

การสกัดเสริมฤทธิ์แยกไอออนิตเทรียมจากธาตุหายากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นายทศพร สุภาจรรยา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

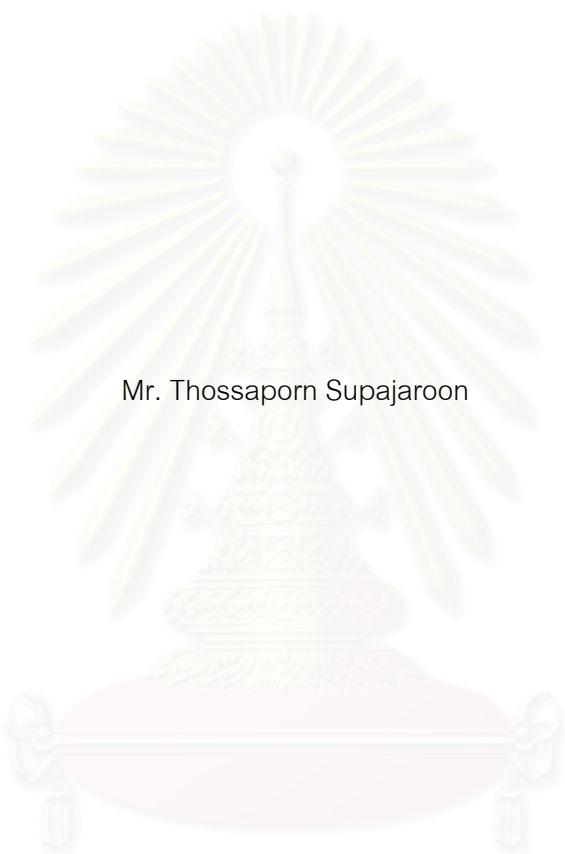
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNERGISTIC SEPARATION OF YTTRIUM ION FROM RARE EARTH VIA A HOLLOW FIBER
SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



Mr. Thossaporn Supajaron

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007


Copyright of Chulalongkorn University


หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดเสริมฤทธิ์แยกไอออนอิตเทรียมจากธาตุหายากด้วยเยื่อแผ่น เหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
โดย	นายทศพร สุภาจรูญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนირ์ญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ประกร รามกุล)

นายทศพร สุภาจรรย์ : การสกัดเสริมฤทธิ์แยกไอออนอิตเทรียมจากธาตุหายากด้วยเยื่อ
 แผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. (SYNERGISTIC SEPARATION OF YTTRIUM ION
 FROM RARE EARTH VIA A HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE)
 อ. ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ , 116 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการสกัดไอออนอิตเทรียมออกจากสารละลายผสม
 ของไอออนธาตุหายากชนิดอื่นในอนุกรมแลนทาไนด์ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
 ได้แก่ 1) ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิดคือ TBP, D2EHPA และ Cyanex 272 2) ความ
 เข้มข้นของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 และสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272
 ในตัวทำละลายเคโรซีน 3) ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก 4) การสกัดระบบสอง
 หอสกัด 5) การเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงของสารสกัดและสารละลายนำกลับ
 กรดไนตริก ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนความเข้มข้นสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่
 สกัดไอออนอิตเทรียมได้ผลดีที่สุด คือ 0.2: 0.4 โมลต่อลิตร การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย
 นำกลับกรดไนตริกสามารถนำกลับไอออนของธาตุหายากได้มากขึ้น การใช้สารสกัดผสม TBP
 และ Cyanex 272 ให้ผลการสกัดที่ดีกว่าการใช้สารสกัด TBP หรือ Cyanex 272 ชนิดเดียว แสดง
 ถึงผลการสกัดเป็นแบบเสริมฤทธิ์ ผลการทดลองระบบสองหอสกัดพบว่าสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์
 ไอออนอิตเทรียมได้เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการสกัดและนำกลับในการผ่านโมดูลเส้นใย
 กลวงเป็น 3 รอบ ภายใต้ภาวะที่เหมาะสม สามารถเพิ่มร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออน
 อิตเทรียมได้ มีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นปะปนออกมาปริมาณน้อย

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต..... กฤษณะ วัฒนวิทย์

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

ปีการศึกษา 2550

4970332821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING



KEY WORD: YTTRIUM / LIQUID MEMBRANE / HOLLOW FIBER / SYNERGISTIC

THOSSAPORN SUPAJAROON : SYNERGISTIC SEPARATION OF YTTRIUM ION
FROM RARE EARTH VIA A HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE.

THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc., 116 pp.

The separation of yttrium ion from mixture of rare earth in nitrate media by hollow fiber supported liquid membrane has been investigated. The effect of 1) The system used single extractant Cyanex 272, TBP and D2EHPA, 2) The synergistic effects of Cyanex 272 mixed with TBP and Cyanex 272 mixed with D2EHPA in kerosene 3) The concentration of nitric acid was used as a stripping solution 4) The double column system 5) The number of runs in the hollow fiber module were examined. The results show that the maximum percentage of extraction and stripping were obtained when used the mixture of Cyanex 272 and TBP in ratio 0.4: 0.2 molar. When nitric acid concentration is increased, the percentage of stripping is enhanced. Synergistic extraction of yttrium ion with Cyanex 272 in kerosene has been found when TBP added. The mixture system exhibits much stronger extractability than Cyanex 272 or TBP system alone because of its high synergistic effect. It was found that the yttrium ion could be more purified by using the double column extraction system. In addition, the yttrium ion could be more extracted and stripped when operating with 3 modules under optimum operating conditions. There are little other ions contaminate.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department....Chemical Engineering..... Student's signature..... .....
Field of study..Chemical Engineering..... Advisor's signature..... .....
Academic year 2007.....

กิตติกรรมประกาศ

ในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์มีอุปสรรคและปัญหามากมายที่ต้องฝ่าฟันและแก้ไข แต่ในที่สุดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็สำเร็จลุล่วงลง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาที่อบรมสั่งสอนและคอยให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐชนัน ธิพิพัฒน์ไพบูลย์ ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางเคมี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่เคารพนับถือขณะที่ข้าพเจ้า ศึกษาอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ดร. ประกร รามกุล ที่ให้คำแนะนำทำให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ คุณกัลยา ช่างเครื่อง ที่ช่วยเหลือในเรื่องเครื่องมือวิเคราะห์และสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งเพื่อน ๆ จากห้องวิจัย Mass Separation และอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ความสำเร็จของข้าพเจ้าจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลยหากขาด คุณพ่อและคุณแม่ ขอขอบพระคุณที่ได้ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนการศึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	1
1.2 การนำธาตุหายากไปใช้ประโยชน์.....	3
1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา	7
1.4 วัตถุประสงค์	11
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	11
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	12
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	13
2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว	13
2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process) ...	14
2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)	16
2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นแบน (Flat Sheet Supported Liquid Membrane).....	16
2.1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Spiral-type Supported Liquid Membrane)	16
2.1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane).....	17

2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane).....	19
2.2 กลไกการถ่ายเทมวล.....	22
2.2.1 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (Counter-Transport Mass Transfer).....	23
2.2.2 การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport Mass Transfer) ...	24
2.3 ชนิดของสารสกัด.....	25
2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)	26
2.3.2 สารสกัดชนิดด่าง (Basic Extractant)	27
2.3.3 สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral Extractant)	28
2.4 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction).....	28
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีทดลอง.....	33
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	33
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	34
3.3 วิธีการทดลอง	36
3.3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TBP ต่อการสกัดไอออนิตเทรียม	36
3.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดไอออนิตเทรียม	37
3.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ต่อการสกัดไอออนิตเทรียม	38
3.3.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP ต่อการสกัดไอออนิตเทรียม.....	38
3.3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสม Cyanex 272 และ D2EHPA ต่อการสกัดไอออนิตเทรียม.....	39
3.3.6 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก ต่อการนำกลับไอออนิตเทรียม.....	40

3.3.7 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบสองหอสกัด	
ต่อการสกัดไอออนิตเตรียม	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	43
4.1 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TBP	
ต่อการสกัดไอออนิตเตรียม	48
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA	
ต่อการสกัดไอออนิตเตรียม	50
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272	
ต่อการสกัดไอออนิตเตรียม	51
4.4 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่าง TBP	
และ Cyanex 272 ต่อการสกัดไอออนิตเตรียม	56
4.5 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่าง D2EHPA	
และ Cyanex 272 ต่อการสกัดไอออนิตเตรียม	57
4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก	
ต่อการนำกลับไอออนิตเตรียม	59
4.6.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก	
เมื่อใช้สารสกัด TBP.....	59
4.6.2 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก	
เมื่อใช้สารสกัด D2EHPA	60
4.6.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก	
เมื่อใช้สารสกัด Cyanex 272	62
4.6.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก	
เมื่อใช้สารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272.....	65
4.6.5 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก	
เมื่อใช้สารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272	68

4.7 ภาวะที่เหมาะสมของระบบสองหอสกัดในการสกัดไอออนิตเตรียม	70
4.8 ผลของการเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงของสารละลาย ป้อนและสารละลายนำกลับในโมดูลต่อการสกัดและนำกลับไอออน ิตเตรียม	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	80
รายการอ้างอิง	82
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก (ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ)	87
ภาคผนวก ข (ตัวอย่างการคำนวณ)	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	116

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ราคาธาตุหายาก.....7
2.1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ22
3.1	รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง33
3.3	รายละเอียดของสมบัติต่าง ๆ ของชุดเส้นใยกลวง35
5.1	ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก.....79
5.2	ความเข้มข้นของธาตุหายากหลังการนำกลับในรอบที่ 3 หอสกัดที่ 1.....79
5.3	ความเข้มข้นของธาตุหายากหลังการนำกลับในรอบที่ 3 หอสกัดที่ 2.....80
ก.1	ข้อมูลความเข้มข้นสารตั้งต้นในรูปสารละลายแอร์เจิร์ทไนเทรต87
ก.2	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนธาตุของหายากด้วยสารสกัด TBP ช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร.....88
ก.2-1	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร89
ก.2-2	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร90
ก.3	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยสารสกัด D2EHPA ช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร.....91
ก.3-1	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร92
ก.3-2	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร93
ก.4	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยสารสกัด Cyanex 272 ช่วงความเข้มข้น 0.2-1.0 โมลต่อลิตร.....94
ก.4-1	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร95
ก.4-2	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร96
ก.5	ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยสารสกัดผสม TBP และ

Cyanex 272 ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ	97
ก.5-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร	98
ก.5-2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร	99
ก.6 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ	100
ก.6-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร	101
ก.6-2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร	102
ก.7 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากในระบบสองหอสกัดของหอสกัดที่ 2 ด้วยสารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร.....	103
ก.7-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลาย นำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.6-1.2 โมลต่อลิตร	104
ก.8 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 1 แบบวนรอบจำนวน 3 รอบ ด้วยสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272.....	105
ก.8-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 1 แบบวนรอบ จำนวน 3 รอบ ด้วยสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร.....	106
ก.9 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 2 แบบวนรอบจำนวน 3 รอบ ด้วยสารสกัด D2EHPA	107
ก.9-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 2 แบบวนรอบ จำนวน 3 รอบ ด้วยสารละลายนำกลับกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 1.2 โมลต่อลิตร.....	108

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ 14
2.2	วิธีการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน 15
2.3	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นแบน 16
2.4	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน 17
2.5	เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 18
2.6	ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลาย นำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 18
2.7	ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต 19
2.8	แผนผังทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมของ การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง 24
2.9	แผนผังทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมของ การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน 25
3.1	อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel [®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง 34
3.2	ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง Celgard [®] X-30 240 Microporous Polypropylene Hollow Fiber 35
3.3	การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One-through Mode) 37
3.4	การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One-through Mode) ระบบสองหอสกัด 41
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้น ของสารสกัด TBP ในช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร 48
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารสกัด TBP ในช่วง 0.1-0.5 โมลต่อลิตร กับอัตราการถ่ายเทมวลในการสกัดไอออนของธาตุหายาก 49
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้น ของสารสกัด D2EHPA ในช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร 50

4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA ในช่วง 0.1-0.5 โมลต่อลิตร กับอัตราการถ่ายเทมวลในการสกัดไอออนของธาตุหายาก.....	51
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ในช่วงความเข้มข้น 0.2-1.0 โมลต่อลิตร.....	52
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272 ในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร กับอัตราการถ่ายเทมวลในการสกัดไอออนของธาตุหายาก.....	52
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	56
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนธาตุอิตเทรียมกับความเข้มข้นของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	58
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด TBP ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร.....	59
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด TBP ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร.....	60
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร.....	61
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร.....	61
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร.....	62
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร.....	63
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนอิตเทรียมกับความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร.....	63

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิตเทรียม
กับเวลาในการนำกลับของสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร
และความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร64

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิตเทรียมกับความเข้มข้นของ
สารละลายนำกลับกรดไนตริกต่างๆ โดยใช้สารสกัด Cyanex 272 ความเข้มข้น
0.4 โมลต่อลิตร.....65

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้น
ของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ และความเข้มข้น
สารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร.....66

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนธาตุหายากกับความเข้มข้น
ของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ และความเข้มข้น
สารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร.....66

