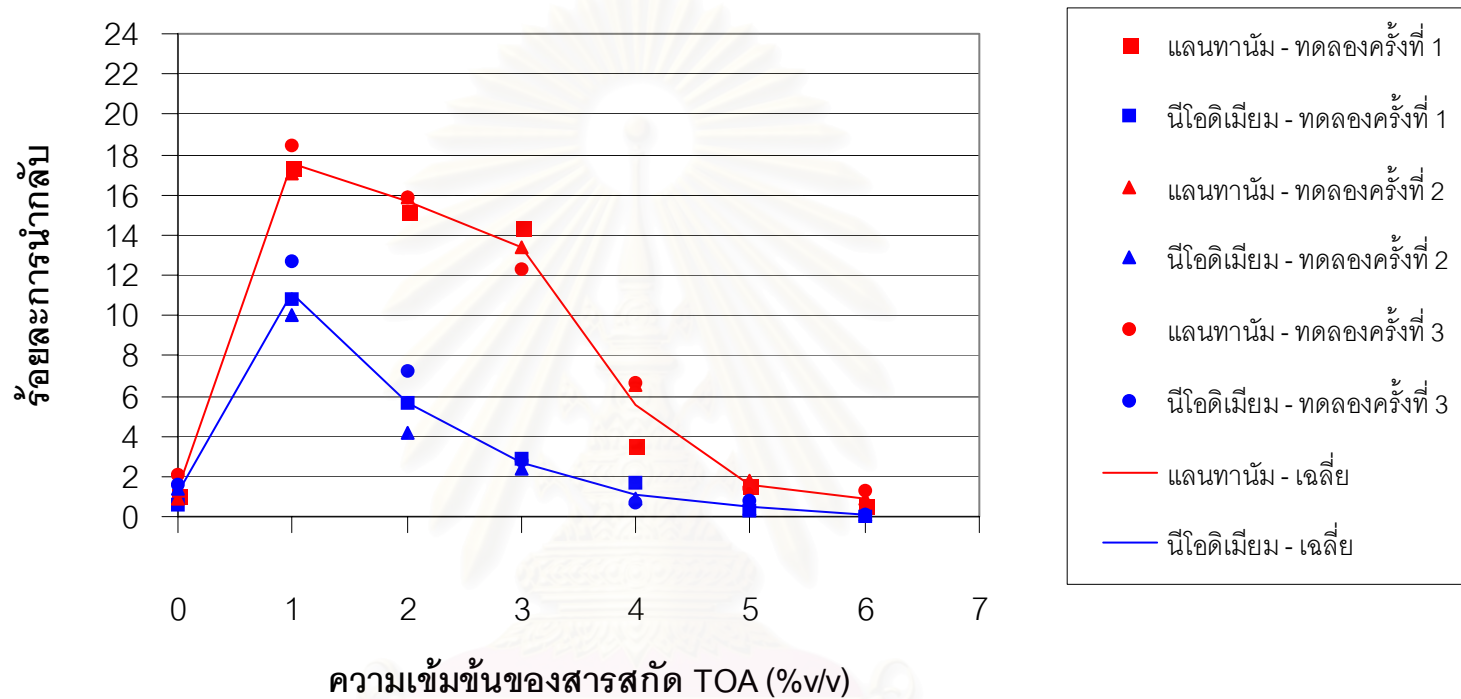


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและ

นีโอดิเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10 \text{ ppm}$, $[HTTA] = 0.01 \text{ mol/l}$, $[TOA] =$

1 %v/v , $[HNO_3]_{\text{strip}} = 0.5 \text{ M}$, $Volume_{\text{feed}} = Volume_{\text{strip}} = 5 \text{ liters}$, $Flowrate_{\text{feed}} =$

$Flowrate_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการนำกลับของแลนทานัม

และนีโอดิเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10 \text{ ppm}$, $[HTTA] = 0.01 \text{ mol/l}$, $[TOA] =$

1 %v/v , $[HNO_3]_{\text{strip}} = 0.5 \text{ M}$, $\text{Volume}_{\text{feed}} = \text{Volume}_{\text{strip}} = 5 \text{ liters}$, $\text{Flowrate}_{\text{feed}} =$

$\text{Flowrate}_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$

เหลวกับสารละลายบ๊องแต่ปฏิกิริยาน้ำกลับนั้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายน้ำกลับและเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับและการถ่ายเทมวลเป็นแบบลภาวะคงที่ ฉะนั้นเมื่อมีการสกัดเพิ่มขึ้นการนำกลับจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.5 ศึกษาผลของจำนวนโมดูลเส้นใยทอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของจำนวนโมดูลเส้นใยทองต่อความสามารถในการสกัด แยกแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนออกจากกัน ทำได้โดยเลือกสภาวะที่สามารถแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนออกจากกันได้ดีที่สุดมาทำการทดลอง นั่นคือที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายบ๊องเท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายบ๊องเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของสารสกัด HTTA และ TOA ในเยื่อแผ่นเหลวเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร และ 3% โดยปริมาตรตามลำดับ โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายบ๊องมีค่าต่าง ๆ กันคือ 10 30 50 70 และ 90 ppm และความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายน้ำกลับมีค่าเป็น 0.5 โมลต่อลิตร โดยให้สารละลายบ๊องไหลในด้านที่ฝั่งท่อ สารละลายน้ำกลับไหลด้านฝั่งเปลือกควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาทีทั้งสายบ๊องและสายน้ำกลับ

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มโมดูลเส้นใยทองจะสามารถสกัดแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนได้เพิ่มขึ้นอีกในอัตราส่วนเท่าๆกันกับที่สกัดจากโมดูลแรก ทำให้ความแตกต่างระหว่างแลนทานัมไอออนและนีโอติเมียมไอออนในด้านสารละลายบ๊องขาออกและสารละลายน้ำกลับยิ่งมากขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะในการถ่ายเทไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลวนั้นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลคือไฮโดรเนียมไอออนดังสมการที่ 4.1 และ 4.3 เมื่อสารละลายบ๊องจากเดิมที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.5 ผ่านการสกัดจากโมดูลที่หนึ่งแล้ว จะมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงเนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนโลหะกับไฮโดรเนียมไอออน เมื่อมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายบ๊องขาออกจากโมดูลที่หนึ่งให้เพิ่มขึ้นเป็น 2.5 เท่าเดิม ทำให้แรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นดังเช่นก่อนที่จะเข้าสู่โมดูลที่หนึ่ง จึงสามารถสกัดแลนทานัมไอออนและนีโอติเมียมไอออนได้เพิ่มขึ้นอีกในโมดูลที่สอง แต่เนื่องจากเดิมนั้นสามารถสกัดแลนทานัมไอออนได้มากกว่านีโอติเมียมไอออน เมื่อผ่านโมดูลที่สองความแตกต่างของการสกัดและการนำกลับระหว่างไอออนทั้งสองจึงยิ่งเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการปฏิบัติการนั้นเป็นแบบต่อเนื่อง ทำให้การปรับค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ค่าของการสกัด

และการนำกลับที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านโมดูลที่สองจึงไม่มากเท่าที่ควร รูปที่ 4.8 - 4.17 เป็นผลการทดลองที่แสดงถึงร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับเมื่อใช้โมดูลเส้นใยกลวง 1 โมดูล และ 2 โมดูล ที่ความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมมีค่า 10 - 90 ppm

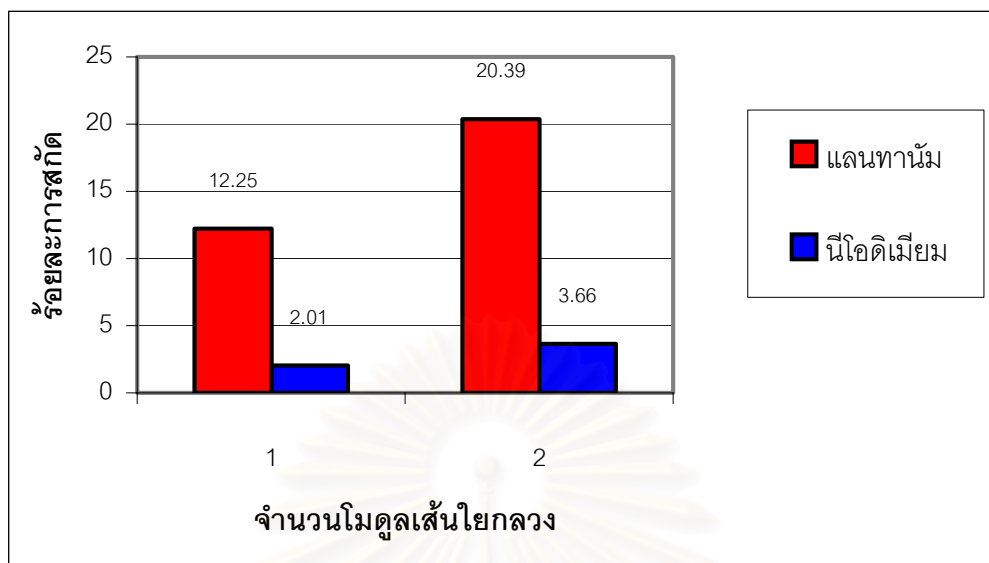
4.6 ผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนใน สารละลายป้อน

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนใน สารละลายป้อนต่อความสามารถในการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกัน ทำได้ โดยการทดลองให้ความเข้มข้นของสารสกัด HTTA และ TOA ในตัวทำละลายเบนซีนมีค่า 0.01 โมลต่อลิตร และ 3% โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถสกัดแยกแลนทานัมและ นีโอติเมียมออกจากกันได้ดีที่สุด (จากข้อ 4.3 และ 4.4) ในขณะที่ ทุกการทดลองความเข้มข้น ของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนมีค่า 10 ppm และปรับค่าความเป็นกรด- ด่างในละลายป้อนให้เป็น 2.5 (ซึ่งเป็นค่าที่ให้ร้อยละการสกัดสูงที่สุด) ด้วยลิเทียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตรและความเข้มข้นของกรด ไนตริกในสารละลายนำกลับมีค่าเป็น 0.5 โมลต่อลิตร โดยให้สารละลายป้อนไหลในทิศทางที่ฝั่งท่อ สารละลายนำกลับไหลด้านฝั่งเปลือกควบคุมอัตราการไหลให้มีค่าเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาทีทั้ง สายป้อนและสายนำกลับ และใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่าค่าความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในช่วงที่ทำการทดลอง ค่อนข้างจะไม่มีผลต่อร้อยละการสกัด แต่จะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวล ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการ

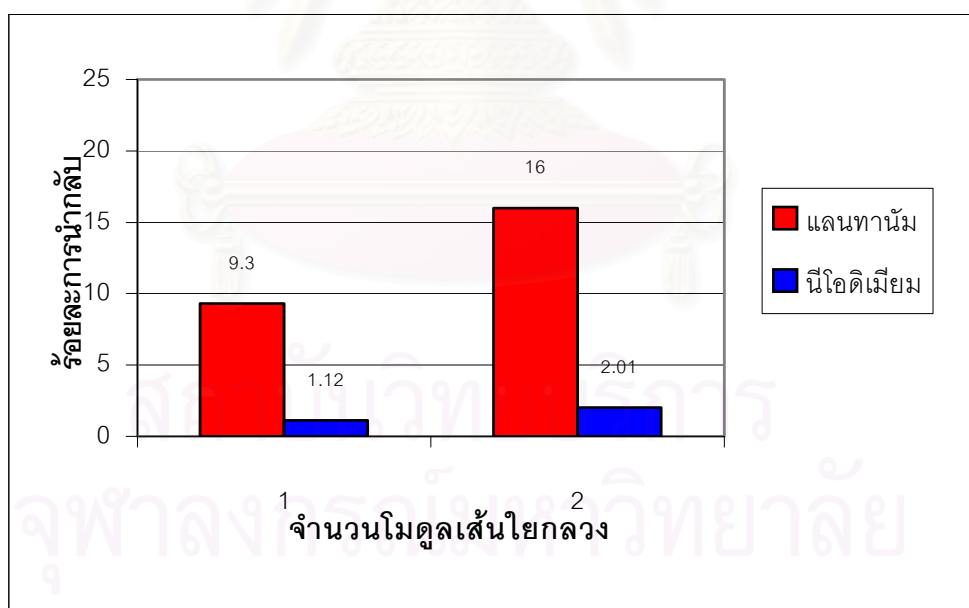
$$\Gamma_{Ln,HTTA} = -k_1 [Ln^{3+}] [HTTA]^3 + k_1 [Ln(TTA)_3] [H^+]^3 \quad (4.15)$$

$$\Gamma_{HTTA,TOA} = -k_2 [Ln^{3+}] [HTTA]^3 [TOA]^x + k_2 [Ln(TTA)_3 TOA] [H^+]^3 \quad (4.16)$$

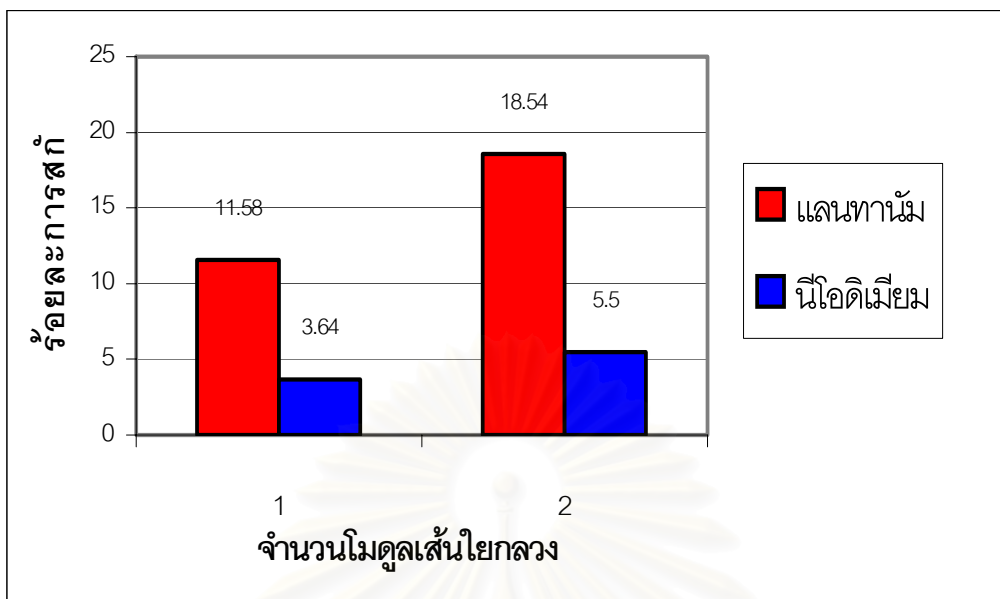
สมการที่ 4.15 และ 4.16 เป็นสมการอัตราการหายไปของไอออนโลหะเนื่องจากการสกัด ด้วย HTTA และจากการช่วยสกัดด้วยสารสกัด TOA ตามลำดับ เนื่องจากในทั้งสองสมการนั้น $[Ln^{3+}]$ อยู่ในเทอมที่เป็นลบเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออน ทำให้อัตราการหายไปของแลนทานัมและนีโอติเมียมยิ่งสูงขึ้นการถ่ายเทมวลจึงเพิ่มขึ้น



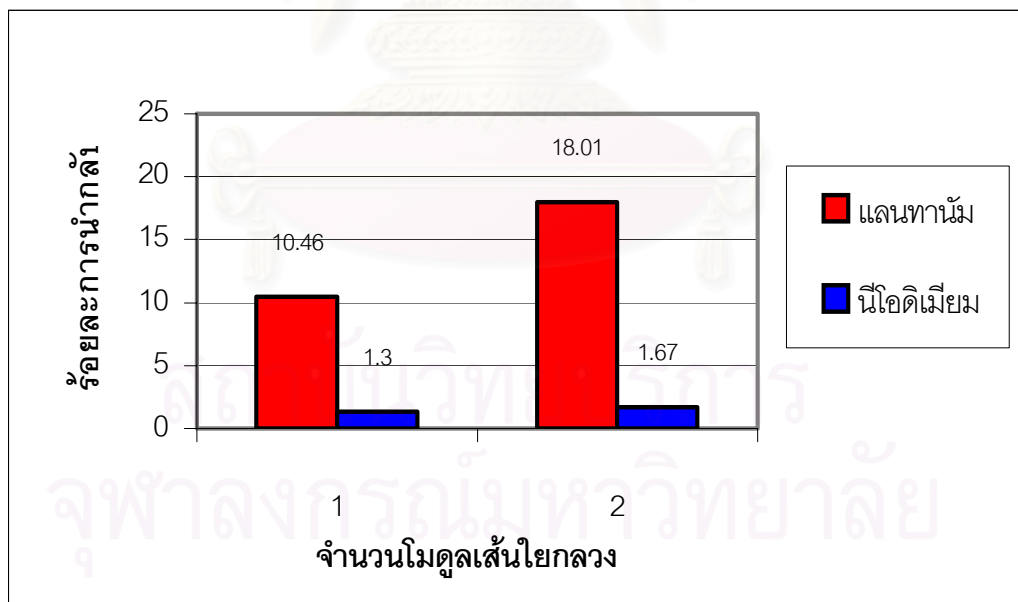
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัม และนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10 \text{ ppm}$, $[HTTA] = 0.01 \text{ mol / l}$, $[TOA] = 3\%v/v$, $[HNO_3]_{strip} = 0.5 \text{ M}$, $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5 \text{ liters}$, $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100 \text{ ml / min}$,



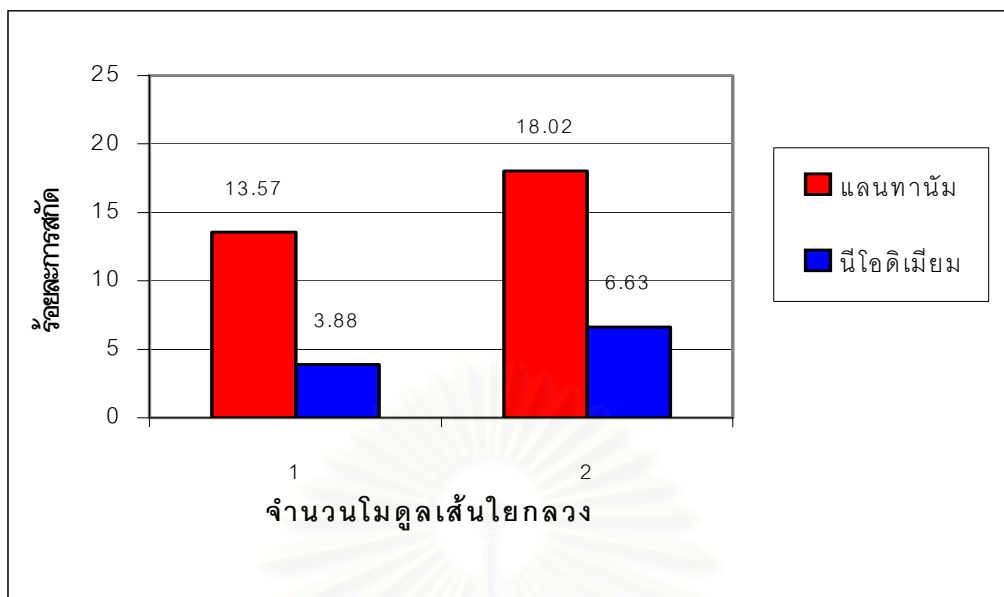
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการนำกลับของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10 \text{ ppm}$, $[HTTA] = 0.01 \text{ mol / l}$, $[TOA] = 3\%v/v$, $[HNO_3]_{strip} = 0.5 \text{ M}$, $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5 \text{ liters}$, $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100 \text{ ml / min}$,



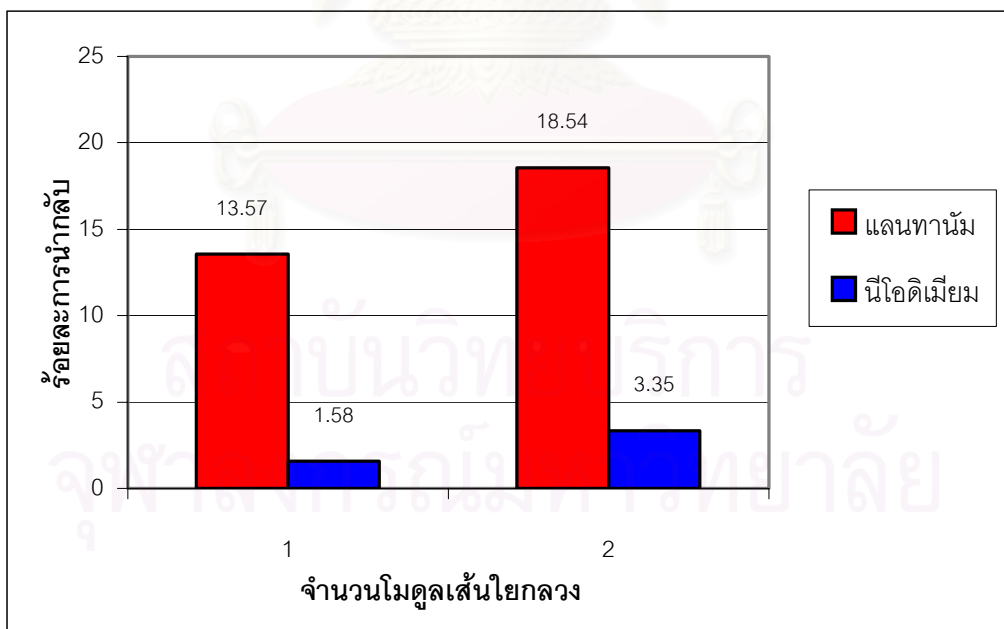
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัม และนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 30$ ppm, $[HTTA] = 0.01$ mol / l, $[TOA] = 3\%v/v$, $[HNO_3]_{strip} = 0.5$ M, $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5$ liters, $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100$ ml / min