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิตเทรียมกับความเข้มข้น
สารละลายนำกลับกรดไนตริกต่างๆ โดยใช้สารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272
ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.2: 0.4 โมลต่อลิตร.....67

4.21 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิตเทรียมเมื่อใช้สารสกัด TBP
ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร หรือ Cyanex 272 ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร
ชนิดเดียว กับการใช้สารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนความเข้มข้น
0.2: 0.4 โมลต่อลิตร.....67

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้น
ของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ และความเข้มข้น
สารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร.....69

4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้น
ของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ และความเข้มข้น
สารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร.....69

4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 2
โดยสารสกัดที่ใช้คือ D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร71

4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.6-1.2 โมลต่อลิตร	71
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับจำนวนรอบการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงของสารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร	73
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร	73
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร	74
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 1.2 โมลต่อลิตร	74
ข-1	ค่าคงที่สมดุลของสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร	111
ข-2	ค่าคงที่สมดุลของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ...	113

บทที่ 1

บทนำ

1. 1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

กลุ่มธาตุแรร์เอิร์ทหรือธาตุหายาก คือ กลุ่มธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ (Lanthanide Series) ประกอบด้วยธาตุที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 57 ถึง 71 จำนวน 15 ธาตุ และรวมทั้งอิตเทรียมที่มีเลขอะตอม 39 ในธรรมชาติธาตุหายากจะเกิดรวมกันและสามารถแยกออกมาในรูปของออกไซด์ แต่เนื่องจากธาตุหายากมีโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีที่คล้ายคลึงกันมาก ทำให้ในการแปรสภาพแร่เพื่อแยกธาตุหายากเฉพาะตัวให้มีความบริสุทธิ์ทำได้ยาก

แร่โมนาไซต์เป็นแร่กัมมันตรังสีชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วย ธาตุทอเรียม ยูเรเนียม และธาตุหายากอื่น ได้แก่ ธาตุแลนทานัม (La) ธาตุซีเรียม (Ce) ธาตุเพรซีโอดีเมียม (Pr) ธาตุนีโอดีเมียม (Nd) ธาตุซาแมเรียม (Sm) ธาตุยูโรเพียม (Eu) ธาตุแกโดลิเนียม (Gd) ธาตุดิสโพรเซียม (Dy) ธาตุอิตเทอร์เบียม (Yb) และธาตุอิตเทรียม (Y) สามารถแบ่งธาตุหายากออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ธาตุหายากกลุ่มเบาประกอบด้วย ธาตุแลนทานัม ธาตุซีเรียม ธาตุเพรซีโอดีเมียม ธาตุนีโอดีเมียม ธาตุซาแมเรียม และธาตุยูโรเพียม ซึ่งปริมาณรวมทั้งหมดประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์
2. ธาตุหายากกลุ่มหนักประกอบด้วย ธาตุแกโดลิเนียม ธาตุดิสโพรเซียม ธาตุอิตเทอร์เบียม และธาตุอิตเทรียม ซึ่งมีปริมาณรวมทั้งหมดประมาณได้เท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณรวมธาตุหายากกลุ่มหนักจะมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับธาตุหายากกลุ่มเบา

จากการสำรวจพบว่ามีการใช้ธาตุหายากทั่วโลกประมาณ ปีละ 95,000 ตัน ในปี 2005 และคาดการณ์ว่าจะเพิ่มเป็น 150,000 ตัน ในปี 2008 โดยการใช้ประโยชน์ธาตุหายาก แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การใช้ธาตุหายากรวมๆ กันทั้งโดยองค์ประกอบที่มีอยู่แล้ว ตามธรรมชาติ หรือให้มีธาตุใดธาตุหนึ่งมากขึ้นเป็นพิเศษ (Enrichment) และในอีกลักษณะหนึ่งใช้เป็นธาตุหายากเฉพาะตัว (Individual Rare Earths) ที่มีความบริสุทธิ์สูงในหลายระดับตามแต่ความต้องการ การใช้ประโยชน์ ลักษณะแรกคิดเป็นร้อยละ 95 โดยปริมาณ แต่เมื่อคิดเป็นมูลค่าแล้วการใช้ประโยชน์ในทั้งสองลักษณะมีมูลค่าเท่าๆกัน ประเทศที่ใช้ธาตุหายากในปริมาณสูง ได้แก่ สหรัฐอเมริกา ยุโรป ญี่ปุ่น จีน และรัสเซีย ตามลำดับ ในการจำแนกการใช้ประโยชน์ธาตุหายากจะพบว่ามีการใช้

งานเป็นปริมาณมากในอุตสาหกรรมเคมี-ตัวเร่งปฏิกิริยา อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ตามลำดับ แต่เมื่อจำแนกตามมูลค่าแล้วพบว่ามีการใช้ประโยชน์ใน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มีมูลค่าสูงสุด ตามด้วยอุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมผลิตแม่เหล็กถาวร อุตสาหกรรมโลหะ และอุตสาหกรรมเคมี-ตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ

การแยกธาตุหายากที่มีการทำอยู่ในปัจจุบัน คือ วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ซึ่งผลการแยกยังให้ผลไม่ดีนัก เพราะธาตุหายากแต่ละตัวมีสมบัติคล้ายคลึงกันการแยกจะออกมาปนกัน มีกำลังผลิตต่ำ วิธีการบวกรสกัดด้วยของเหลว (Solvent Extraction) ถึงแม้วิธีนี้จะเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการปฏิบัติและมีกำลังผลิตสูงซึ่งเหมาะในการใช้ในภาคอุตสาหกรรมก็ตาม แต่กระบวนการนี้ก็มีข้อจำกัด คือ กระบวนการมีหลายขั้นตอน มีค่าในการเลือกสกัดที่จำกัด และอัตราเร็วในการสกัดช้ามาก ทำให้ต้องใช้สารสกัดและพื้นที่ในการถ่ายเทมวลมากอีกทั้งยังใช้สารเคมีและพลังงานในปริมาณสูงเพื่อที่จะปฏิบัติการให้มีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการสกัดไอออนิตเรียมออกจากสารละลายผสมไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นในอนุกรมแลนทาไนด์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เนื่องจากเป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยมีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ และมีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับธาตุหายากชนิดอื่น ในแร่โมนาไซต์ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ซึ่งในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายทำการสกัดได้ยากเนื่องจากกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายต้องใช้สารตั้งต้นที่มีปริมาณมาก ๆ จึงจะทำให้การสกัดได้ผลที่ดีและการสกัดด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายต้องใช้ขั้นตอนในการสกัดหลายขั้นตอน ทำให้สิ้นเปลืองสารสกัดและพลังงานเป็นจำนวนมาก เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการสกัด เนื่องจากมีข้อดีคือ มีความสามารถในการคัดเลือกสูง มีอัตราการถ่ายเทมวลสูง และใช้สารสกัดปริมาณน้อยสามารถลดค่าใช้จ่ายได้เมื่อใช้กับสารสกัดที่มีราคาแพง (Prakorn, 2544; Sheng et al., 2004) ในงานวิจัยนี้ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่าเยื่อแผ่นเหลวรูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูงและสามารถฟื้นฟูสภาพเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ ด้วยข้อดีหลายประการของเทคนิคนี้ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถแยกไอออนิตเรียมออกจากสารละลายผสมไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสามารถลดขั้นตอนในการสกัดให้น้อยลง เพราะสามารถรวมขั้นตอนการสกัดและนำกลับไว้ในขั้นตอนเดียวกันได้ ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง คือ แร่โมนาไซต์ที่ทำการย่อยแร่สกัดธาตุยูเรเนียมและทอเรียมออกไปแล้ว นำมาละลายด้วยสารละลายกรดไนตริกอยู่ในรูปของสารละลายแอร์เรทโทมาทำ

การทดลองซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งศึกษากระบวนการสกัดไอออนของธาตุหายากจากการเตรียมสารตั้งต้นโดยการสังเคราะห์ ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ทราบว่ากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้กับสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริงจะให้ผลที่มีประสิทธิภาพดี เช่นเดียวกับการใช้สารตั้งต้นที่ทำการเตรียมขึ้นจากการสังเคราะห์หรือไม่ เพื่อที่จะสามารถพัฒนาให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการสกัดได้ นอกจากนี้ยังนำวิธีการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ คือการใช้สารสกัดสองชนิดผสมกันและการสกัดระบบสองหอสกัดมาทำการศึกษาด้วยเพื่อที่จะสามารถสกัดไอออนชนิดเตรียมได้ปริมาณและความบริสุทธิ์มากขึ้น

1.2 การนำธาตุหายากไปใช้ประโยชน์

1. ธาตุอิตเทรียม

ธาตุอิตเทรียมใช้ในการผลิตสารฟอสเฟอร์ชนิดเปล่งแสงสีแดง สำหรับผลิตหลอดภาพโทรทัศน์และจอ LCD (Liquid-Crystal Displays) คอมพิวเตอร์ ใช้อิตเทรียมเป็นส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาคัดขั้วของเสียจากการเผาไหม้ของน้ำมันรถยนต์ (Catalytic Converter) ซึ่งตามปกติจะต้องใช้ธาตุถึง 3 ชนิดคือ แพลทินัม โรเดียมและแพลเลเดียมผสมกัน ซึ่งมีราคาแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแพลทินัม การใช้ธาตุอิตเทรียมมาผสมช่วยให้สามารถใช้แพลเลเดียมเพียงธาตุเดียวได้ ซึ่งมีราคาถูกกว่าเป็นผลให้ค่าใช้จ่ายลดลงร้อยละ 30-50 ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในการผลิตพอลิเอทิลีน และที่สำคัญอิตเทรียมเป็นอีกธาตุหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาเป็นส่วนผสมในการผลิตสารตัวนำยิ่งยวด (Superconductors) ซึ่งเป็นออกไซด์ผสมของอิตเทรียม แบเรียมและทองแดง นำไปสู่การประดิษฐ์เครื่องจักรที่มีความสำคัญอีกมากมาย โดยพบว่าจะมีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิ 90-100 เคลวิน ซึ่งอุณหภูมิมิระดับนี้ใช้ในไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็นแทนฮีเลียมที่มีราคาสูงกว่าได้ นอกจากนี้ยังใช้ในการทำอุปกรณ์นำร่องในการลงจอดของอากาศยาน ใช้ในด้านพลังงานนิวเคลียร์โดยนำไปสร้างเป็นแท่งควบคุมเพื่อควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์และใช้ในอุตสาหกรรมโลหะต่างๆ

2. ธาตุแลนทานัม

ธาตุแลนทานัมใช้ในการผลิตพลังงานสำหรับอนาคตคือพลังงานไฮโดรเจนนับเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูงเพราะมีอยู่ทั่วไปและเมื่อเผาไหม้ก็ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ แต่อุปสรรคสำคัญ

อยู่ที่การเก็บกักไฮโดรเจนมีปัญหาทั้งอันตรายจากความดันสูงและการติดไฟได้ง่ายจนอาจเกิดการระเบิดแต่จากการพัฒนาโลหะผสมแลนทานัม - นิกเกิลอัลลอย (LaNi₅) สามารถดูดซับไฮโดรเจนปริมาณมากๆ ได้และยังคายไฮโดรเจนอัตราที่สูงมากในภาวะอุณหภูมิและความดันที่ไม่สูงมากทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกักเก็บไฮโดรเจนได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะต้องทำที่ความดันสูงๆ ทำให้เกิดอันตรายนับเป็นความหวังทางด้านพลังงานบริสุทธิ์และออกไซด์ร้อยละ 5-40 ของธาตุแลนทานัมผสมในแก้วทัศนศาสตร์ทำให้แก้วมีดัชนีหักเหสูงและทำให้แสงผ่านได้มากถึงร้อยละ 99 เทียบกับแก้วทั่วไปแสงจะผ่านได้ประมาณร้อยละ 85-90 ซึ่งตรงนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เช่น ทำเลนส์ ปริซึมและใยแก้วนำแสง

3. ธาตุซีเรียม

ธาตุซีเรียมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้ซีเรียมเป็นสารกันหรือคแทนสารตะกั่วได้ดีและช่วยลดมลพิษ ใช้ซีเรียมออกไซด์ผสมในแก้วสำหรับผลิตจอโทรทัศน์สีเพื่อป้องกันมิให้จอเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเนื่องจากถูกอิเล็กตรอน ผงซีเรียมออกไซด์ (CeO₂) ใช้สำหรับขัดเลนส์โดยไม่เกิดรอยขีดข่วน โลหะซีเรียมมักใช้ในรูปของโลหะผสมหรือโลหะเจือ โลหะผสมของซีเรียมกับเหล็ก (Ferro-Cerium Alloy) ใช้เป็นแคตตาลิสต์ในการถลุง (Refining Agent) หรือการผลิตโลหะบางชนิด เช่น โลหะผสมระหว่างอลูมิเนียมและซีเรียมนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์และอากาศยาน

4. ธาตุนีโอไดเมียม

ธาตุนีโอไดเมียมใช้ในการผลิตโลหะ Gal Fan ซึ่งเป็นโลหะผสมของสังกะสีกับนีโอไดเมียมจะเป็นวัสดุทนการกัดกร่อนสำหรับเคลือบผิว เช่น ลวด เหล็กแผ่น แผ่นเหล็กชุบสังกะสี ธาตุนีโอไดเมียมที่ผสมเหล็กจะมีสภาพเป็นแม่เหล็กถาวรและมีค่าความเป็นแม่เหล็กสูงถึง 10 เท่า เมื่อเทียบกับแม่เหล็กขนาดเท่าๆกันทำให้อุปกรณ์ที่ต้องใช้แม่เหล็กมีขนาดเล็กลงได้มาก นอกจากนี้ด้านอาวุธสงครามก็ใช้ผลิตมอเตอร์ควบคุมทิศทางหัวรบจรวดนำวิถี ใช้เป็นส่วนประกอบอุปกรณ์เกี่ยวกับคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ ในด้านการแพทย์มีตัวอย่างให้เห็นชัดเจนก็คือ อุปกรณ์วินิจฉัยโรค Magnetic Resonance Imaging (MRI) การเปลี่ยนจาก Super Conducting Magnet มาใช้เป็นแม่เหล็กถาวรที่ผสมกันระหว่าง นีโอไดเมียม เหล็กและโบรอน ระบบจะไม่ซับซ้อนและประหยัดพลังงานกระแสไฟฟ้ามากขึ้นและนีโอไดเมียมยังใช้เป็นวัสดุต้นกำเนิด แสงเลเซอร์

5. ธาตุเพอร์ซีโอติเมียม

ธาตุเพอร์ซีโอติเมียมใช้ร่วมกับธาตุอื่นๆ เช่น ไทเทเนียม แมงกานีส สำหรับเคลือบเลนส์ทำให้ค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) ของเลนส์สูงขึ้นซึ่งจะช่วยลดการสะท้อนแสงของเลนส์ได้เกือบทั้งหมดทีเดียว นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตโลหะ เช่น ช่วยทำให้สมบัติการตีเป็นแผ่นบาง ๆ ของเหล็กดีขึ้นและเพิ่มความแข็งแรงของการใช้งาน ณ อุณหภูมิสูง

6. ธาตุซาแมเรียม

ธาตุซาแมเรียมเป็นธาตุที่ยังมีการใช้ประโยชน์ไม่มากนักแต่ก็มีการใช้บ้าง เช่น ใช้เป็นตัวกรองแสงของกระจก เนื่องจากโลหะนี้มีค่าการดูดซับนิวตรอนสูงมากจึงใช้ทำแท่งควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ แม่เหล็กที่ผลิตขึ้นมาจากซาแมเรียม อิตเทรียมและโคบอลต์ ที่มีผลกระทบบานาโนให้สมบัติทางแม่เหล็กที่ดียเยี่ยมเพราะพื้นที่ผิวที่มีมากมายมหาศาล แม่เหล็กกำลังสูงนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเรือดำน้ำ ตัวกำเนิดไฟฟ้าสลับในรถยนต์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าภาคพื้นดิน มอเตอร์สำหรับเรือ เครื่องมือวิเคราะห์ความไวสูง และเครื่องฉายภาพคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ (Magnetic Resonance Imaging)

7. ธาตุยูโรเพียม

ธาตุยูโรเพียมเป็นโลหะที่หายากและมีราคาแพงมาก การใช้ประโยชน์จึงมีขีดจำกัดอย่างไรก็ตามธาตุยูโรเพียมมีค่าการดูดซับนิวตรอนสูงมากจึงใช้ทำเป็นแท่งควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การใช้ประโยชน์อื่น ๆ เช่น ใช้ทำฟอสเฟอร์สีแดงสำหรับโทรทัศน์

8. ธาตุแกโดลิเนียม

ธาตุแกโดลิเนียมสามารถทำเป็นแม่เหล็กถาวรที่ใช้ในเครื่อง MRI (Magnetic Resonance Imaging) และใช้ในการผลิตวัสดุที่อยู่ในหลอดภาพสำหรับจอทีวีและจอคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ผลึก Gallium-Gadolinium-Garnet ใช้ทำ Bubble Memory Film ใช้ในระบบโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ฟิล์มชนิดนี้สามารถเก็บข้อมูลด้วยความเร็วสูงกว่าแถบแม่เหล็ก (Magnetic Tape) และจานแม่เหล็ก (Magnetic Disc) ประมาณ 10 เท่าตัว แต่ใช้พลังงานน้อยกว่านอกจากนี้ข้อมูลที่เก็บไว้จะไม่ถูกลบออกเมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าดับ

9. ธาตุดีสโพรเซียม

ธาตุดีสโพรเซียมใช้ประโยชน์ไม่มากนักแต่เนื่องจากโลหะนี้มีค่าการดูดซับนิวตรอนค่อนข้างสูงจึงมีการใช้เป็นตัวยับยั้งในเชื้อเพลิงนิวเคลียร์และทำเป็นแผ่นโลหะบางๆ เพื่อวัด Neutron Flux นอกจากนี้แล้วยังใช้เป็น Fluorescence Activator ในฟอสเฟอร์บางชนิด

10. ธาตุอิตเทอร์เบียม

ธาตุอิตเทอร์เบียมใช้ประโยชน์เป็นแหล่งเลเซอร์ เมื่อนำมาผสมในเหล็กสามารถเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติทางกลอื่นๆ ได้ ใช้ทำอุปกรณ์ในการทำฟัน และใช้เป็นแหล่งรังสีเอ็กซ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 1.1 ราคาธาตุหายาก (บริษัท Hefa Rare Earth จำกัด ประเทศแคนาดา, 2008)

Rare Earth Oxide	ความบริสุทธิ์ (%)	ราคา (US\$ / 100 g)	ราคา (บาท / 100 g)
Yttrium Oxide	99.99	175	5,540.50
Lanthanum Oxide	99.8	70	2,216.20
Cerium Oxide	99.5	65	2,057.90
Praseodymium Oxide	99.995	105	3,324.30
Neodymium Oxide	99.5	110	3,482.60
Samarium Oxide	99.9	75	2,374.50
Europium Oxide	99.999	195	6,173.70
Gadolinium Oxide	99.99	85	2,691.10
Dysprosium Oxide	99.95	95	3,007.70
Ytterbium Oxide	99.99	205	6,490.30

1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา

Sayed et al (1996) ศึกษาการสกัดไอออนของธาตุหายาก La, Nd, Tm, Lu และ Y ที่ละลายในสารละลายไนเตรต (0.6 M HNO₃ + 11.6 g/L CaO) ด้วยวิธีการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ โดยใช้สารสกัดผสม Thenoyltrifluoroacetone (HTTA) และ Trioctylamine (TOA) ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองชนิด ชนิดของตัวทำละลาย ชนิดของสารประกอบเชิงซ้อน และผลของไอออนแคลเซียมที่เติมต่อประสิทธิภาพในการสกัดจากการทดลองพบว่าการเติมสารสกัด TOA จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดได้ดีขึ้นกว่าการใช้สารสกัด HTTA ชนิดเดียว โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 0.01 M และ 1 เปอร์เซ็นต์ TOA ละลายในเบนซีน จะทำให้สามารถเลือกสกัดไอออนของธาตุหายากออกจากกันได้มากที่สุด นอกจากนี้เมื่อเติมไอออนแคลเซียมลงในสารละลายให้มีความเข้มข้น 8.3 กรัมต่อลิตร สามารถสกัดไอออนของธาตุหายากที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้มากกว่าไอออนของธาตุหายากที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

Qiong Jia et al. (2003) ศึกษาการสกัดไอออนแลนทานัม (ประจุ 3+) ในสารละลายคลอไรด์ ด้วยวิธีการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ โดยใช้สารสกัดผสม 1-Phenyl-3-Methyl-4-Benzoyl-Pyrazalone-5 (HPMBP) และ Triisobutylphosphine Sulphide (TIBPS, B) ไอออนแลนทานัมที่

ถูกสกัด ด้วยสารสกัดผสม HPMBP และ TIBPS, B จะอยู่ในรูปของ $\text{LaCl}_2 \cdot \text{PMBP} \cdot \text{B}_{0.5}$ ส่วนการสกัดด้วย HPMBP ชนิดเดียว ไอออนแลนทานัมจะอยู่ในรูป $\text{La}(\text{PMBP})_3 \cdot (\text{HPMBP})$ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าคงที่สมดุลและ Thermodynamic Functions เช่น ΔG , ΔH และ ΔS นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ไอออนของธาตุหายากตัวอื่น คือ Ce^{3+} , Pr^{3+} , Nd^{3+} , Sm^{3+} , Gd^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} , Yb^{3+} และ Y^{3+} จากผลการทดลองพบว่าสามารถสังเกตการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ($S > 1$) ได้จาก Pr^{3+} , La^{3+} และ Ce^{3+} ส่วนไอออนตัวอื่นๆจะไม่พบการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ($S < 1$) ดังนั้นจึงสามารถสกัด Pr^{3+} , La^{3+} และ Ce^{3+} ออกจากไอออนตัวอื่นๆ ได้ด้วยการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วย HPMBP ชนิดเดียว พบว่าความเข้มข้นไอออนของธาตุหายากที่สกัดได้จะมีค่าที่มากกว่าการใช้สารสกัดผสมกัน

M. Atanassova et al. (2006) ศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์แยกไอออนของธาตุหายาก ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยการใส่สารสกัดผสม HTTA และ PAN และสารสกัดผสม HP และ PAN ในตัวทำละลายเบนซีน ทำการศึกษาค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในสารละลายป้อน ค่าความเข้มข้นสารสกัด HP หรือ HTTA เมื่อความเข้มข้นสารสกัด PAN คงที่ และ ค่าความเข้มข้นสารสกัด PAN เมื่อค่าความเข้มข้นของ HP หรือ HTTA คงที่ ผลที่ได้คือ การใช้สารสกัด PAN ผสมกับสารสกัด HP หรือ HTTA จะสามารถสกัดไอออนของธาตุหายากได้ดีกว่าการใช้ HP หรือ HTTA ชนิดเดียว โดยเฉพาะสารสกัดผสม HTTA และ PAN จะให้ผลดีกว่า นอกจากนี้ยังเพิ่มค่าในการคัดเลือกสกัดได้ดีขึ้นอีกด้วย

Xiaobo Sun et al. (2006) ศึกษาการสกัดไอออนของธาตุหายากแบบเสริมฤทธิ์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดที่ใช้ คือ bis (2,4,4-trimethylpenyl) phosphinic acid (Cyanex272) และ sec-nonylphenoxy acetic acid (CA-100) ในตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทน ผลการทดลองระบบการใช้สารสกัดผสม Cyanex 272 และ CA-100 ให้ผลการสกัดที่ดีกว่าการใช้สารสกัด Cyanex 272 หรือ CA-100 ชนิดเดียว นอกจากนี้จะเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดแล้วยังพบว่าสามารถปรับปรุงค่าการคัดเลือกให้ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อัตราส่วนการผสมที่ให้ผลการสกัดดีที่สุดคือ 1:1 พิจารณาที่ไอออนนิตเตรียมพบว่าการใช้สารสกัด CA-100 ชนิดเดียว ในการสกัดไอออนนิตเตรียมออกจากไอออนของธาตุชนิดอื่นทำได้ยากมาก แต่การใช้สารสกัดผสม Cyanex 272 และ CA-100 สามารถเพิ่มศักยภาพในการสกัดไอออนนิตเตรียมออกจากไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นได้

Wei Li et al. (2007) ศึกษาการสกัดไอออนนิตเตรียมด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้สารสกัด คือ sec-octylphenoxy acetic acid (CA-12) สารปรับปรุง คือ tri-n-butyl phosphate (TBP) และ isooctanol ในตัวทำละลายโคเรซิน และใช้สารละลายไฮโดรคลอริกเป็น สารละลายนำกลับ ผลการทดลองระบบการใช้สารผสม CA-12 และ TBP โดยกระบวนการที่ใช้ แบ่งเป็น การสกัด 15 ขั้นตอน และการชะล้าง 10 ขั้นตอน สามารถทำการสกัดไอออนนิตเตรียมได้ ร้อยละ 85 ซึ่งได้ปริมาณที่มากกว่าการใช้สารสกัด CA-12 ชนิดเดียว ผลของการเติมสารสกัด TBP ลงไปพบว่า TBP ซึ่งเป็นสารสกัดที่มีคุณสมบัติเป็นเอสเทอร์ สามารถลดการเกิดอิมัลชันไฟเออร์ได้ เช่นเดียวกับสารไอโซออกทานอลซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแอลกอฮอล์ แต่พบว่า สารสกัด TBP ให้ผลที่ดีกว่า เนื่องจากสามารถลดการลดลงความเข้มข้นของสารสกัด CA-12 ได้มากกว่า

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลว

A. G. GAIKWAD (2003) ศึกษาการสกัดเสริมฤทธิ์แยกไอออนนิตเตรียมและการเคลื่อนที่ ไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับชนิดแผ่น โดยใช้สารสกัดผสม TBP ที่มีฤทธิ์เป็นกลาง และ Aliquat 336 ที่มีฤทธิ์เป็นเบสในตัวทำละลายโคเรซิน โดยทำการศึกษาตัวแปรดังนี้ ความเข้มข้นของ Ammonium Thiocyanate และไอออนนิตเตรียมในสารละลายป้อนความเข้มข้นของสารสกัด คือ TBP, Aliquat 336 และสารสกัดผสม TBP และ Aliquat 336 สารละลายนำกลับคือ EDTA ค่า pH ในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ และค่าความคงตัวของเยื่อแผ่นเหลว ผลที่ได้ คือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับและความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การ ซึมผ่านก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบระบบที่ใช้สารสกัด TBP หรือ Aliquat 336 ชนิดเดียว หรือใช้สารสกัดผสม TBP และ Aliquat 336 พบว่าค่าการซึมผ่านของระบบที่ใช้สารสกัด TBP ชนิดเดียวให้ผลที่ดีที่สุด