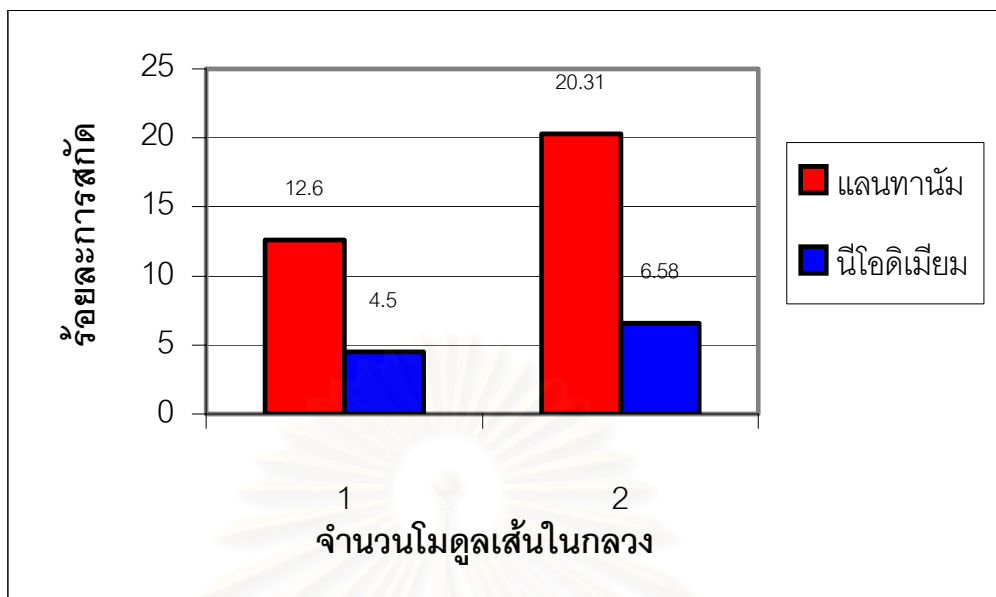
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัม และนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 30$ ppm, $[HTTA] = 0.01$ mol / l, $[TOA] = 3\%v/v$, $[HNO_3]_{strip} = 0.5$ M, $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5$ liters, $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100$ ml / min



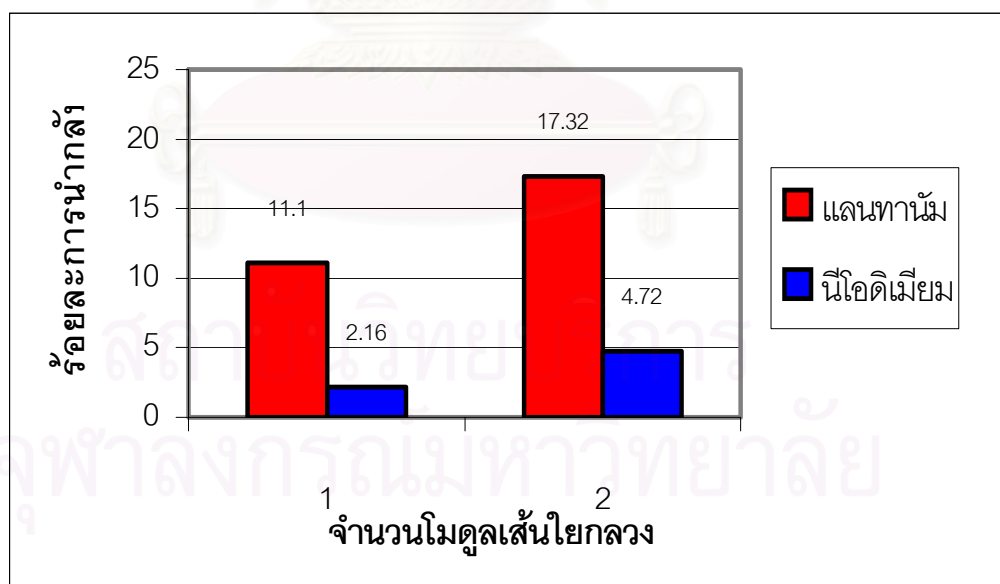
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัด ของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 50$ ppm , $[HTTA] = 0.01$ mol / l , $[TOA] = 3\%$ v/v , $[HNO_3]_{strip} = 0.5$ M , $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5$ liters, $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100$ ml / min



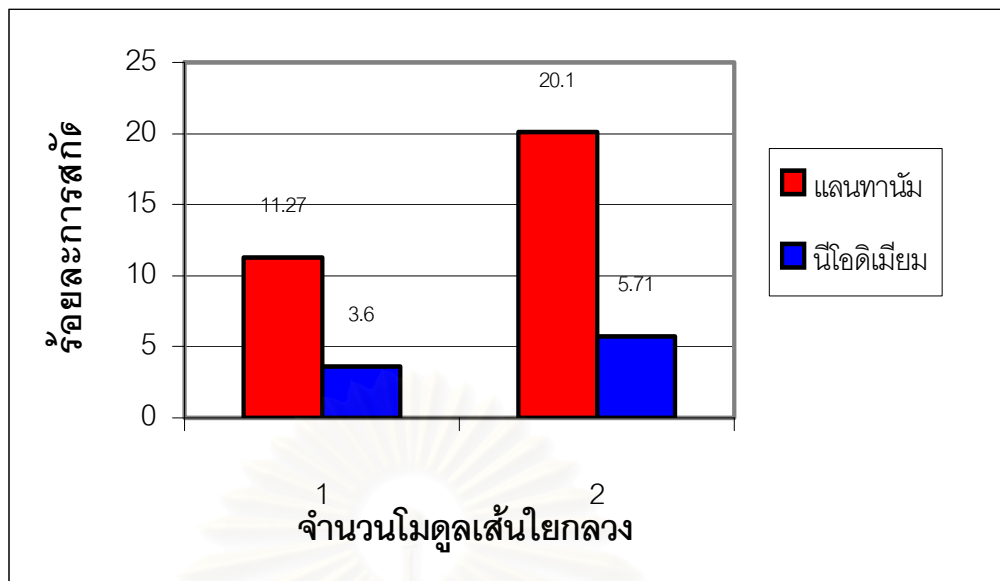
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการนำกลับ ของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 50$ ppm , $[HTTA] = 0.01$ mol / l , $[TOA] = 3\%$ v/v , $[HNO_3]_{strip} = 0.5$ M , $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5$ liters, $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100$ ml / min



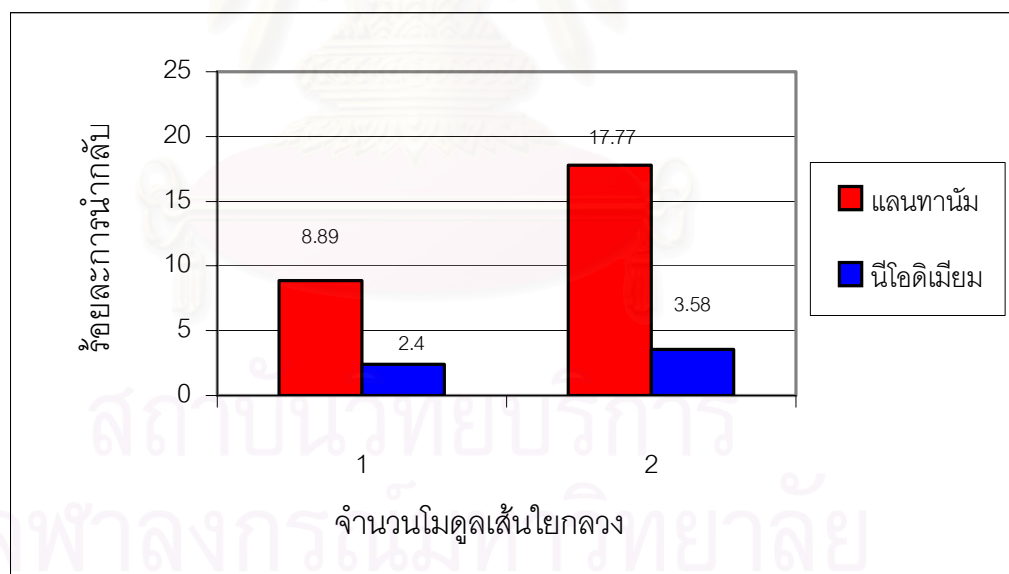
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 70$ ppm , $[HTTA] = 0.01$ mol / l , $[TOA] = 3\%$ v/v , $[HNO_3]_{strip} = 0.5$ M , $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5$ liters , $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100$ ml / min



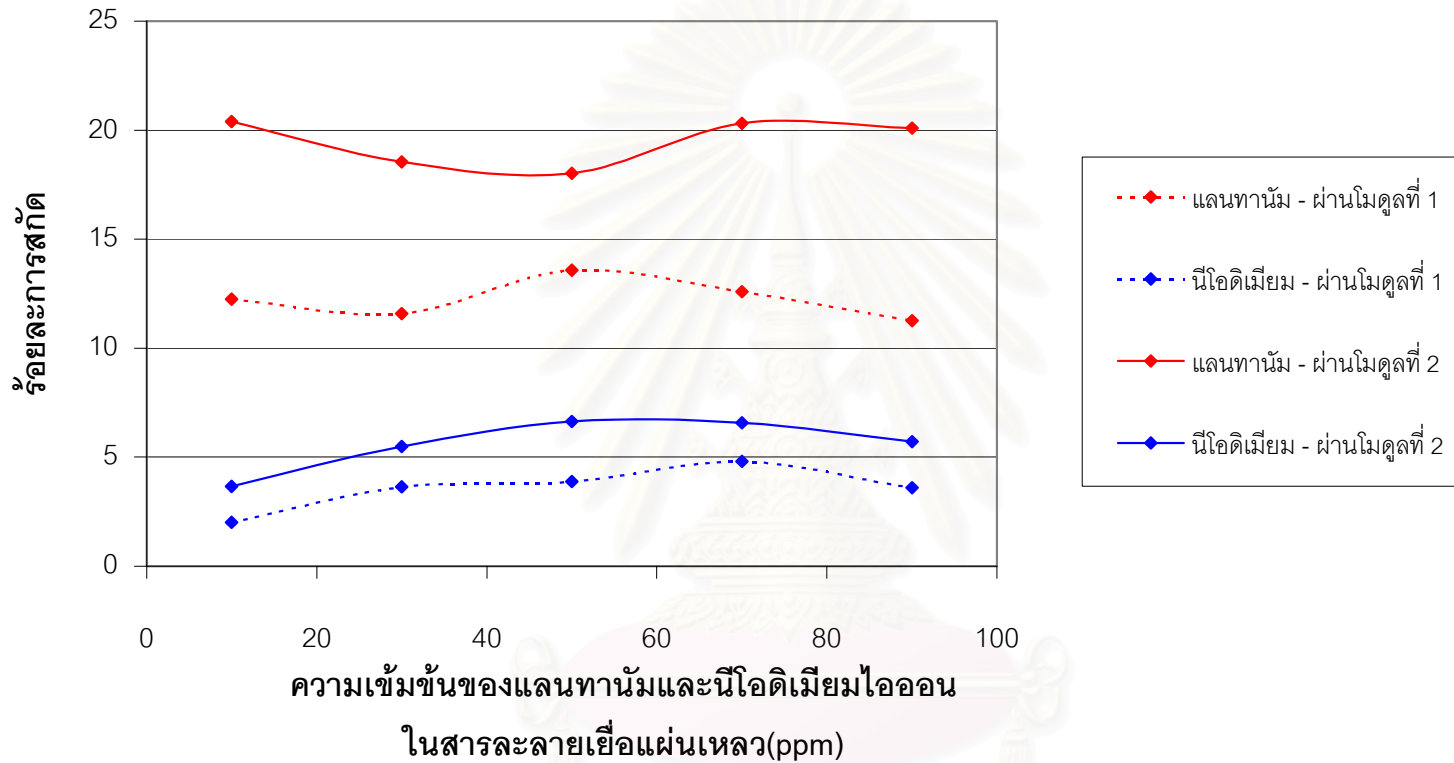
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 70$ ppm , $[HTTA] = 0.01$ mol / l , $[TOA] = 3\%$ v/v , $[HNO_3]_{strip} = 0.5$ M , $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5$ liters , $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100$ ml / min