Ramakul P. et al. (2003) ศึกษาการแยกไอออนของธาตุแลนทานัมและไอออน นีโอติเมียมออกจากกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่ถูกพุงด้วยเส้นใยกลวง การวิจัยนั้นนอกจากจะ สามารถแยกไอออนแลนทานัมและไอออนนีโอติเมียมออกจากกันได้แล้ว ยังนำการสกัดแบบเสริม ฤทธิ์มาใช้ในกระบวนการอีกด้วย การทดลองใช้สารสกัดผสม HTTA และ TOA ละลายในเบนซีน ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของ สารสกัด HTTA และ TOA ความเข้มข้นของไอออนแลนทานัมและไอออนนีโอติเมียมในสารละลาย ป้อน และผลของการเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง ผลการศึกษาพบว่าความเป็น กรด-ด่างที่เหมาะสม มีค่า 2.5 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในขณะที่ความเข้มข้น

ของสารสกัด HTTA คงที่ พบว่าสามารถสกัดไอออนแลนทานัมและไอออนนีโอดีเมียมออกจากกันดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงสามารถสกัดไอออนทั้งสองเพิ่มขึ้นด้วย

Ramakul P. et al. (2004) ศึกษาการแยกไอออนทองแดงและโครเมียมจากสารละลายโลหะผสม (ทองแดง โครเมียม และสังกะสี) โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้ 2 คอลัมน์และดำเนินการเพียงรอบเดียว คอลัมน์แรกใช้สารสกัด LIX 84-I สำหรับการสกัดไอออนทองแดง โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายนำกลับ ส่วนคอลัมน์ที่สองใช้สารสกัด Aliquat 336 สำหรับการสกัดไอออนโครเมียม โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ และจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง จากผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ซึ่งสามารถทำการสกัดได้สูงสุดและในการดำเนินการภายใต้ภาวะที่เหมาะสมจะได้ค่าร้อยละของการสกัดไอออนทองแดงและโครเมียมเท่ากับ 33 และ 92 ตามลำดับ กล่าวได้ว่าการแยกไอออนโลหะเหล่านี้ในสารละลายเจือจางสามารถทำได้โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

Pancharoen U. et al. (2005) ศึกษาการแยกไอออนของธาตุแลนทานัมและไอออนซีเรียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ใช้สารสกัด TOA ดึงเอาไอออนซีเรียมออกมาทางสารละลายนำกลับและปล่อยไอออนของแลนทานัมไว้ในสารละลายป้อน การสกัดสามารถแยกไอออนซีเรียมออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ สารละลายป้อน คือ สารละลายของกรดซัลฟิวริก และสารละลายนำกลับ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอนเนต จากการทดลองจะได้ภาวะที่ดีที่สุด คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเป็น 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารสกัด TOA เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอนเนตเท่ากับ 1 โมลต่อลิตร สามารถสกัดไอออนซีเรียมได้ 67 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีไอออนแลนทานัมติดออกมาด้วย

Ramakul P. et al. (2005) ศึกษาการแยกไอออนของธาตุในอนุกรมแลนทานอนด์ชนิด Trivalent (ประจุ 2+) ออกจากชนิด Tetravalent (ประจุ 4+) โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง สารละลายป้อนประกอบด้วยไอออนซีเรียม (Ce (IV)) ซึ่งเป็นไอออนชนิด Tetravalent และไอออนของนีโอดีเมียม (Nd (III)) ซึ่งเป็นไอออนชนิด Trivalent ใช้ TOA เป็นสารสกัด และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอนเนตเป็นสารละลายนำกลับ จากการทดลองพบว่าสามารถแยกไอออน Tetravalent ได้ถึง 71 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ไอออน Trivalent ไม่ได้โดนแยกมาด้วยเลย

ภาวะที่ดีที่สุดคือ ความเข้มข้นสารสกัด TOA เท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร

1.4 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสกัดไอออนิตเตรียมออกจากสารละลายผสมไอออนธาตุนาฟทาเคนในอนุกรมแลนทาไนด์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
2. เพื่อศึกษาปัจจัย ที่มีผลต่อการสกัดไอออนิตเตรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการสกัดไอออนิตเตรียมแบบไหลสวนทางกัน โดยใช้สารสกัด TBP, D2EHPA และ Cyanex 272
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนิตเตรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ดังนี้
 - 2.1 ความเข้มข้นของสารสกัด TBP 0.1-0.5 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายเคโรซีน
 - 2.2 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.1-0.5 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายเคโรซีน
 - 2.3 ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 0.2-1.0 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายเคโรซีน
 - 2.4 อัตราส่วนความเข้มข้นของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 0.1: 0.4, 0.2: 0.4, 0.3: 0.4 และ 0.35: 0.4 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนความเข้มข้นของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 0.1: 0.4, 0.2: 0.4, 0.3: 0.4 และ 0.35: 0.4 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายเคโรซีน
 - 2.5 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกหรือสารละลายสตริบในช่วงความเข้มข้น 0.2-1.2 โมลต่อลิตร
3. ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดไอออนิตเตรียมทั้งระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด
4. ศึกษาผลของจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกรดไนตริก

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการสกัดและการนำกลับไอออนิตเทรียม การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ และทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับไอออนิตเทรียมและไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นในอนุกรมแลนทาไนด์
2. ศึกษาวิธีการทดลอง เตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง
3. ทดลองสกัดและนำกลับไอออนิตเทรียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารสกัดที่ใช้ คือ TBP, D2EHPA และ Cyanex 272 ในตัวทำละลายเคโรซีน
4. ศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ด้วยสารสกัดผสมชนิดต่างๆ
5. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารสกัดผสม ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก การสกัดระบบสองหอสกัด และจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกรดไนตริก วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

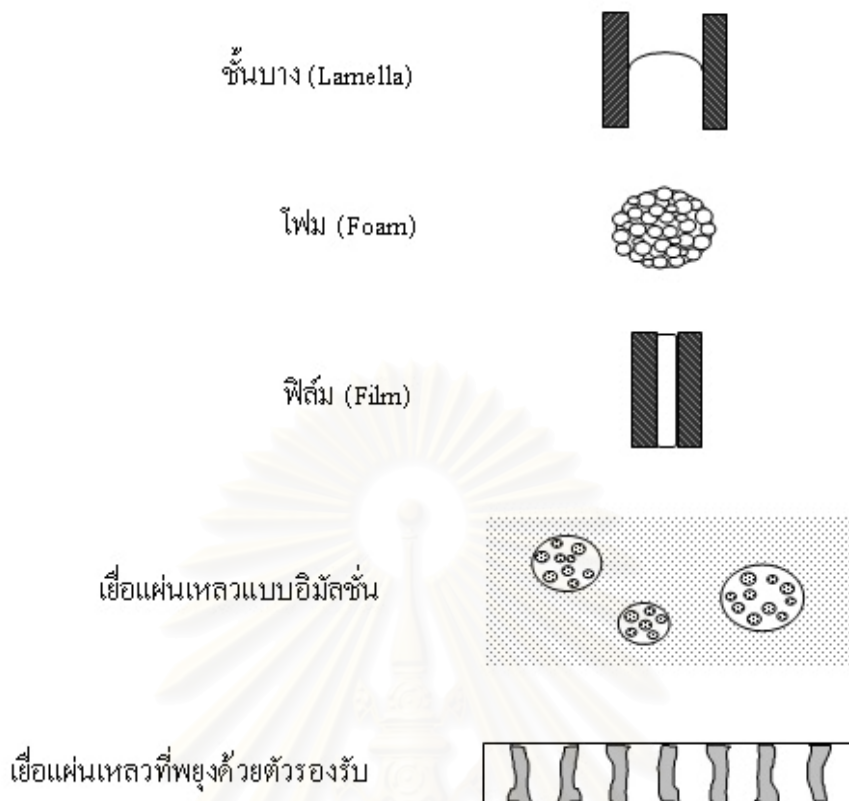
1. ทราบวิธีการและกลไกการสกัดไอออนิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
2. ทราบปัจจัยและภาวะที่เหมาะสมในการสกัดไอออนิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
3. ทราบผลของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction) ของสารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP และสารสกัดผสม Cyanex 272 และ D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน
4. ทราบผลของสารละลายนำกลับกรดไนตริกต่อการนำกลับไอออนิตเทรียม
5. ทราบผลของการสกัดของระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัดรวมทั้งผลของจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกรดไนตริก
5. ทราบว่ากระบวนการสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยเยื่อแผ่นเหลวจะมีประสิทธิภาพเพียงไรและสามารถพัฒนาให้ใช้ในอุตสาหกรรมได้หรือไม่ เพื่อที่จะได้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในกระบวนการสกัด

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ (1) ส่วนของสารละลายป้อน ซึ่งเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ ส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลาย (2) ส่วนเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยสารสกัดละลายในตัวทำละลาย ส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายของน้ำมัน (3) ส่วนของสารละลายนำกลับ ซึ่งจะทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกที่ถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาจากสารละลายป้อน ส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลายเช่นเดียวกับส่วนของสารละลายป้อนซึ่งส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมากระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวในรูปที่ละลายได้ไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน จะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับและแยกตัวออกมาละลายอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังนั้น จึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับได้ ฉะนั้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจึงต้องมีการสร้างเยื่อแผ่นเหลวมากระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวที่น่าจะเกิดขึ้นได้โดยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่ากรณีอื่น ๆ (Schultz, 1988)

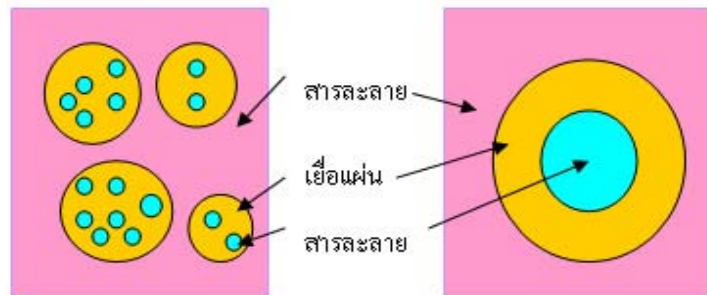
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ (Shultz, 1988)

2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน คือ การนำเอาระบบเยื่อแผ่นเหลวที่อธิบายในหัวข้อ 2.1 มาจัดเรียงให้อยู่รูปแบบหนึ่งซึ่งเราเรียกว่าแบบอิมัลชัน ในแบบนี้สารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายน้ำมัน อยู่ภายในซึ่งเป็นลักษณะวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (Dispersion Phase) ดังรูป 2.2 และจะเกิดกระบวนการถ่ายเทองค์ประกอบดังที่ได้อธิบายหัวข้อ 2.1 องค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยานั้นจะแพร่เข้าสู่สารละลายน้ำมันและไปอยู่ที่สารละลายนำกลับ ซึ่งสารละลายนำกลับนั้นจะอยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอีกที่ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 วิธีการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน

การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันสามารถเตรียมโดยนำสารละลายที่จะทำเป็นสารละลายนำกลับมาผสมกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งจะต้องไม่ละลายกันแล้วนำมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงเพื่อให้วัฏภาคสารละลายนำกลับมีขนาดเป็นเม็ดเล็กๆ อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวโดยทั่วไปเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ได้ จะมีความเสถียรต่ำจึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียร เมื่อเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเสร็จแล้วจึงนำเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันใส่ลงในสารละลายปั่น ซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่องทำให้เกิดการการเรียงวัฏภาคใหม่เป็น 3 ชั้น เรียงจากด้านในไปด้านนอกคือ สารละลายนำกลับ สารละลายเยื่อแผ่นเหลว และสารละลายปั่นตามลำดับ เรียกว่าอิมัลชันเชิงซ้อน (Double Emulsion) เมื่อเกิดการแยกแล้วองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะไปอยู่ในสารละลายนำกลับ แล้วจึงนำไปแยกสารละลายปั่น (ที่ถูกสกัดองค์ประกอบที่ต้องการออกไปแล้ว) ให้ออกจากเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันสุดท้าย จึงนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ผ่านการสกัดแล้วไปแยกวัฏภาคภายในออกได้เป็นสารละลาย ผลิตภัณฑ์ส่วนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวสามารถนำกลับไปใช้ได้อีก

ชนิดของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

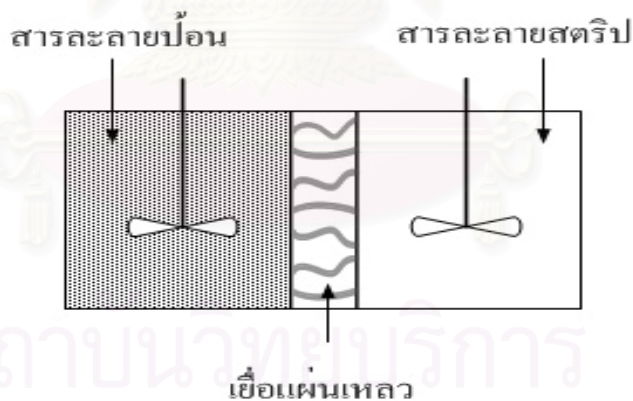
- (1) เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (Water in Oil (W/O) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ
- (2) เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (Oil in Water (O/W) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน

2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ จะใช้ตัวรองรับที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนเป็นตัวรองรับ โดยเยื่อแผ่นเหลวจะถูกตรึงไว้ในรูพรุนด้วยแรงคาปิลลารี (Marr et al., 1982; Schultz, 1988) ซึ่งตัวรองรับนั้นมีหลายแบบได้แก่ แบบแผ่นแบน (Flat Sheet) แบบแผ่นม้วน (Spiral - Wound) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวพองด้วยตัวรองรับคือ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและสารสกัดที่ใช้มีปริมาณน้อย แต่ก็มีข้อเสียอยู่บ้างคือ มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำและมีการการเสื่อมสภาพของเยื่อแผ่นเหลว (O'Hara, 1989; Shiau et al., 1993)

2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat Sheet Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนมีรูปแบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เยื่อแผ่นเหลวแบบนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายเทมวล เนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อย

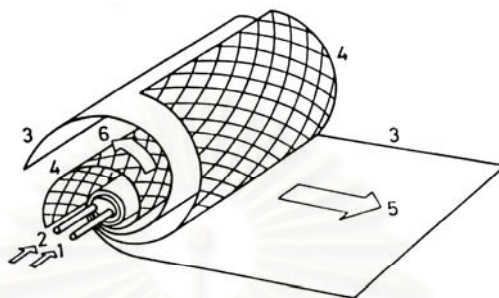


รูปที่ 2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Komasawa et al., 1983)

2.1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วน (Spiral-type Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วนแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 ตัวรองรับแบบแผ่นม้วนผลิตขึ้นโดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำและแผ่นตาข่าย (Mesh Spacer) พอลิเอสเทอร์ม้วนรอบท่อนำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของโมดูลจะถูก

ผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี (Epoxy) ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว (Raffinate) และสารละลายนำกลับที่ได้ (Strip) จะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของโมดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้คือ โมดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน

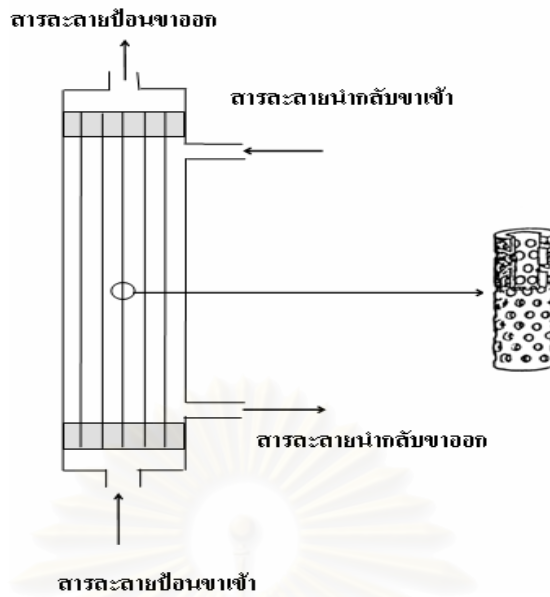


รูปที่ 2.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Teramoto et al., 1987)

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| หมายเลขที่ 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน | หมายเลขที่ 2 ทางเข้าของสารละลายนำกลับ |
| หมายเลขที่ 3 เยื่อแผ่นเหลว | หมายเลขที่ 4 แผ่นกั้น |
| หมายเลขที่ 5 สารละลายป้อน | หมายเลขที่ 6 สารละลายนำกลับ |

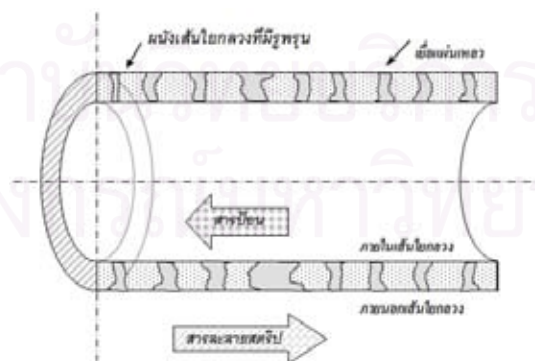
2.1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane; HFSLM)

ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงจะใช้วิธีนำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงในโมดูลรูปทรงกระบอกจากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของโมดูลด้วยเรซิน (Resin) ในการสกัดสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในเส้นใยกลวงที่เรียกว่าฝั่งท่อ (Tube Side) และฝั่งเปลือก (Shell Side) ซึ่งแล้วแต่ที่ผู้ใช้จะให้สายโคอยู่ฝั่งไหน และมีเยื่อแผ่นเหลวฝังอยู่ภายในเส้นใยกลวงซึ่งอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับฝั่งท่อและฝั่งเปลือก และการไหลของสายป้อนและสายนำกลับนั้นสามารถทำได้ 2 แบบคือ แบบไหลแบบทางเดียวกันและแบบสวนทางกันรูปที่ 2.6 แสดงถึงการไหลของสายป้อนและสายนำกลับภายในท่อซึ่งเป็นลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน



รูปที่ 2.5 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Izatt, 1989)

การเตรียมกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับทำโดยนำเยื่อแผ่นเหลวมาเคลือบฝังไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลวพุงด้วยตัวรองรับเมื่อนำตัวรองรับนี้มาขึ้นระหว่างสารละลายสองชนิดที่ไม่ละลายกับเยื่อแผ่นเหลวตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทไอออนโลหะจากสารละลายชนิดแรกไปยังสารละลายอีกชนิดหนึ่ง ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังจะเป็นสารละลายอินทรีย์ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังต้องเป็นวัฏภาคสารละลายของน้ำ



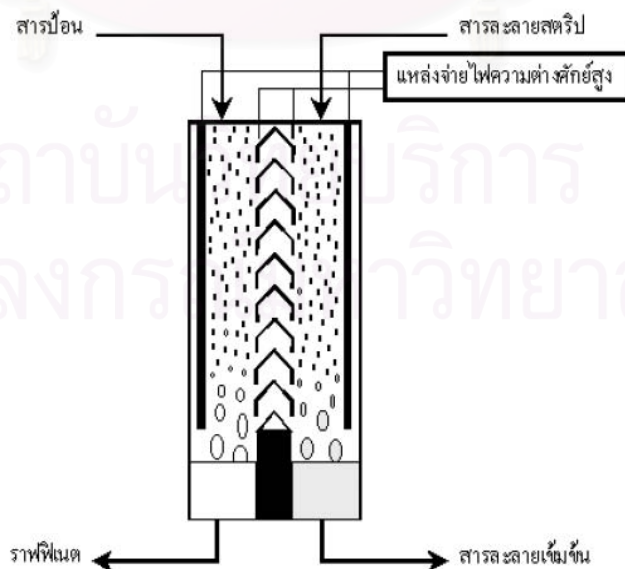
รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ

- มีค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูง
- มีค่าอัตราการถ่ายเทมวลที่สูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- มีค่าการคัดเลือกสูง
- สามารถเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์
- สามารถที่จะใช้ประโยชน์จากสารสกัดที่มีราคาแพงได้
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนและสารนำกลับมีค่าสูง
- สามารถใช้กับระบบที่มีของแข็งแขวนลอยได้
- มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ สามารถดัดแปลงได้และขยายขนาดได้ง่าย

2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตมีการพัฒนาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอดัมน์ (ชนิดหอสกัดแบบหยด) หลักไฟฟ้าสถิต และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวรวมเข้าด้วยกันซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆได้ เช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย และระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ความเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น โดยลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 (ประกร รามกุล, 2544)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต

จากรูปที่ 2.7 ชุดอุปกรณ์เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษ โดยถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์นำกลับ มีแผ่นกั้น (Baffle plate) เป็นโลหะตัวอักษรรูปตัว V คว่ำเรียงต่อกันเว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่ากันโดยมีลวดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอาไว้อีกทั้งยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะที่บดสำหรับแบ่งกั้น ภูมิภาคระหว่างสารละลายป้อนขาออก (Raffinate) กับสารละลายสไตริปขาออกในเซลล์สกัดและเซลล์การนำกลับ มีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มแช่อยู่ซึ่งต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต ขั้นตอนการทำงานเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็น ภูมิภาคของสารอินทรีย์ในเครื่องปฏิกรณ์จนได้ระดับของปริมาตรที่ต้องการ โดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี้อาจเป็นภูมิภาคต่อเนื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตจากนั้นป้อน สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วย แรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของภูมิภาค เกิดการสกัดและนำกลับ ออกตามกลไกการสกัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตเป็นปัจจัยส่งเสริมให้ ประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้จะออกแบบเป็นพิเศษเพื่อกำจัดปัญหาการ ปนเปื้อนผสมกันของภูมิภาคต่างๆ โดยหากมีหยดของสารป้อนหรือสารละลายนำกลับหลุดเข้าไป ในช่องของแผ่นกั้นซึ่งกันภูมิภาคทั้งสอง หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไป รวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดภูมิภาคของ สารละลายมีรูปร่างยืดยาวออกเป็นรูปทรงรี เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของภูมิภาค สารละลาย ดังนั้นเมื่อมีหยดของภูมิภาคของสารละลาย ซึ่งอยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิต จะรวมกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและค่าความแตกต่าง ของความหนาแน่นของภูมิภาคของสารละลายกับภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะมีอิทธิพลมากกว่า ปัจจัยอื่นๆ ที่จะส่งผลให้ภูมิภาคทั้งสองเคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ อีกทั้งยังมีแผ่นกั้นที่ได้รับการ ออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งจะช่วยให้หยดของภูมิภาคที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้นให้รวมตัว กันเองและตกกลับไปยังเซลล์ของมันตามเดิม (Gu, 1990)

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตจะมีข้อดีอยู่มากมาย เช่น มี ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของภูมิภาคต่างๆ ต่ำ เยื่อแผ่น เหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้น และด้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตยังมีข้อจำกัดอยู่ หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นขนาดและการกระจายตัวของหยดภูมิภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่าน เยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรไม่สูง ภูมิภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความ เป็นขั้วต่ำ และใช้กับกระบวนการที่ภูมิภาคของสารอินทรีย์เป็นภูมิภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยัง

พบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวัฏภาคต่างๆ ในขบวนการต่ำ อันเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในขบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นต้น (เอกพิชญ์ ทรงคุณ, 2548) ดังนั้น เทคนิคการสกัดด้วยเทคนิคต่างๆ ก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งานและพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไป ตารางที่ 2.1 เป็นการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่ารูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง (Yang et al., 1986; Dahuron et al., 1988) และเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ (Danesi et. al., 1986; Nakano et al., 1987; Tanikaki et al., 1988) ซึ่งเป็นรูปแบบของตัวรองรับที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (นิสิต สุไลมาน , 2544)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพุง		เยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิต	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง	- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณสูง	- มีค่าการคัดเลือกสูง	- กำลังการผลิตต่ำ	- มีเสถียรภาพสูง	- กำลังการผลิตต่ำ
- มีกำลังการผลิตสูง	- ใช้พลังงานสูง	- ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	- มีการสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว	- ประสิทธิภาพสูง	- สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ
- กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน	- ปัญหาการปนเปื้อน	- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ		- การปนเปื้อนต่ำ	- สารอินทรีย์ต้องเป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น
	- ปัญหาในการใช้สารลดแรงตึงผิวและการบำบัด	- ใช้พลังงานต่ำ	- ขยายขนาดง่ายอัตรา	- ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก
			- การถ่ายเทมวลสูง		

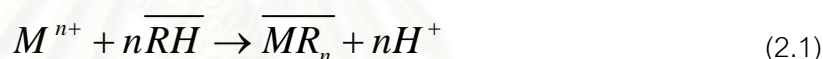
2.2 กลไกการถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายเทมวลที่เรียกว่า การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ การถ่ายเทมวลแบบควบคู่คือ กระบวนการถ่ายเทของไอออนสองชนิดพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ ซึ่งแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลคือ ผลต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบอีกชนิดหนึ่ง

(ไม่ใช่องค์ประกอบที่เราต้องการจะแยก) ดังนั้นเราจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่เราต้องการได้เรื่อยๆแม้ว่าความเข้มข้นทางด้านของสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อนเยื่อแผ่นเหลว ที่คั่นอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับนั้นจะผสมสารสกัดซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกเท่านั้น การถ่ายเทแบบควบคู่สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารเชิงซ้อนกับสารซึมผ่าน

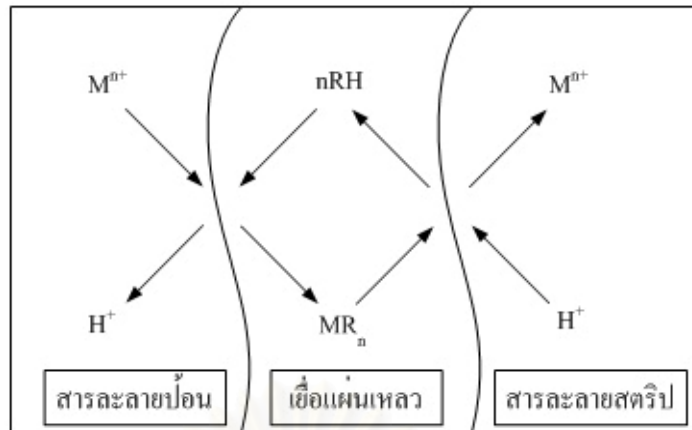
2.2.1 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (Counter-Transport Mass Transfer)