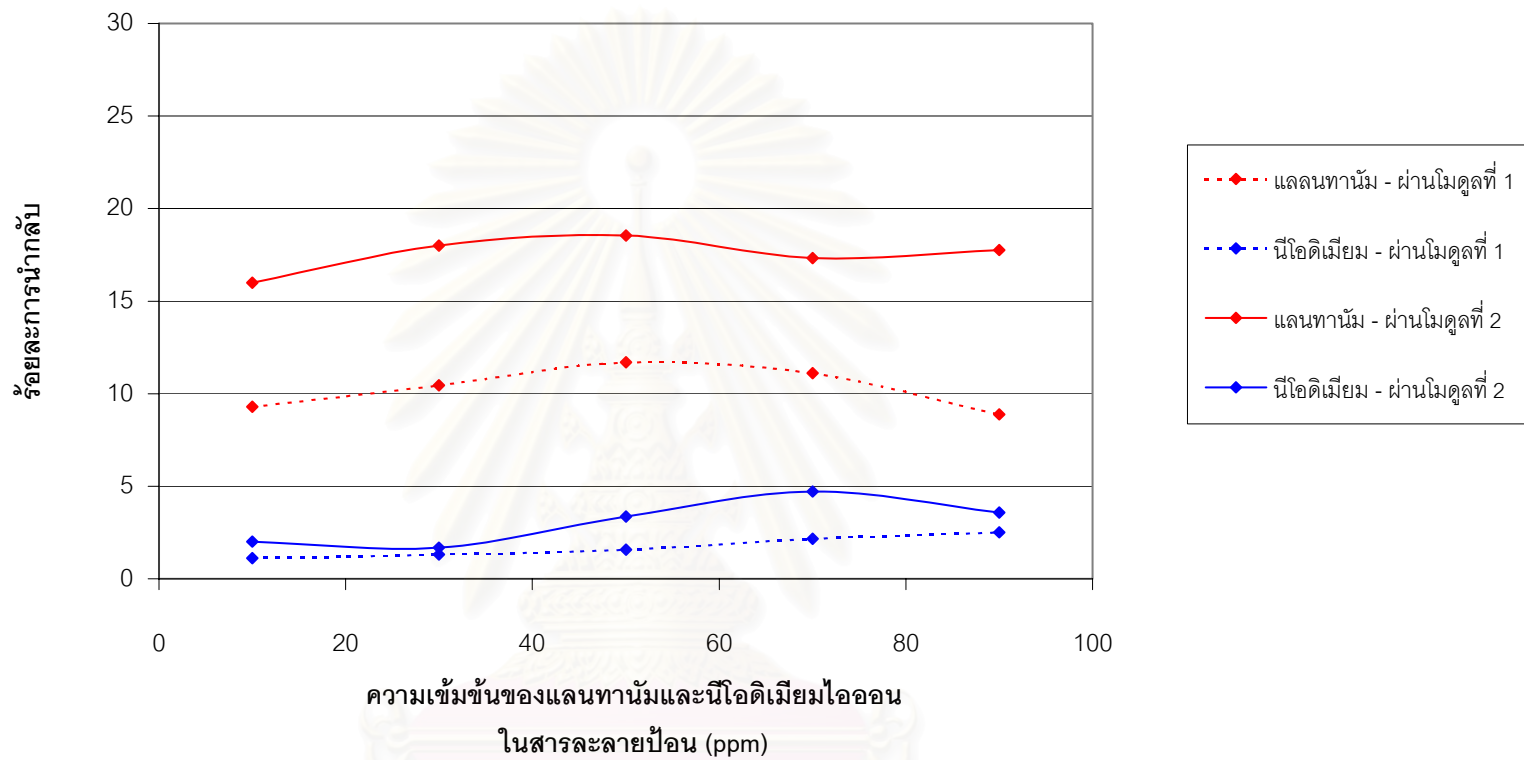
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการสกัดของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 90$ ppm , $[HTTA] = 0.01$ mol / l, $[TOA] = 3\%$ v/v, $[HNO_3]_{strip} = 0.5$ M , $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5$ liters, $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100$ ml / min



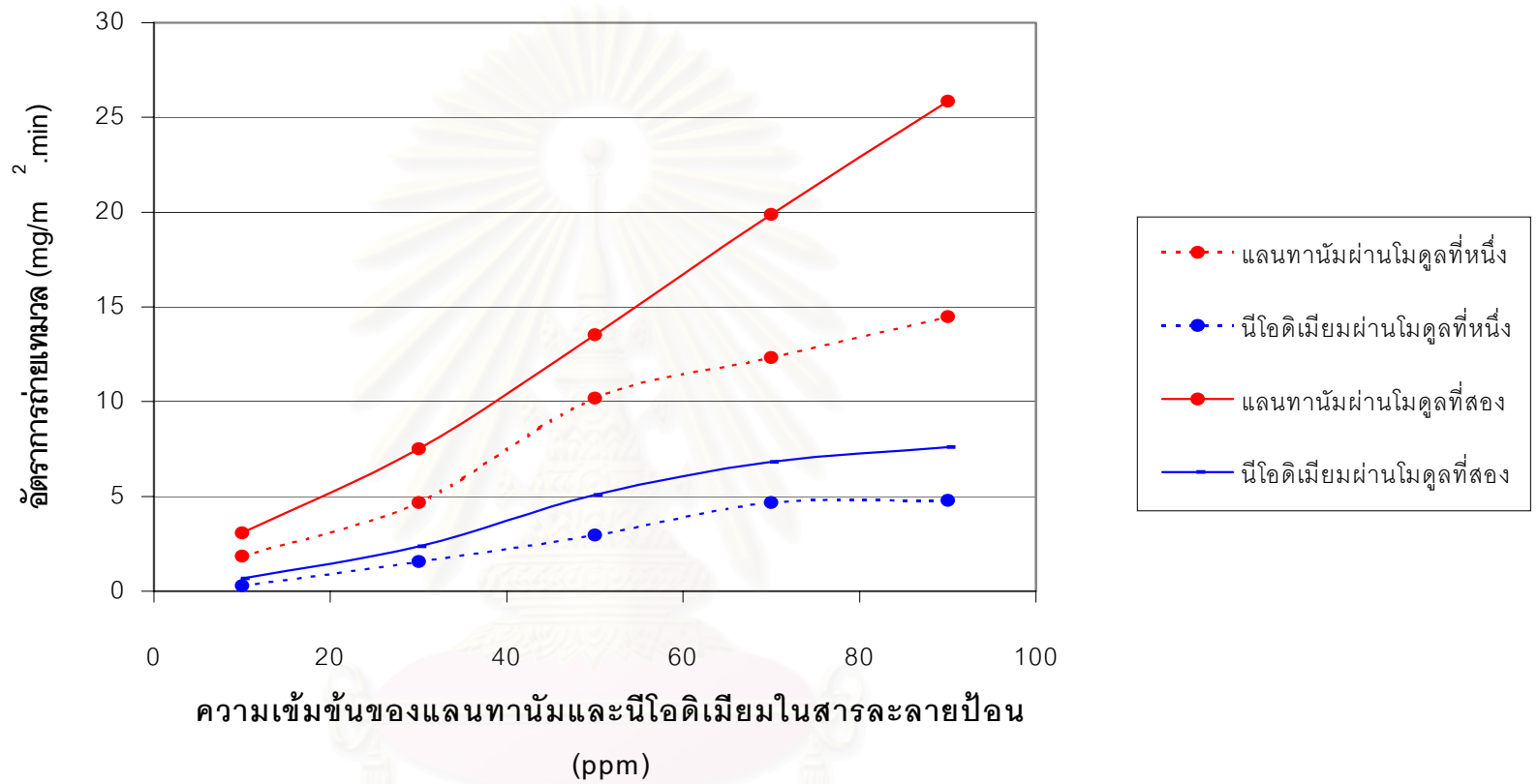
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงกับร้อยละการนำกลับของแลนทานัมและนีโอดีเมียมเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 90$ ppm , $[HTTA] = 0.01$ mol / l, $[TOA] = 3\%$ v/v, $[HNO_3]_{strip} = 0.5$ M , $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5$ liters, $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100$ ml / min