คือการถ่ายเทที่การซึมผ่านของไอออนทั้งสอง เคลื่อนที่สวนทางกันผ่านเยื่อแผ่นเหลวการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้ ไอออนโลหะ M^{n+} ที่อยู่ในสารละลายป้อน ทำปฏิกิริยากับสารสกัด RH ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n และไฮโดรเนียมไอออน H^+ ดังสมการ 2.1 ไฮโดรเนียมไอออน (H^+) นั้นอยู่ในสารละลายป้อน และสารประกอบเชิงซ้อน MR_n อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว



สารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) ที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือ ด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ และได้สารสกัดกลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



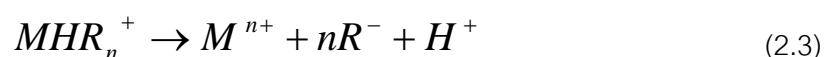
รูปที่ 2.8 แผนผังทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมของการถ่ายเทมวลแบบสวนทาง

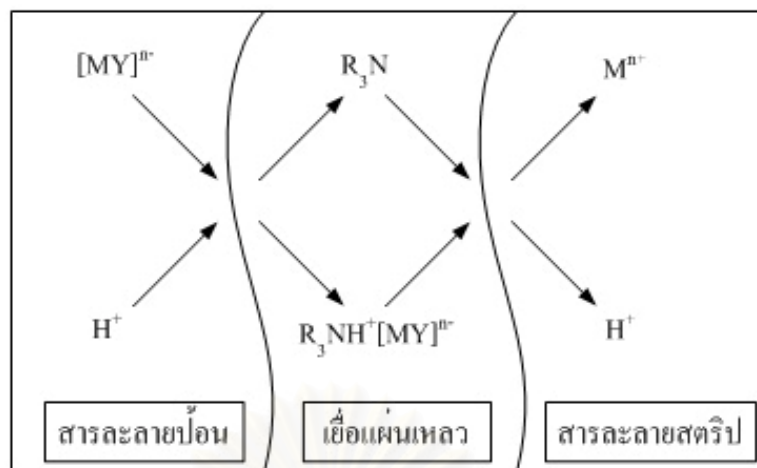
2.2.2 การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน (Co –Transport Mass Transfer)

คือการถ่ายเทที่การซึมผ่านของไอออนทั้งสอง เคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว การเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้ ไอออนโลหะ M^{n+} ที่อยู่ในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัด R ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออน (H^+) ที่อยู่ในสารละลายป้อน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MHR_n ดังสมการ



สารประกอบเชิงซ้อน (MHR_n) ที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือ ด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับได้เป็นไฮโดรเนียมไอออนและไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ และได้สารสกัด (R) กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วงเวียนเช่นนี้เรื่อยไปดังรูปที่ 2.9





รูปที่ 2.9 แผนผังทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมของการถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

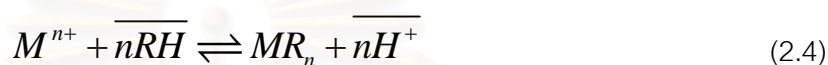
- 1) การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
- 2) การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
- 3) การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ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

2.3 ชนิดของสารสกัด

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

2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

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



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึง สารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ นอกจากนั้นสมการข้างต้น ยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลายนอกจากนั้นยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้น ๆ (Tavlarides et al., 1987)

สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ได้แก่อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Organic Derivatives of Phosphorous Acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic Acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะกรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric Acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acids; D2EHPA)

สารสกัดประเภทคีเลทได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วยดอนเนอร์กรุป (Donor Groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate Complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลทเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียงสองประเภทคือ (ก) ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-Hydroxy Benzophenone Oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วน

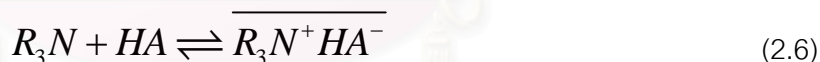
ใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะ เพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic Leach Liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline)

2.3.2 สารสกัดชนิดต่าง (Basic Extractant)

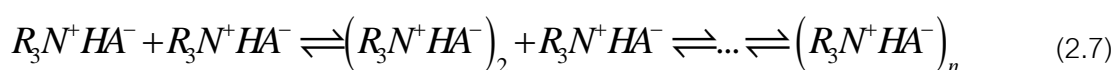
เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary Ammonium Halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary; RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (secondary; R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary; R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary; R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีน ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Anionic Species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



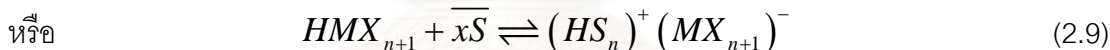
นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว $R_3N^+ HA^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ MY^n จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุตั้งสมการ ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้เอมีนเป็นสารสกัดคือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลาย และธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ (Ammonium Cation และ Anion) การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการ



การเกิดวิฏภาคที่สามทำให้วิฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดต่างมาใช้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifiers) เช่นพวก long-chain aliphatic alcohol (Tavlarides et al., 1987)

2.3.3 สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral Extractant)

สารสกัดประเภทกลาง (Neutral) หรือสารสกัดประเภทซอลเวท (Solvating) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะดอนเนอร์กรุป จึงไม่สามารถแตกตัวให้โปรตอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวิฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัด โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ จะขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวิฏภาคสารละลายของน้ำ เช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (Central Metal Atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตรอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดซอลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวิฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดซอลเวทดังกล่าว

2.4 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction)

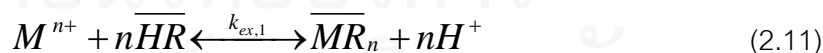
การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ หมายถึงการสกัดไอออนโลหะโดยใช้สารสกัดสองชนิดมาผสมกันแล้วได้ประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อเทียบกับการนำสารสกัดทั้งสองชนิดนั้นมาแยกกันสกัดแล้วนำผลการสกัดมารวมกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Coefficient, S.C.) Taube et al. ได้ให้นิยามไว้ดังนี้

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

- เมื่อ $D_{(1)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) เมื่อใช้สารสกัดชนิดแรก
 $D_{(2)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) เมื่อใช้สารสกัดชนิดที่สอง
 $D_{(1,2)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) เมื่อนำสารสกัดทั้งสองชนิด
 นั้นผสมกัน

เมื่อ D คือ อัตราส่วนการกระจาย หรือ Distribution ratio หมายถึง อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน ถ้าค่า S.C. มากกว่า 0 หมายความว่าเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergism) แต่ถ้าค่า S.C. น้อยกว่า 0 หมายความว่าชนิดของสารสกัดที่นำมาผสมกันนี้ทำให้ความสามารถในการสกัดด้อยลง (Antagonistic)

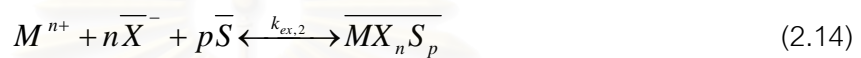
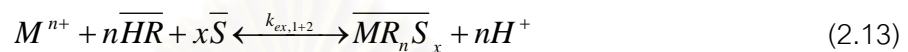
สารสกัดทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันเพื่อที่จะให้เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์นั้นจะต้องมีสารสกัดชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นสารสกัดหลักซึ่งโดยมากจะใช้ HTTA เป็นสารสกัดหลักและสารสกัดอีกชนิดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (ดอเนอร์) คอยเสริมการสกัด สารสกัดจำพวกที่ให้อิเล็กตรอน (ดอเนอร์) นี้จะเป็นสารสกัดที่ไม่สามารถแตกโปรตอนได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวไว้เกิดปฏิกิริยาซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักและไปจับโลหะอีกทีหนึ่ง สารสกัดที่เป็นพวกที่ให้อิเล็กตรอน (ดอเนอร์) เช่น 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 สาร

สัปดาห์ที่ทำหน้าที่เป็นดอเนอร์ (S) จะทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลัก HR แล้วไปทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะในสารละลายป้อนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอีกชนิดคือ MR_nS_x ดังสมการ 2.13 ทำให้สกัดโลหะได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้สารสกัดที่เป็นตัวให้อิเล็คตรอน (ดอเนอร์) ยังสามารถไปจับโลหะโดยไม่ต้องทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักก่อนดังสมการ 2.14 ซึ่งจะยิ่งทำให้สกัดโลหะได้มากยิ่งขึ้นและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนคือ MX_nS_p เมื่อ X คือไอออนประจุลบที่อยู่ในสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของน้ำ



จากสมการ 2.13 และ 2.14 จะได้ว่า

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

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

เมื่อ $k_{ex,1+2}$ และ $k_{ex,2}$ คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ และค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดโดยสารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นดอเนอร์โดยตรงตามลำดับและอัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) คือ

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

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

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

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 $K_{ex,2}$ นั้นมีค่าน้อยมากเพราะสารสกัดที่เป็นคอเนอร์นั้นสามารถจับโลหะที่เป็นไอออนบวกได้น้อยมากจึงให้เทอมที่มี $K_{ex,2}$ 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 ที่เกิดในวัฏภาคน้ำมันหรือในเมมเบรน จะเห็นได้ว่า $\beta_{n,x}$ คืออัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดผสมกันกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดหลักเพียงชนิดเดียว นั่นคืออัตราส่วนของค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2.13 กับสมการที่ 2.11 ดังนั้น $\beta_{n,x}$ ก็คือค่าคงที่สมดุลของสมการที่ 2.13 ลบด้วยสมการที่ 2.11 คือ



ซึ่งสมการที่ 2.25 นี้เป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่เกิดในเมมเบรนโดยมี $\beta_{n,x}$ เป็นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ถ้า $\beta_{n,x}$ มีค่ามากหมายถึงเกิดการสกัดแบบ

เสริมฤทธิ์มากและถ้าสารสกัดที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนนั้นมีการทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนหลายตัวสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยารวม

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

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



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองรวมทั้งขั้นตอนและวิธีการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษามีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนนิตเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองศึกษาการสกัดไอออนนิตเรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

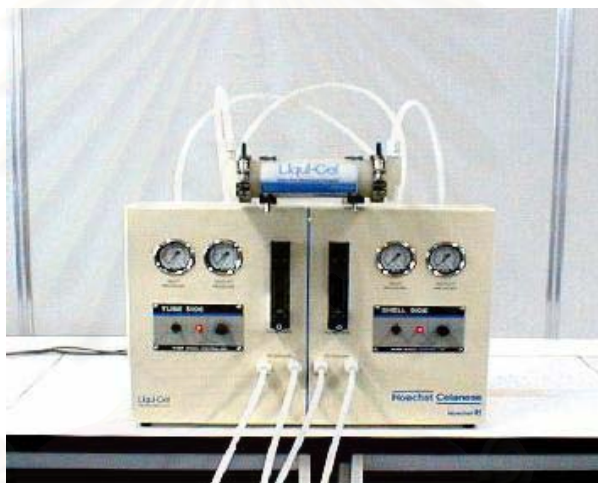
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	บริษัท
สารละลายป้อน	Rare Earth Nitrate	$Ln(NO)_3$	
สารสกัด	Tributyl Phosphate (TBP)	$C_{12}H_{27}O_4P$	Merck Ltd.
	Di (2-Ethylhexyl) Phosphoric Acid (D2EHPA)	$C_{16}H_{35}O_4P$	Merck Ltd.
	Bis (2,4,4-Trimethylpentyl) Phosphinic Acid (Cyanex 272)	$C_{16}H_{35}O_2P$	Cytec Canada Inc.
ตัวทำละลายอินทรีย์	Kerosene (Jet A-1)		บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)
สารละลายน้ำกลับ	Nitric Acid	HNO_3	Merck Ltd.

เมื่อ Ln คือ ไอออนของธาตุหายาก ประกอบไปด้วย อิตเทรียม (Y^{3+}), แลนทานัม (La^{3+}), ซีเรียม (Ce^{3+}), เพรซีโอดีเมียม (Pr^{3+}), นีโอดีเมียม (Nd^{3+}), ซาแมเรียม (Sm^{3+}), ยูโรเพียม (Eu^{3+}), แกโดลิเนียม (Gd^{3+}), ดิสโพรเซียม (Dy^{3+}) และ อิตเทอร์เบียม Yb^{3+}

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

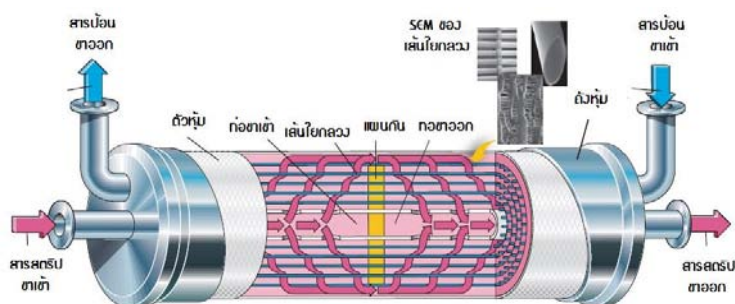
3.2.1 ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoeschst Celanese Corporation ซึ่งประกอบด้วย เครื่องสูบลม ชุดควบคุมความเร็ว มาตรฐานอัตราการไหล และมาตรฐานความดัน อย่างละ 2 ชุด เพื่อวัดในด้านฝั่งท่อและฝั่งเปลือก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel[®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง

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

3.2.3 เครื่องมือตรวจวัดค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะต่าง ๆ นั้นจะทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer, ICP-AES (Spectro Analytical Instruments, Spectroflame M Type FM V05)



รูปที่ 3.2 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง Celgard® X-30 240 Microporous Polypropylene Hollow Fiber

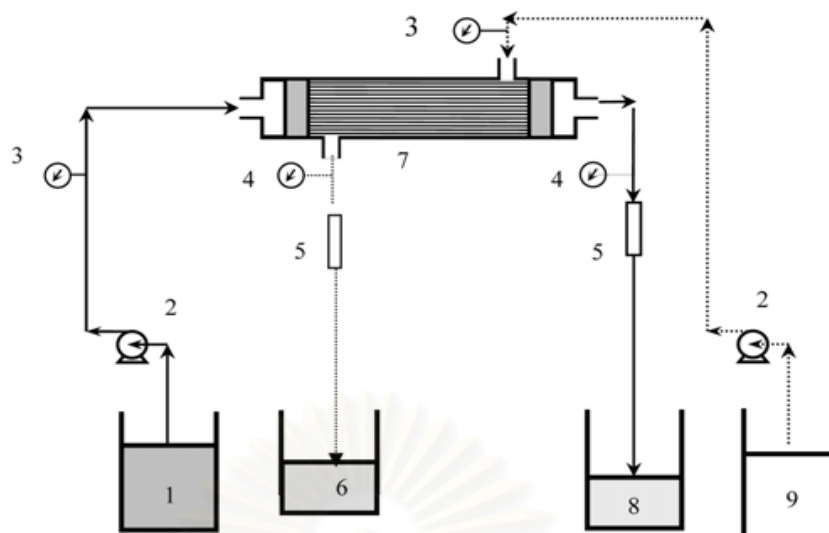
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของสมบัติต่าง ๆ ของชุดเส้นใยกลวง

สมบัติ	ชนิด / ขนาด
วัสดุเส้นใยกลวง	โพลีโพรพิลีน (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	10° c ถึง 60° c
มิติของชุดเส้นใยกลวง (D x L)	8' 28 cm

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TBP ต่อการสกัดไอออนนิตเตรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนคือสารละลายแอร์เอิร์ทไนเทรตปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับคือสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด TBP ในตัวทำละลายเคโรซีนปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
4. ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อมกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อ นาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.3
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก โดยทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 5, 10, 15, 25, 35, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1) - (5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
7. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนของธาตุนิตเรียมด้วยเครื่อง ICP-AES



รูปที่ 3.3 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One-through mode)

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| 1. ปีกเกอร์สารละลายป้อนขาเข้า | 2. ปั๊มสุบ |
| 3. มาตรวัดความดันขาเข้า | 4. มาตรวัดความดันขาออก |
| 5. มาตรวัดอัตราการไหล | 6. ปีกเกอร์สารละลายนำกลับขาออก |
| 7. ตัวพุงแบบเส้นใยกลวง | 8. ปีกเกอร์สารละลายป้อนขาออก |
| 9. ปีกเกอร์สารละลายนำกลับขาเข้า | |

3.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดไอออนนิตเตรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนคือสารละลายแอร์เอิร์ทไนเทรต ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับคือสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
4. ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อมกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.3

5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก โดยทำการเก็บตัวอย่างที่ เวลา 5, 10, 15, 25, 35, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
7. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนของธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP-AES

3.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ต่อการสกัดไอออน อิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนคือสารละลายแอร์เวิร์ทไนเทรตปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่าง สารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับคือสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด Cyanex 272 ในตัวทำ ละลายเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์
4. ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวง พร้อมกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อ นาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่าน ครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.3
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก โดยทำการเก็บตัวอย่างที่ เวลา 5, 10, 15, 25, 35, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
7. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนของธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP-AES

3.3.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ต่อการสกัด ไอออนอิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนคือสารละลายแอร์เวิร์ทไนเทรตปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่าง สารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์

2. เตรียมสารละลายนำกลับคือสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัด TBP และ Cyanex 272 ในตัวทำละลายเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร อัตราส่วนความเข้มข้น 0.1: 0.4 โมลต่อลิตร
4. ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวง พร้อมกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อ นาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่าน ครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.3
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก โดยทำการเก็บตัวอย่างที่ เวลา 5, 10, 15, 25, 35, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.1: 0.4, 0.2: 0.4, 0.3: 0.4 และ 0.35: 0.4 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
7. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนของธาตุหายากด้วยเครื่อง ICE-AES

3.3.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ต่อการสกัดแยกไอออนอิตเตรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พวยด้วยเส้นใยกลวงมีชั้นตอนกาทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนคือสารละลายแอร์เอิร์ทไนเทรต ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับคือสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัด D2EHPA และ Cyanex 272 ในตัวทำละลายเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร อัตราส่วนความเข้มข้น 0.1: 0.4 โมลต่อลิตร
4. ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวง พร้อมกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อ นาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่าน ครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.3

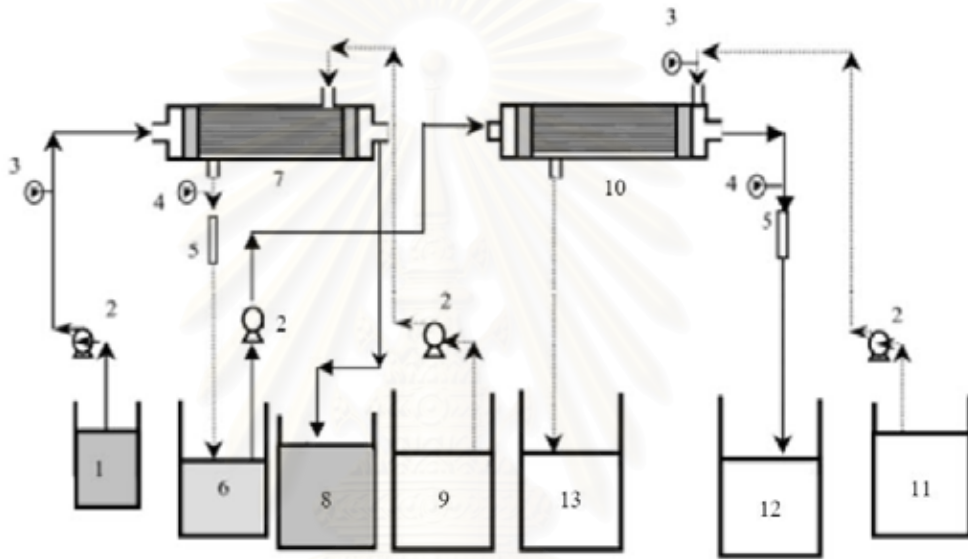
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก โดยทำการเก็บตัวอย่างที่ เวลา 5, 10, 15, 25, 35, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.1: 0.4, 0.2: 0.4, 0.3: 0.4 และ 0.35: 0.4 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
7. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนของธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP-AES

3.3.6 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกต่อการนำกลับ ไอออนอิตเตรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนคือสารละลายแอร์เวิร์ทไนเทรต ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่าง สารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัด TBP ในตัวทำละลายเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
3. เตรียมสารละลายนำกลับคือสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
4. ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวง พร้อมกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อ นาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่าน ครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.3
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก โดยทำการเก็บตัวอย่างที่ เวลา 5, 10, 15, 25, 35, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ
6. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายนำกลับใน ขั้นตอนที่ (3) เป็น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตรตามลำดับ
7. เปลี่ยนชนิดสารสกัดในข้อ (2) เป็น TBP, D2EHPA และ Cyanex 272 ตามลำดับ ใช้ ความเข้มข้นของสารสกัด TBP และ D2EHPA เป็น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 โมลต่อ ลิตร และใช้ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 เป็น เป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร ตามลำดับ และทำการทดลองซ้ำในข้อ (6) ที่ทุกๆความเข้มข้นของสาร สกัดแต่ละชนิด แล้วทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1)-(5)
8. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนของธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP-AES

3.3.7 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของระบบสองหอสกัดต่อการสกัดไอออนิตเตรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนคือสารละลายแควีเอิร์ทไนเทรต ปริมาตร 5 ลิตร เพื่อใช้เป็นสารละลายป้อนในหอสกัดที่ 1 และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับหอสกัดที่ 1 คือสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร



รูปที่ 3.4 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One-through Mode) ระบบสองหอสกัด

- | | |
|--|--|
| 1. ปีกเกอร์สารละลายป้อนขาเข้าหอสกัด 1 | 2. ปั๊มสูบ |
| 3. มาตรวัดความดันขาเข้า | 4. มาตรวัดความดันขาออก |
| 5. มาตรวัดอัตราการไหล | 6. ปีกเกอร์สารละลายนำกลับขาออกหอสกัด 1 และสารละลายป้อนขาเข้าหอสกัด 2 |
| 7. ตัวพุงแบบเส้นใยกลวง (หอสกัด 1) | 8. ปีกเกอร์สารละลายป้อนขาออกหอสกัด 1 |
| 9. ปีกเกอร์สารละลายนำกลับขาเข้าหอสกัด 1 | 10. ตัวพุงแบบเส้นใยกลวง (หอสกัด 2) |
| 11. ปีกเกอร์สารละลายนำกลับขาเข้าหอสกัด 2 | 12. ปีกเกอร์สารละลายป้อนขาออกหอสกัด 2 |
| 13. ปีกเกอร์สารละลายนำกลับขาออกหอสกัด 2 | |

3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวหอสกัด 1 ซึ่งเป็นสารละลายผสมของสารสกัด Cyanex 272 และ TBP ในตัวทำละลายเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร
4. เตรียมสารละลายนำกลับหอสกัดที่ 2 คือสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.6 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
5. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวหอสกัด 2 ซึ่งเป็นสารละลายของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน ปริมาตร 1 ลิตร ความเข้มข้นเป็น 0.1 โมลต่อลิตร
6. ทำการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดการทดลองเส้นใยกลวงพร้อมกัน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านชุดทดลองแบบไหลผ่านครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.4
7. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกทั้งสองหอสกัดโดยทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 5, 10, 15, 25, 35, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ ในแต่ละหอสกัด
8. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1)-(7) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกในข้อ (4) เป็น 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
9. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนของธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP-AES

บทที่ 4

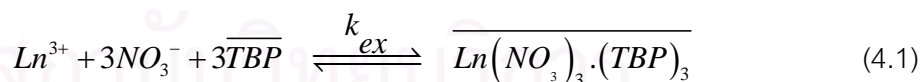
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลจากการทดลองที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนอิตเทรียมโดยวิธีการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด คือ TBP, D2EHPA และ Cyanex 272 ในตัวทำละลายอินทรีย์ ความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลับ การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction) โดยการนำสารสกัดสองชนิดมาผสมกัน การสกัดระบบระบบหอสกัดเดี่ยวและระบบสองหอสกัด และผลของการเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง รวมถึงการวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้

ในงานวิจัยนี้กระบวนการของการสกัดที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ ชนิดการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกันโดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยาไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังนี้

1. สมการการสกัดเมื่อใช้สารสกัด TBP (R.G. Bautista, 2000)

ในวัฏภาคสารละลายป้อนมีไอออนของธาตุหายากเป็นสารตั้งต้นอยู่ โดยจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด TBP ที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยจะทำปฏิกิริยากันที่ผิวสัมผัสเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สองชนิดคือสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{Ln(NO_3)_3 \cdot (TBP)_3}$ ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและไฮโดรเนียมไอออนในวัฏภาคสารละลายป้อนและจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเรื่อยๆ จนกว่าจะเข้าสู่สมดุลสามารถแสดงให้ดูได้ดังสมการ



โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

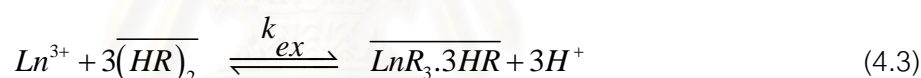
$$K_{ex} = \frac{\left[\overline{Ln(NO_3)_3 \cdot (TBP)_3} \right]}{\left[TBP \right]^3 \left[NO_3^- \right]^3 \left[Ln^{3+} \right]} \quad (4.2)$$

เมื่อ Ln คือ Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy และ Yb

ในการทำงานเดียวกันที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายนำกลับ จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลและมีค่าคงที่สมดุลค่าเดียวกันกับปฏิกิริยาไปข้างหน้าแต่แรงขับของปฏิกิริยาการสกัดนี้คือ ไฮโดรเนียมไอออนฉะนั้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนทางด้านสารละลายนำกลับมากกว่าด้านสารละลายป้อนก็ยังสามารถสกัดไอออนของธาตุหายากจากสารละลายป้อนให้แพร่มาทางด้านสารละลายนำกลับได้ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนธาตุหายากทางด้านสารละลายนำกลับจะมีค่ามากกว่าก็ตาม