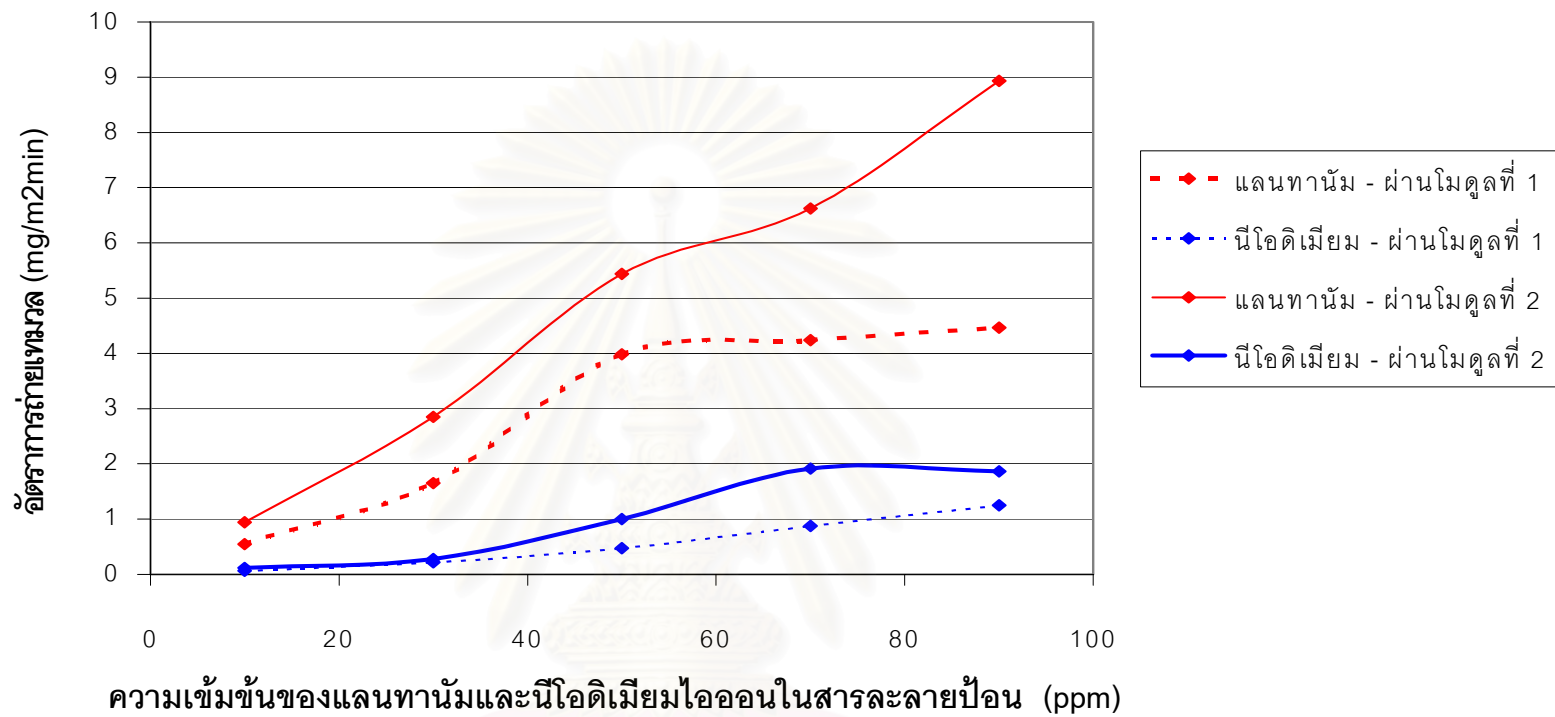
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนในสารละลายป้อน กับร้อยละการสกัดเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10$ ppm , $[HTTA] = 0.01$ mol / l, $[TOA] = 1$ %v/v $[HNO_3]_{strip} = 0.5$ M , $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5$ liters , $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100$ ml / min , และใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูลในการสกัด



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนในสารละลายป้อน กับร้อยละการสกัดเมื่อ $[La^{3+}]_f = [Nd^{3+}]_f = 10 \text{ ppm}$, $[HTTA] = 0.01 \text{ mol/l}$, $[TOA] = 1\%v/v$, $[HNO_3]_{strip} = 0.5 \text{ M}$, $Volume_{feed} = Volume_{strip} = 5 \text{ liters}$, $flowrate_{feed} = flowrate_{strip} = 100 \text{ ml/min}$, และใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูลในการสกัด



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานัมและไนโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนกับอัตราการถ่ายเทมวลในการสกัดเมื่อ $[HTTA] = 0.01 \text{ mol/l}$, $[TOA] = 1 \text{ \%v/v}$, $[\text{HNO}_3]_{\text{strip}} = 0.5 \text{ M}$, $\text{Volume}_{\text{feed}} = \text{Volume}_{\text{strip}} = 5 \text{ liter}$, $\text{flowrate}_{\text{feed}} = \text{flowrate}_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, และใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูลในการสกัด



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อน กับอัตราการถ่ายเทมวลในการนำกลับ เมื่อ $[HTTA] = 0.01 \text{ mol/l}$, $[TOA] = 1 \text{ \%v/v}$, $[HNO_3]_{\text{strip}} = 0.5 \text{ M}$, $\text{Volume}_{\text{feed}} = \text{Volume}_{\text{strip}} = 5 \text{ liter}$, $\text{flowrate}_{\text{feed}} = \text{flowrate}_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, และใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูลในการสกัด

สำหรับผลการทดลองในด้านของการนำกลับนั้นแสดงดังรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการสกัดและการนำกลับนั้นไปในแนวเดียวกันเพราะปฏิริยาการนำกลับคือปฏิริยาย้อนกลับของปฏิริยาการสกัด ไม่ว่าจะเป็ปฏิริยาการสกัดโดยตรงจากสารสกัด HTTA หรือปฏิริยาช่วยสกัดจากสารสกัด TOA ก็ตาม ต่างกันตรงที่ปฏิริยาการสกัดนั้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อนแต่ปฏิริยานำกลับนั้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับและเป็นปฏิริยาย้อนกลับ และการถ่ายเทมวลเป็นแบบสภาวะคงที่ ฉะนั้นเมื่อมีการสกัดเพิ่มขึ้นการนำกลับจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาถึงการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนออกจากกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยที่สารละลายป้อนที่ใช้เป็นสารละลายผสมของแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนความเข้มข้นเท่ากัน สารสกัดที่ใช้เป็น HTTA ผสมกับ TOA และมีสารละลายกรดไนตริกเป็นสารละลายนำกลับ โดยการปฏิบัติการเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวแบบสวนทางกันที่อัตราการไหลทั้งสองฝั่งเป็น 100 มิลลิลิตร ต่อนาที

1. ในการศึกษาถึงการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนออกจากกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ความสามารถในการถ่ายโอนแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนจากวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับโดยผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มี HTTA ผสมกับ TOA เป็นสารสกัดในเบนซีนนั้น จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จนถึงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 35 นาที การถ่ายโอนมวลจึงเริ่มคงที่ ซึ่งเวลา 35 นาทีนี้ หากใช้อัตราการไหลของสารละลายเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาทีจะต้องใช้สารละลายปริมาตร 3.5 ลิตร ดังนั้นหากใช้ปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็น 5.0 ลิตร นั้นย่อมเพียงพอต่อการศึกษาการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนออกจากกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
2. สามารถสกัดและนำกลับแลนทานัมไอออนได้ดีกว่านีโอติเมียมไอออน
3. ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีผลอย่างมากต่อการสกัดแลนทานัมและนีโอติเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 1 - 2.5 เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างความสามารถในการ

สก็ดจะเพิ่มขึ้นแต่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเกิน 2.5 ความสามารถในการสก็ดจะเริ่มลดลง

4. ความเข้มข้นของสารสก็ด HTTA ที่ให้ประสิทธิภาพในการสก็ดสูงที่สุดคือ 0.01 โมลต่อลิตรที่ความเข้มข้นของสารสก็ด TOA เท่ากับ 1% โดยปริมาตร และมีเบนซีนเป็นตัวทำละลาย
5. เมื่อผสมสารสก็ด TOA กับสารสก็ด HTTA ทำให้ความสามารถในการสก็ดเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับใช้สารสก็ด HTTA เพียงอย่างเดียว และสารสก็ด TOA นั้นยังทำให้ความสามารถในการสก็ดแลนทานัมและนีโอติเมียมนั้นไม่เท่ากัน ความเข้มข้นของ TOA ที่ให้ประสิทธิภาพในการสก็ดสูงและสามารถแยกไอออนของแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้มากที่สุดคือ 3% โดยปริมาตร ที่ความเข้มข้นของ HTTA เท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร และมีเบนซีนเป็นตัวทำละลาย
6. เมื่อเพิ่มจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงเป็น 2 โมดูลโดยมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนขาออกจากโมดูลที่หนึ่งก่อนเข้าโมดูลที่สองทำให้ความสามารถในการสก็ดเพิ่มขึ้น
7. ความเข้มข้นของสก็ดแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนในช่วง 10 - 90 ppm นั้นไม่มีผลต่อร้อยละการสก็ดแต่จะทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะลองศึกษาถึงผลของการใช้สารสก็ดชนิดอื่นที่จะมาผสมกับ HTTA เช่น Tributylphosphate (TBP) , Aliquat , trilaurylamine oxide (TLAO) เพื่อทดลองหาสารสก็ดที่เหมาะสมสำหรับการเกิดการ สก็ดแบบเสริมฤทธิ์และการสก็ดแยกแลนทานัมและนีโอติเมียมไอออนออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

2. ควรจะศึกษาถึงผลของชนิดของกรดในสารละลายป้อน เพื่อทดลองหาสารสกัดที่เหมาะสมสำหรับการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
3. ควรศึกษาถึงชนิดของตัวทำละลายเนื่องจากเบนซีนที่ใช้เป็นพิษถึงแม้ว่าจะมีการใช้กันมากกับสารสกัด HTTA ก็ตาม
4. ควรศึกษาถึงชนิดของสารละลายนำกลับ เพื่อทดลองหาชนิดของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมสำหรับการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
5. ถ้าต้องการแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนให้ห่างกันมากกว่านี้และได้ร้อยละการสกัดและการนำกลับมากกว่านี้สามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงและปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนขาออกของแต่ละโมดูล



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

1. จดหมายข่าว , ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ,2537
ปีที่ 1 ฉบับที่ 2.
2. จดหมายข่าว , ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ,2538,
ปีที่ 2 ฉบับที่ 1-4.
3. เตชนา ชุตินารา. โลหะกับประโยชน์. กองโลหกรรม ฝ่ายเผยแพร่และประชาสัมพันธ์ สำนัก
งานเลขานุการ กรมทรัพยากรธรณี , 2536 :146-529.
4. นิสิต สุไลมาน.2544. การสกัดนิกโคตติเนียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. วิทยา นามสว่าง. 2543. การสกัดแลนทานัมไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. วีรวัฒน์ ปัตทวิคองคา. 2541. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติกกับ
โซเดียมอะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. อิศรา เกษมเศรษฐ .2541. การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายเจือจางมากด้วยเยื่อแผ่น
เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

8. Cotton, F.A. 1988. Advance Inorganic Chemistry. 5th edition.
9. E.F. Kassierer and A.S.Kertes .1972. Synergistic Extraction of some Lanthanides
and Transition Metals by Two Bidentate Chelating Agent , Journal of Nuclear
Chemistry, 34:3221-3231.
10. Farbu,L. Alstad,J. and Auguston ,J.H.,1974. cited in G. Duyckaerts and J.F.
Desreux.1977, Recent Development and New Combinations of Extractants

11. Fernandez, L., Aparicio, J., and Muhammed, M. 1987. The role of feed metal concentration in the coupled transport of zinc through a bis-(2-ethylhexyl) phosphoric acid solid supported liquid membrane from aqueous perchlorate media. Separation Science and Technology 22(6) : 1575-1593.
12. G. Duyckaerts and J.F. Desreux, 1977. Recent Development and New Combinations of Extractants in Synergistic Processes. Proceeding of International Solvent Extraction Conference 1977
13. Gu, Z. 1990. A new liquid membrane technology-electrostatic pseudo liquid membrane. Journal of Membrane Science. 52 : 77- 88.
14. 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.
15. 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 Separations. Separation Science and Technology. 23(12 & 13): 1645 - 1658.
16. J.N. Mathur. 1983. Synergism of trivalent actinides and lanthanides Solvent Extraction and Ion Exchange, 1(2) , 349-412.
17. Kataoka, Nishiki and Muto A. (1995) Permeation of Lanthanum through Supported Liquid Membranes, Separation Science and Technology 30(4) : 621 – 636.
18. Khopkar and Mathur (1976) Thermodynamics of Synergistic Extraction of Europium(III) by Mixture of Thenoyltrifluoroacetone and Some Neutral oxo-Donors, Journal of Nuclear Chemistry, 39 : 653-657.
19. Komasaawa, Isao, Otake, Tsutao and Yamashita, Tomohiro. 1983 Mechanism Kinetic of Copper Permeation through a Supported Liquid Membrane

- Containing a Hydroxyoxime as Mobile Carrier. Ind. Eng. Chem. Fundam 22 : 127-131.
20. Leonard Newman and Paul Klotz.1966. Synergistic Effect of tri-Octylamine on the Solvent extraction of Americium by Thenoyltrifluoroacetone. Inorganic Chemistry. 5(3) : 461-466.
 21. Mark C. Porter.1990. Handbook of Industrial Technology membrane New Jersey: Noyes publications.
 22. Marr, R. and Kopp, A.1989. Liquid Membrane Technology-a Survey of Phenomena, Mechanisms and Models, Inter. Chem. Eng., 22(1): 44-60. H
 23. Masaaki Sugiura .1993. Effect of Quaternary Ammonium Salts on Carrier-Mediated Transport of Lanthanide Ions through Cellulose Triacetate Membranes Separation Science and Technology , 28(7) :1453-1463.
 24. Masaaki Sugiura and Hirofumi Hirata.1993. Effect of Phospholipids on Carrier-Mediated Transport of Lanthanide Ions through Cellulose Triacetate Membranes, Separation Science and Technology , 28(10) :1933-1937.
 25. Naohiro KaMeta and Hisanori Imura .2001. Synergistic Effect of Tris(4-isopropyltropolonato)Cocolt(III) on The Extraction of Lanthanoid(III) with 2-Thenoyltrifluoroacetone. Analytical Science. January ,17 : 957-962.
 26. O' Hara , P.A., and Bohrer, M.P. 1989.Supported Liquid Membrane for Copper transport. Journal of Membrane Science. 44 : 273-287.
 27. Peppard, D.F.,1970. cited in . Duyckaerts and J.F. Desreux.1977, Recent Development and New Combinations of Extractants in Synergistic Proesses. Proceeding of International Solvent Extraction Conference 1977.
 28. R.G. Puzic and Z.B. Maskimaovic 1971 cite in Solvent Extraction of Some Actinides in mixed Solvents triaurylamine oxide/2- Thenoyltrifluoroacetone system Proceeding of International Solvent Extraction Conference 1971.

29. Rautenbach and Machhamerr, O.1988. Modeling of liquid membrane separation Process. Journal of membrane Science 39 : 425-444.
30. Schultz ,G.1988. Separation Techniques with Supported Liquid Membrane. Desalination 68 : 191-202.
31. Sengupta, A., Basu, R., and Sirka K.K. 1988. Separation of Solutes From Aqueous Solution by Contained Liquid Membranes. AIChE Journal 34 (10):1968-1708.
32. Shiau, Ching-Yeh and Chen, Pai-Zoh 1993. Theoretical Analysis of Copper-Ion Extraction through Hollow fiber Supported Liquid Membranes. Separation Science and Technology 28 (13 , 14) : 2149-2165.
33. T.M. Sami and A. A. Abd el Tawab.1996. Synergistic Extraction of Some Rare Earth (III) Nitrate Media by Thenoyltrifluoroacetone and Tri-n-octylamine Separation Science and Technology 31(18) : 2579-2587.
34. Taube และ Siekierski,S.,Nukleonika,1961. cited in . Duyckaerts and J.F. Desreux.1977, Recent Development and New Combinations of Extractantsin Synergistic Proesses. Proceeding of International Solvent Extraction Conference 1977.
35. Tavlarides, L.L., Bae, J.H. and Lee, C.K. 1987. Solvent Extraction, Membrane and Ion Exchange in Hydrometallurgical Dilute Metals Separation. Separation Science and Technology., 22(2-3): 581-617.
36. Teramoto Masaaki , Masuyama , Hiedo , Takaya, Hitoshi , and Asano, Shigehiro.1987 Development of Spiral – Type Supported Liquid Membrane Module for Separation and Concentration Metal Ions.Separation Science and Technology. 22(11) : 2175 – 2201.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 แสดงข้อมูลการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกันด้วย เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง และหาปริมาณกับเวลาที่เหมาะสมสำหรับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (นาที)	ด้านสารละลายป้อน		ด้านสารละลายนำกลับ	
	[La ³⁺]	[Nd ³⁺]	[La ³⁺]	[Nd ³⁺]
0	10.340	10.651	0.002	0.000
5	9.779	10.094	0.228	0.226
10	9.006	9.985	0.282	0.270
15	8.488	9.478	0.312	0.299
20	8.299	9.312	0.601	0.547
25	7.924	8.977	1.212	0.750
30	7.804	8.932	1.711	1.203
35	7.660	8.922	1.800	1.314
40	7.681	8.885	1.776	1.295
45	7.716	8.900	1.825	1.307
50	7.691	8.890	1.809	1.289

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, pH_f = 2.5 , V_f = V_s = 5 liters, [HTTA] = 0.01 M , [TOA] = 1%v/v , Q_f = Q_s = 100 ml/min . ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ก-2 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ตาราง ก-2.1 ด้านสารละลายป้อน (หน่วยเป็น ppm)

pH	ทดลองครั้งที่ 1				ทดลองครั้งที่ 2				ทดลองครั้งที่ 3			
	[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]	
	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
1.0	11.050	10.883	11.51	11.329	10.041	9.9183	10.469	10.318	10.787	10.699	12.949	12.898
1.5	10.321	10.071	11.07	10.855	10.980	10.694	11.17	10.874	9.504	9.123	11.444	11.278
2.0	11.185	10.498	9.15	8.8725	11.255	10.365	9.158	8.7739	10.024	9.411	9.966	9.551
2.5	9.787	7.7907	9.697	8.2161	12.187	9.4212	9.473	7.8714	8.236	6.457	9.492	7.840
3.0	11.665	9.5425	9.923	8.3546	10.256	8.2461	10.024	8.4528	11.45	9.397	11.040	9.431
3.5	11.041	9.1311	10.557	8.9390	10.037	8.4051	10.610	9.0556	11.133	9.343	11.721	10.090
4.0	10.911	9.1273	11.930	10.355	9.876	8.4230	12.085	10.681	10.487	8.640	13.151	11.135
4.5	10.216	8.5886	11.214	9.8459	10.345	8.8407	11.645	10.359	10.010	8.4714	10.137	8.7573
5.0	10.577	9.2295	10.675	9.3575	9.531	8.172	9.740	8.664	10.120	8.7163	9.976	8.927

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, V_f = V_s = 5 liters, [HTTA] = 0.01M, [TOA] = 1%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ก-2.2 ด้านสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็น ppm)

pH Feed	ทดลองครั้งที่ 1				ทดลองครั้งที่ 2				ทดลองครั้งที่ 3			
	[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]	
	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
1.0	0.001	0.082	0.010	0.070	0.000	0.028	0.005	0.011	0.010	0.092	0.020	0.125
1.5	0.002	0.254	0.000	0.267	0.010	0.255	0.011	0.113	0.005	0.144	0.007	0.140
2.0	0.011	0.321	0.025	0.245	0.004	0.354	0.002	0.197	0.005	0.385	0.018	0.253
2.5	0.015	1.695	0.001	1.046	0.003	2.071	0.020	0.946	0.024	1.517	0.009	1.202
3.0	0.005	1.795	0.005	1.147	0.017	1.605	0.015	1.256	0.001	1.825	0.007	1.200
3.5	0.007	1.632	0.004	0.914	0.012	1.526	0.007	0.859	0.001	1.790	0.000	1.243
4.0	0.000	1.497	0.014	0.684	0.000	1.283	0.000	0.788	0.003	1.614	0.012	1.138
4.5	0.012	1.143	0.013	0.967	0.004	1.389	0.000	0.956	0.000	1.371	0.016	1.083
5.0	0.006	1.311	0.000	0.643	0.003	1.364	0.001	1.022	0.000	1.234	0.009	0.754

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, V_f=V_s = 5 liters, [HTTA] = 0.01 M, [TOA] = 1 %v/v, Q_f= Q_s= 100 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ก-3 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกัน ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ตาราง ก-3.1 ด้านสารละลายป้อน (หน่วยเป็น ppm)

[HTTA] (โมลต่อ ลิตร)	ทดลองครั้งที่ 1				ทดลองครั้งที่ 2				ทดลองครั้งที่ 3			
	[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]	
	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
0.005	11.030	10.85	11.33	11.23	10.458	10.150	11.580	11.400	9.967	9.639	9.742	9.487
0.010	9.780	7.790	9.690	8.211	12.182	9.4346	9.471	7.695	8.230	6.619	9.491	7.961
0.020	9.855	8.105	11.500	9.744	10.047	8.102	10.224	8.461	10.600	8.696	10.072	8.519
0.030	10.057	9.455	10.434	10.005	9.443	8.799	9.355	9.060	11.431	10.961	10.388	10.166
0.040	9.823	9.487	11.436	11.133	11.220	10.875	10.331	10.074	10.550	10.202	11.113	10.808

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [TOA] = 1%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก-3.2 ด้านสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็น ppm)

[HTTA] (โมลต่อ ลิตร)	ทดลองครั้งที่ 1				ทดลองครั้งที่ 2				ทดลองครั้งที่ 3			
	[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]	
	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
0.005	0.000	0.165	0.002	0.211	0.000	0.233	0.001	0.181	0.002	0.224	0.002	0.173
0.010	0.007	0.148	0.002	0.1165	0.000	2.112	0.003	1.022	0.004	1.399	0.000	0.948
0.020	0.001	1.485	0.008	1.408	0.001	1.685	0.007	1.563	0.000	1.545	0.001	1.331
0.030	0.012	0.490	0.000	0.475	0.003	0.548	0.007	0.460	0.000	0.674	0.000	0.477
0.040	0.002	0.298	0.002	0.328	0.002	0.400	0.004	0.314	0.001	0.177	0.000	0.106

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [TOA] = 1%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ก-4 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกัน ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ตาราง ก-4.1 ด้านสารละลายป้อน (หน่วยเป็น ppm)

[TOA] (%v/v)	ทดลองครั้งที่ 1				ทดลองครั้งที่ 2				ทดลองครั้งที่ 3			
	[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]	
	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
0	8.810	8.521	10.113	9.777	10.541	10.373	10.588	10.517	9.410	9.165	10.841	10.683
1	9.780	7.790	9.690	8.211	12.182	9.434	9.471	7.769	8.230	6.451	9.494	7.841
2	8.641	7.112	9.448	8.504	10.087	8.144	11.277	10.443	9.540	7.888	10.250	9.3746
3	10.294	8.67	11.756	11.298	10.466	8.799	10.391	9.9505	10.004	8.301	10.020	9.704
4	9.707	9.388	10.987	10.722	11.044	10.426	10.545	10.458	9.640	9.039	11.730	11.584
5	7.992	7.912	9.7711	9.750	10.701	10.481	11.252	11.139	9.190	9.063	11.141	11.082
6	8.966	10.785	10.517	10.561	10.060	9.9352	9.977	9.8463	10.331	10.319	10.210	10.210