2. สมการการสกัดเมื่อใช้สารสกัด D2EHPA (K. Akiba et al., 1994)

ในภูมิภาคสารละลายป้อนมีไอออนของธาตุหายากเป็นสารตั้งต้นอยู่โดยจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA (HR) ที่อยู่ในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยจะทำปฏิกิริยากันที่ผิวสัมผัสเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สองชนิดคือสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnR_3 \cdot 3HR}$ ในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวและไฮโดรเนียมไอออนในภูมิภาคสารละลายป้อน และจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเรื่อยๆจนกว่าจะเข้าสู่สมดุลสามารถแสดงให้ดูได้ดังสมการ



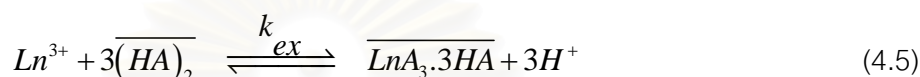
โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{ex} = \frac{[\overline{LnR_3 \cdot 3HR}][H^+]^3}{[(HR)_2]^3 [Ln^{3+}]} \quad (4.4)$$

ในการทำงานเดียวกันที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายนำกลับ จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลและมีค่าคงที่สมดุลค่าเดียวกันกับปฏิกิริยาไปข้างหน้าแต่แรงขับของปฏิกิริยาการสกัดนี้คือ ไฮโดรเนียมไอออนฉะนั้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนทางด้านสารละลายนำกลับมากกว่าด้านสารละลายป้อนก็ยังสามารถสกัดไอออนของธาตุหายากจากสารละลายป้อนให้แพร่มาทางด้านสารละลายนำกลับได้ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนธาตุหายากทางด้านสารละลายนำกลับจะมีค่ามากกว่าก็ตาม

3. สมการการสกัดเมื่อใช้สารสกัด Cyanex 272 (Li et al., 1986)

ในวัฏภาคสารละลายป้อนมีไอออนของธาตุหายากเป็นสารตั้งต้นอยู่โดยจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด Cyanex 272 (HA) ที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยจะทำปฏิกิริยากันที่ผิวสัมผัสเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สองชนิดคือสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3 \cdot 3HA}$ ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและไฮโดรเนียมไอออนในวัฏภาคสารละลายป้อน และจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเรื่อยๆจนกว่าจะเข้าสู่สมดุลสามารถแสดงให้ดูได้ดังสมการ



โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{ex} = \frac{[\overline{LnA_3 \cdot 3HA}][H^+]^3}{[\overline{(HA)_2}]^3 [Ln^{3+}]} \quad (4.6)$$

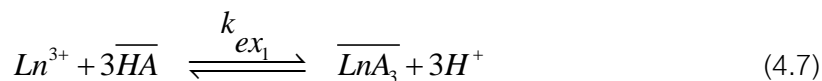
ในทำนองเดียวกันที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลและมีค่าคงที่สมดุลค่าเดียวกันกับปฏิกิริยาไปข้างหน้าแต่แรงขับของปฏิกิริยาการสกัดนี้คือ ไฮโดรเนียมไอออนฉะนั้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนทางด้านสารละลายนำกลับมากกว่าด้านสารละลายป้อนก็ยังสามารถสกัดไอออนของธาตุหายากจากสารละลายป้อนให้แพร่มาทางด้านสารละลายนำกลับได้ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนธาตุหายากทางด้านสารละลายนำกลับจะมีค่ามากกว่าก็ตาม

4. สมการการสกัดเมื่อใช้สารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP (Bernadeta Gajda et al., 2007)

ในวัฏภาคสารละลายป้อนมีไอออนของธาตุหายากเป็นสารตั้งต้นอยู่โดยจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด Cyanex 272 (HA) และ TBP ที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว การสกัดไอออนของธาตุหายาก ในขั้นตอนแรกไอออนของธาตุหายากจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักคือ Cyanex 272 (HA) โดยจะทำปฏิกิริยากันที่ผิวสัมผัสเกิดเป็นผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3}$ จากนั้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับสารสกัด TBP เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3 \cdot 3TBP}$ ด้วยเหตุนี้ปฏิกิริยา

ที่เกิดขึ้นจะดำเนินไปข้างหน้าตลอด คือเมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3}$ แล้วก็จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องจากสารสกัด TBP ซึ่งทำให้สกัดได้ออนได้มากขึ้น

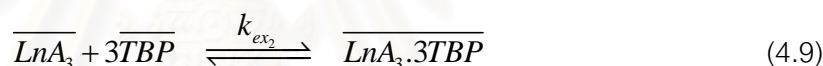
สมการการสกัดด้วยสารสกัดหลัก Cyanex 272 คือ



โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{ex_1} = \frac{[\overline{LnA_3}][H^+]^3}{[HA]^3[Ln^{3+}]} \quad (4.8)$$

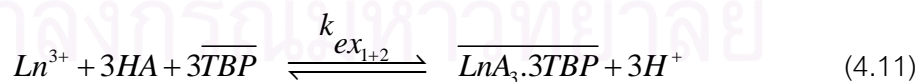
สมการการสกัดด้วยสารสกัดเสริม TBP คือ



โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{ex_2} = \frac{[\overline{LnA_3 \cdot 3TBP}]}{[TBP]^3[\overline{LnA_3}]} \quad (4.10)$$

นำสมการที่ 4.8 รวมกับสมการที่ 4.9 จะได้สมการการสกัดรวม คือ



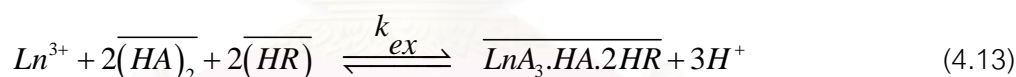
โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{ex_{1+2}} = \frac{[\overline{LnA_3 \cdot 3TBP}][H^+]^3}{[TBP]^3[HA]^3[Ln^{3+}]} \quad (4.12)$$

ในการทำงานเดียวกันที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลและมีค่าคงที่สมดุลค่าเดียวกันกับปฏิกิริยาไปข้างหน้าแต่แรงขับของปฏิกิริยาการสกัดนี้คือ ไฮโดรเนียมไอออนฉะนั้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนทางด้านสารละลายนำกลับมากกว่าด้านสารละลายป้อนก็ยังสามารถสกัดไอออนของธาตุหายากจากสารละลายป้อนให้แพร่มาทางด้านสารละลายนำกลับได้ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนธาตุหายากทางด้านสารละลายนำกลับจะมีค่ามากกว่าก็ตาม

5. สมการการสกัดเมื่อใช้สารสกัดผสม Cyanex 272 และ D2EHPA (D. Davisshi et al., 2005)

ในวัฏภาคสารละลายป้อนมีไอออนของธาตุหายากเป็นสารตั้งต้นอยู่โดยจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด Cyanex 272 (HA) พร้อมกับสารสกัด D2EHPA ที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งแตกต่างจากการใช้สารสกัด TBP เพราะ D2EHPA เป็นสารสกัดที่สามารถแตกตัวได้ การเกิดปฏิกิริยาการสกัดจึงสามารถเกิดพร้อมกับสารสกัดหลักคือ Cyanex 272 ได้เลย โดยจะทำปฏิกิริยากันที่ผิวสัมผัสเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สองชนิดคือสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3 \cdot HA \cdot 2HR}$ ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและไฮโดรเนียมไอออนในวัฏภาคสารละลายป้อน และจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเรื่อยๆจนกว่าจะเข้าสู่สมดุล สามารถแสดงให้ดูได้ดังสมการ



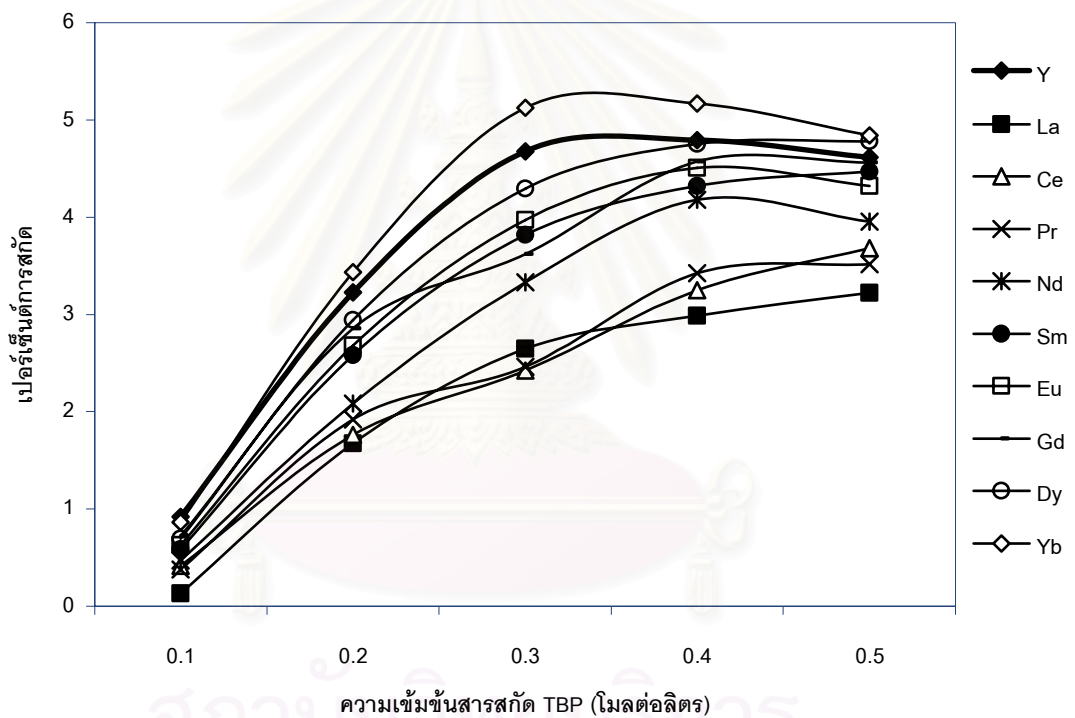
โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{ex} = \frac{[\overline{LnA_3 \cdot HA \cdot 2HR}][H^+]^3}{[(HR)]^2 [\overline{(HA)}_2]^2 [Ln^{3+}]} \quad (4.14)$$

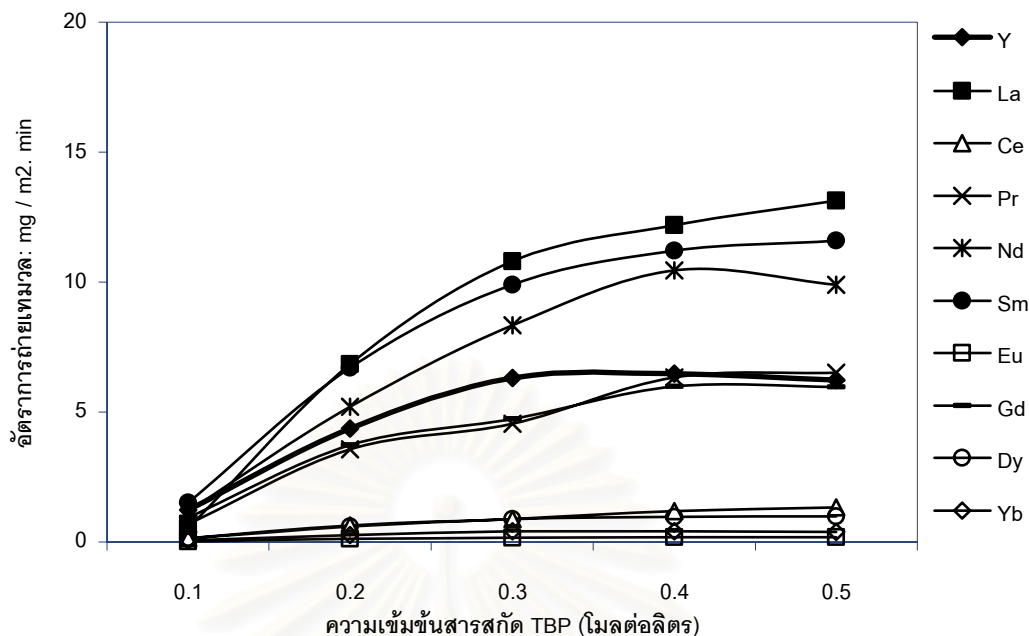
ในการทำงานเดียวกันที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลและมีค่าคงที่สมดุลค่าเดียวกันกับปฏิกิริยาไปข้างหน้าแต่แรงขับของปฏิกิริยาการสกัดนี้คือ ไฮโดรเนียมไอออนฉะนั้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนทางด้านสารละลายนำกลับมากกว่าด้านสารละลายป้อนก็ยังสามารถสกัดไอออนของธาตุหายากจากสารละลายป้อนให้แพร่มาทางด้านสารละลายนำกลับได้ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนธาตุหายากทางด้านสารละลายนำกลับจะมีค่ามากกว่าก็ตาม

4.1 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TBP ต่อการสกัดไอออนิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่น เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TBP ที่มีต่อการสกัดไอออนิตเทรียม โดยได้ทดลองใช้ค่าความเข้มข้นของสารสกัด TBP อยู่ในช่วง 0.1-0.5 โมลต่อลิตร โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นคงที่ดังนี้ คือความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว โดยได้แสดงผลการทดลองไว้ในรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด TBP ในช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร