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [TOA] = 1%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ก-4.2 ด้านสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็น ppm)

[TOA] (%v/v)	ทดลองครั้งที่ 1				ทดลองครั้งที่ 2				ทดลองครั้งที่ 3			
	[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]		[La ³⁺]		[Nd ³⁺]	
	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก	เข้า	ออก
0	0.008	0.098	0.000	0.058	0.000	0.090	0.001	0.144	0.001	0.197	0.001	0.176
1	0.000	1.695	0.001	1.046	0.002	2.071	0.002	0.946	0.000	1.5176	0.001	1.202
2	0.002	1.315	0.002	0.530	0.004	1.596	0.001	0.474	0.000	1.5139	0.003	0.743
3	0.002	1.479	0.002	0.339	0.000	1.401	0.000	0.249	0.000	1.225	0.007	0.278
4	0.004	0.3445	0.000	0.185	0.000	0.722	0.005	0.093	0.001	0.642	0.007	0.078
5	0.000	0.126	0.002	0.025	0.012	0.191	0.002	0.049	0.000	0.128	0.001	0.088
6	0.000	0.051	0.000	0.005	0.005	0.094	0.000	0.001	0.000	0.132	0.001	0.010

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [TOA] = 1%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ก-5 แสดงข้อมูลการศึกษาผลของจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงและผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายป้อนต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ตาราง ก-5.1 ด้านสารละลายป้อน (หน่วยเป็น ppm)

[La ³⁺], [Nd ³⁺] ในสารละลาย ป้อน (ppm)	สารละลายป้อน ขาเข้า		สารละลายป้อนขาออก ผ่านโมดูลที่ 1		สารละลายป้อนขาออก ผ่านโมดูลที่ 2	
	[La ³⁺]	[Nd ³⁺]	[La ³⁺]	[Nd ³⁺]	[La ³⁺]	[Nd ³⁺]
10	10.540	10.21	9.248	9.994	8.390	9.730
30	28.351	29.940	25.067	28.850	23.093	28.293
50	52.582	53.660	45.444	51.577	43.105	50.102
70	68.505	72.640	59.869	69.371	54.587	67.860
90	90.057	93.221	79.901	89.864	71.949	87.897

: pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [TOA] = 3%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml / min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว และไหลสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก-5.2 ด้านสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็น ppm)

[La ³⁺], [Nd ³⁺] ในสารละลาย ป้อน (ppm)	สารละลายป้อน ขาเข้า		สารละลายป้อนขาออก ผ่านโมดูลที่ 1		สารละลายป้อนขาออก ผ่านโมดูลที่ 2	
	[La ³⁺]	[Nd ³⁺]	[La ³⁺]	[Nd ³⁺]	[La ³⁺]	[Nd ³⁺]
10	0.000	0.000	0.980	0.114	1.686	0.205
30	0.002	0.001	2.965	0.389	5.105	0.499
50	0.001	0.000	7.135	0.847	9.748	1.797
70	0.000	0.000	7.603	1.569	11.864	3.428
90	0.000	0.000	8.005	16.001	2.237	3.337

: pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [TOA] = 3%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml / min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียว และไหลสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณ

ตาราง ข-1 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกันด้วย เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและหาปริมาณกับเวลาที่เหมาะสมสำหรับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

เวลาที่เก็บตัวอย่าง (นาที)	ด้านสารละลายป้อน		ด้านสารละลายนำกลับ	
	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	5.42	5.22	2.34	2.24
10	7.90	6.24	2.89	2.71
15	13.20	11.00	3.2	3.16
20	15.13	12.56	6.15	5.88
25	18.97	15.70	12.4	8.36
30	20.20	16.13	17.5	13.47
35	21.67	16.22	18.41	14.73
40	21.45	16.57	18.17	14.58
45	21.10	16.43	18.67	14.69
50	21.35	16.52	18.5	14.5

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [HTTA] = 0.01 M, [TOA] = 1%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml/min. ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ข-2 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาถึงผลของค่าความเป็นกรด-ต่างต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกันด้วย เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ตาราง ข-2.1 ด้านสารละลายป้อน (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

ค่าความเป็นกรด-ต่าง (pH)	ทดลองครั้งที่ 1		ทดลองครั้งที่ 2		ทดลองครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
1.0	1.51	1.48	1.31	1.35	0.83	1.081	1.218	1.30
1.5	2.41	1.94	2.6	2.03	4.00	1.486	3.003	1.81
2.0	6.1	2.5	7.86	4.11	6.08	4.116	6.682	3.57
2.5	20.34	15.21	22.65	16.88	21.62	17.38	21.53	16.49
3.0	18.16	15.78	19.55	15.64	17.63	14.58	18.44	15.33
3.5	17.29	15.27	16.2	14.65	16.08	13.90	16.52	14.60
4.0	16.34	13.2	14.66	11.58	17.55	15.36	16.18	13.38
4.5	15.88	12.09	14.5	11	15.37	13.55	15.25	12.21
5.0	12.1	12.3	14.25	11.04	13.87	10.46	13.40667	11.26

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, V_f = V_s = 5 liters, [HTTA] = 0.01M, [TOA] = 1 %v/v, Q_f = Q_s = 5 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ข-2.2 ด้านสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	ทดลองครั้งที่ 1		ทดลองครั้งที่ 2		ทดลองครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
1.0	0.75	0.61	0.28	0.11	0.86	0.97	0.63	0.56
1.5	2.47	2.42	2.33	1.02	1.52	1.23	2.10	1.55
2.0	2.88	2.70	3.15	2.16	3.85	2.55	3.29	2.47
2.5	17.34	10.80	17.01	9.99	18.44	12.67	17.59	11.15
3.0	15.40	11.57	15.66	12.54	16.01	10.87	15.69	11.66
3.5	14.79	8.67	15.22	8.10	16.09	10.61	15.36	9.12
4.0	13.73	5.74	13.00	6.53	15.41	8.66	14.04	6.97
4.5	11.20	8.64	13.44	8.22	13.70	10.70	12.78	9.18
5.0	12.49	6.03	14.32	10.50	12.20	7.57	13.00	8.03

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, V_f = V_s = 5 liters, [HTTA] = 0.01M, [TOA] = 1%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-3 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารสกัด HTTA ต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ตาราง ข-3.1 ด้านสารละลายป้อน (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

[HTTA] (โมลต่อลิตร)	ทดลองครั้งที่ 1		ทดลองครั้งที่ 2		ทดลองครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
0.005	1.63	0.88	2.87	1.55	3.22	2.59	2.57	1.674
0.01	20.34	15.27	22.54	18.74	19.57	16.11	20.81	16.70
0.02	17.76	15.30	19.3	17.21	17.96	15.4	18.34	15.97
0.03	5.970	4.12	6.79	3.1	4.1	2.06	5.62	3.09
0.04	3.462	2.62	3.07	2.19	3.29	2.71	3.27	2.50

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, pH_f = 2.5 , V_f = V_s = 5 liters, M , [TOA] = 1%v/v, Q_f = Q_s = 5 ml/min , ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ข-3.2 ด้านสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

[HTTA] (โมลต่อลิตร)	ทดลองครั้งที่ 1		ทดลองครั้งที่ 2		ทดลองครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
0.005	1.50	1.87	2.23	1.57	2.25	1.78	1.99	1.74
0.01	1.51	1.20	17.34	10.8	17.01	9.99	18.44	12.67
0.02	15.08	12.25	16.79	15.3	14.58	13.22	15.483	13.59
0.03	4.88	4.56	5.81	4.92	5.9	4.6	5.53	4.69
0.04	3.04	2.87	3.57	3.05	1.68	0.96	2.763	2.29

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, M, [TOA] = 1%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-4 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัด แยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ตาราง ข-4.1 ด้านสารละลายป้อน (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

[TOA] (% v/v)	ทดลองครั้งที่ 1		ทดลองครั้งที่ 2		ทดลองครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
0	3.29	3.36	1.58	0.59	2.6	1.44	2.49	1.79
1	20.34	15.21	22.65	16.88	21.62	17.38	21.53	16.49
2	17.70	9.95	19.20	7.33	17.31	8.54	18.07	8.60
3	15.77	3.89	15.92	4.23	16.99	3.15	16.42	3.76
4	3.29	2.36	5.56	0.77	6.23	1.24	5.02	1.45
5	1.00	0.20	2.04	0.98	1.38	0.52	1.47	0.56
6	1.20	0.20	1.24	0.10	1.05	0.00	1.16	0.00

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm , pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [HTTA] = 0.01M, Q_f = Q_s = 100 ml/min. ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข-4.2 ด้านสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

[TOA] (% v/v)	ทดลองครั้งที่ 1		ทดลองครั้งที่ 2		ทดลองครั้งที่ 2		เฉลี่ย	
	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
0	1.12	0.58	0.86	1.36	2.1	1.63	1.36	1.19
1	17.34	10.8	17.01	9.99	18.44	12.67	17.59	11.15
2	15.22	5.62	15.84	4.21	15.87	7.25	15.64	5.69
3	14.34	2.86	13.4	2.4	12.25	2.78	13.34	2.69
4	3.55	1.69	6.54	0.88	6.67	0.67	5.58	1.08
5	1.58	0.26	1.79	0.44	1.4	0.79	1.59	0.49
6	0.58	0.00	0.94	0.10	1.28	0.10	0.93	0.06

: [La³⁺] = [Nd³⁺] = 10 ppm, pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [HTTA] = 0.01M, Q_f = Q_s = 100 ml/min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ข-5 แสดงผลการคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับในการศึกษาผลของจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงและผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนในสารละลายป้อนต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ตาราง ข-5.1 ด้านสารละลายป้อน (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

[La ³⁺] และ [Nd ³⁺] (ppm)	10		30		50		70		90	
จำนวนโมดูล เส้นใยกลวง	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
1	12.25	2.01	11.58	3.64	13.57	3.88	12.6	4.5	11.27	3.6
2	20.39	3.66	18.54	5.5	18.02	6.63	20.31	6.58	20.1	5.71

ตาราง ข-5.2 ด้านสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์)

[La ³⁺] และ [Nd ³⁺] (ppm)	10		30		50		70		90	
จำนวนโมดูล เส้นใยกลวง	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
1	9.30	1.12	10.46	1.30	11.69	1.58	11.10	2.16	8.89	2.40
2	16.00	2.01	18.01	1.67	18.54	3.35	17.32	4.72	17.77	3.58

: pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [TOA] = 3%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml / min, ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ข-6 แสดงผลการคำนวณอัตราการถ่ายเทมวลทางด้านสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในการศึกษาผลของจำนวนโมดูลเส้นใยกลวงและผลของความเข้มข้นของแลนทานัมและนีโอดิเมียมไอออนในสารละลายป้อนต่อการสกัดแยกแลนทานัมและนีโอดิเมียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ตาราง ข-6.1 ด้านสารละลายป้อน (หน่วยเป็น $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$)

[La ³⁺] และ [Nd ³⁺] (ppm)	10		30		50		70		90	
จำนวนโมดูล เส้นใยกลวง	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
1	1.85	0.29	4.68	1.55	10.19	2.97	12.33	4.66	14.49	4.79
2	3.07	0.67	7.57	2.35	13.53	5.08	19.87	6.82	25.85	7.60

: $\text{pH}_f = 2.5$, $V_f = V_s = 5$ liters, $[\text{TOA}] = 3\% \text{v/v}$, $Q_f = Q_s = 100$ ml / min ,ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

ตาราง ข-6.2 ด้านสารละลายนำกลับ (หน่วยเป็น mg/m².min)

[La ³⁺] และ [Nd ³⁺] (ppm)	10		30		50		70		90	
จำนวนโมดูล	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺	La ³⁺	Nd ³⁺
1	0.546	0.063	1.654	0.217	3.981	0.473	4.243	0.875	4.467	1.248
2	0.941	0.114	2.849	0.279	5.439	1.003	6.620	1.913	8.929	1.862

: pH_f = 2.5, V_f = V_s = 5 liters, [TOA] = 3%v/v, Q_f = Q_s = 100 ml / min ,ปฏิบัติการแบบไหลผ่านครั้งเดียวและไหลสวนทางกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

คำนิยาม

ค-1 ร้อยละการสกัด

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{C_{f,\text{out}} - C_{f,\text{in}}}{C_{f,\text{in}}} \times 100 \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ $C_{f,\text{in}}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า (ppm)

$C_{f,\text{out}}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายป้อนขาออก (ppm)

ค-2 ร้อยละการนำกลับ

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{(C_{s,\text{out}} - C_{s,\text{in}})}{C_{f,\text{in}}} \times 100 \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ $C_{s,\text{in}}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายนำกลับขาเข้า (ppm)

$C_{s,\text{out}}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)

3. ค-3 อัตราการถ่ายเทมวลในการสกัด ($\text{Flux}_{\text{extract}}$)

$$\text{อัตราการถ่ายเทมวลในการสกัด} = \left[\frac{\text{อัตราการถ่ายเทมวลในการสกัด}}{\text{พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ}} \right] \quad (\text{ค.3})$$

ค-4. อัตราการถ่ายเทมวลในการนำกลับ ($Flux_{recovery}$)

$$\text{อัตราการถ่ายเทมวลในการนำกลับ} = \left[\frac{\text{อัตราการถ่ายเทมวลในการนำกลับ}}{\text{พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ}} \right]$$

(ค.4)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

ง-1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด

ข้อมูลจากภาคผนวก ก. ตาราง ก-4.1 พิจารณาที่การทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 3% โดยปริมาตร

พิจารณาแลนทานัมไอออน

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า = 10.294 ppm (mg/l)

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนขาออก = 8.670 ppm (mg/l)

จากสมการ ค.1

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{10.294 - 8.67}{10.294} \times 100$$

$$= 15.77 \quad \text{หรือ เปอร์เซ็นต์การสกัด } 18 \%$$

พิจารณานีโอติเมียมไอออน

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า = 11.756 ppm (mg/l)

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนขาออก = 11.298 ppm (mg/l)

จากสมการ ค.1

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{11.756 - 11.298}{11.756} \times 100$$

$$= 3.89 \quad \text{หรือ เปอร์เซ็นต์การสกัด } 3.89 \%$$

ง-2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ

ข้อมูลจากภาคผนวก ก-4 ตาราง ก4-2 พิจารณาที่การทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 3% (v/v)

พิจารณาแลนทานัมไอออน

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า = 10.294 ppm (mg/l)
 ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายนำกลับขาเข้า = 0.002 ppm (mg/l)
 ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายนำกลับขาออก = 1.479 ppm (mg/l)

จากสมการ ค.2

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการนำกลับ} &= \frac{(1.479 - 0.002)}{10.294} \times 100 \\ &= 14.34 \text{ หรือ เปอร์เซ็นต์การนำกลับ } 14.34\% \end{aligned}$$

พิจารณานีโอดีเมียมไอออน

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนขาเข้า = 11.756 ppm (mg/l)
 ความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายนำกลับขาเข้า = 0.002 ppm (mg/l)
 ความเข้มข้นของนีโอดีเมียมไอออนในสารละลายนำกลับขาออก = 0.339 ppm (mg/l)

จากสมการ ค.2

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการนำกลับ} &= \frac{(0.339 - 0.002)}{11.756} \times 100 \\ &= 2.86 \text{ หรือ เปอร์เซ็นต์การนำกลับ } 2.86\% \end{aligned}$$

ง-3 ตัวอย่างการคำนวณอัตราการถ่ายเทมวลในการสกัด

ข้อมูลจากภาคผนวก ก-5 ตาราง ก-5.1 พิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน 30 ppm ที่สารละลายป้อนเข้าโมดูลที่ 1 และสารละลายป้อนขาออกจากโมดูลที่ 1

พิจารณาแลนทานัมไอออน

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนเข้า = 28.351 ppm (mg/l)

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนขาออก = 25.067 ppm (mg/l)

เนื่องจากปริมาตรที่ใช้ในการปฏิบัติการเท่ากับ 5 ลิตร ดังนั้น

ปริมาณแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนเข้า = $28.351 \times 5 = 141.75$ mg

ปริมาณแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนขาออก = $25.067 \times 5 = 125.33$ mg

ในการทดลองปฏิบัติการที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับ 100 ml/min ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Resident time} &= \frac{\text{Volume of tube}}{\text{Mass flow rate}} \\ &= \frac{250 \text{ ml}}{100 \text{ ml / min}} = 2.5 \text{ min} \end{aligned}$$

(Volume of Tube = 250 ml [6])

จากตาราง 3.2 พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ = 1.4 m^2 ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราการถ่ายเทมวลในการสกัด} &= \frac{51.47 - 43.35}{2.5 \times 1.4} \\ &= 4.69 \text{ mg / m}^2 \text{ min} \end{aligned}$$

พิจารณานีโอติเมียมไอออน

ความเข้มข้นของไนโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนเข้า = 29.940 ppm (mg/l)

ความเข้มข้นของไนโอติเมียมไอออนในสารละลายป้อนออก = 28.850 ppm (mg/l)

เนื่องจากปริมาตรที่ใช้ในการปฏิบัติการเท่ากับ 5 ลิตร ดังนั้น

ปริมาณแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนเข้า = 29.94 x 5 = 149.70 mg

ปริมาณแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนออก = 28.85 x 5 = 144.25 mg

ในการทดลองปฏิบัติการที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับ 100 ml/min ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Resident time} &= \frac{\text{Volume of tube}}{\text{Mass flow rate}} \\ &= \frac{250 \text{ ml}}{100 \text{ ml / min}} = 2.5 \text{ min} \end{aligned}$$

(Volume of Shell = 250 ml [6])

จากตาราง 3.2 พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ = 1.4 m² ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราการถ่ายเทมวลในการสกัด} &= \frac{149.7 - 144.25}{2.5 \times 1.4} \\ &= 1.55 \text{ mg / m}^2 \text{ min} \end{aligned}$$

ง-4 ตัวอย่างการคำนวณอัตราการถ่ายเทมวลในการนำกลับ

ข้อมูลจากภาคผนวก ก-5 ตาราง ก-5.2 พิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน 30 ppm ที่สารละลายป้อนเข้าโมดูลที่ 1 และสารละลายป้อนออกจากโมดูลที่ 1

พิจารณาแลนทานัมไอออน

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายน้ำกลับขาเข้า = 0.002 ppm (mg/l)

ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายน้ำกลับขาออก = 2.965 ppm (mg/l)

เนื่องจากปริมาตรที่ใช้ในการปฏิบัติการเท่ากับ 5 ลิตร ดังนั้น

ปริมาณแลนทานัมไอออนในสารละลายน้ำกลับขาเข้า = $0.002 \times 5 = 0.010$ mg

ปริมาณแลนทานัมไอออนในสารละลายน้ำกลับขาออก = $2.965 \times 5 = 14.825$ mg

ในการทดลองปฏิบัติการที่อัตราการไหลของสารละลายน้ำกลับเท่ากับ 100 ml/min ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Resident time} &= \frac{\text{Volume of tube}}{\text{Mass flow rate}} \\ &= \frac{640 \text{ ml}}{100 \text{ ml / min}} = 6.4 \text{ min} \end{aligned}$$

(Volume of Tube = 640 ml [6])

จากตาราง 3.2 พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ = 1.4 m^2 ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราการถ่ายเทมวลในการนำกลับ} &= \frac{14.825 - 0.01}{6.4 \times 1.4} \\ &= 1.65 \text{ mg / m}^2 \text{ min} \end{aligned}$$

พิจารณานีโอติเมียมไอออน

ความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนในสารละลายน้ำกลับขาเข้า = 0.001 ppm (mg/l)

ความเข้มข้นของนีโอติเมียมไอออนในสารละลายน้ำกลับขาออก = 0.389 ppm (mg/l)

เนื่องจากปริมาตรที่ใช้ในการปฏิบัติการเท่ากับ 5 ลิตร ดังนั้น

ปริมาณไอโอดีเมียมไอออนในสารละลายนำกลับเข้า = $0.001 \times 5 = 0.005 \text{ mg}$

ปริมาณไอโอดีเมียมไอออนในสารละลายนำกลับออก = $0.389 \times 5 = 1.945 \text{ mg}$

ในการทดลองปฏิบัติการที่อัตราการไหลของสารละลายนำกลับเท่ากับ 100 ml/min ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Resident time} &= \frac{\text{Volume of tube}}{\text{Mass flow rate}} \\ &= \frac{640 \text{ ml}}{100 \text{ ml / min}} = 6.4 \text{ min} \end{aligned}$$

(Volume of Tube = 640 ml [6])

จากตาราง 3.2 พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ = 1.4 m^2 ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราการถ่ายเทมวลในการนำกลับ} &= \frac{1.945 - 0.005}{6.4 \times 1.4} \\ &= 0.216 \text{ mg / m}^2 \text{ min} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้วิจัย

นายประกร รามกุล เกิดเมื่อวันที่ 21 มกราคม 2520 เป็นบุตรเพียงคนเดียวของ พลตรี วีระ รามกุล และนางไพรินทร์ รามกุล เกิดและเติบโตที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี ในปี 2532 และศึกษาต่อในระดับมัธยมที่โรงเรียนสามเสนวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพฯ มีผลการเรียนอยู่ในเกณฑ์ดี หลังจากศึกษาจบชั้นมัธยมศึกษาเมื่อปี 2538 จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในระยะเวลา 4 ปีที่เรียนในระดับอุดมศึกษานั้น ได้ตั้งใจศึกษาเล่าเรียน และขยันหมั่นเพียร จนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมีเมื่อปี 2542 และภายในปีเดียวกันนั้นด้วยความมุ่งมั่น จึงได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และใช้ชีวิตอยู่ในรั้วจามจุรีเป็นเวลา 3 ปี จึงสำเร็จการศึกษาในปี 2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย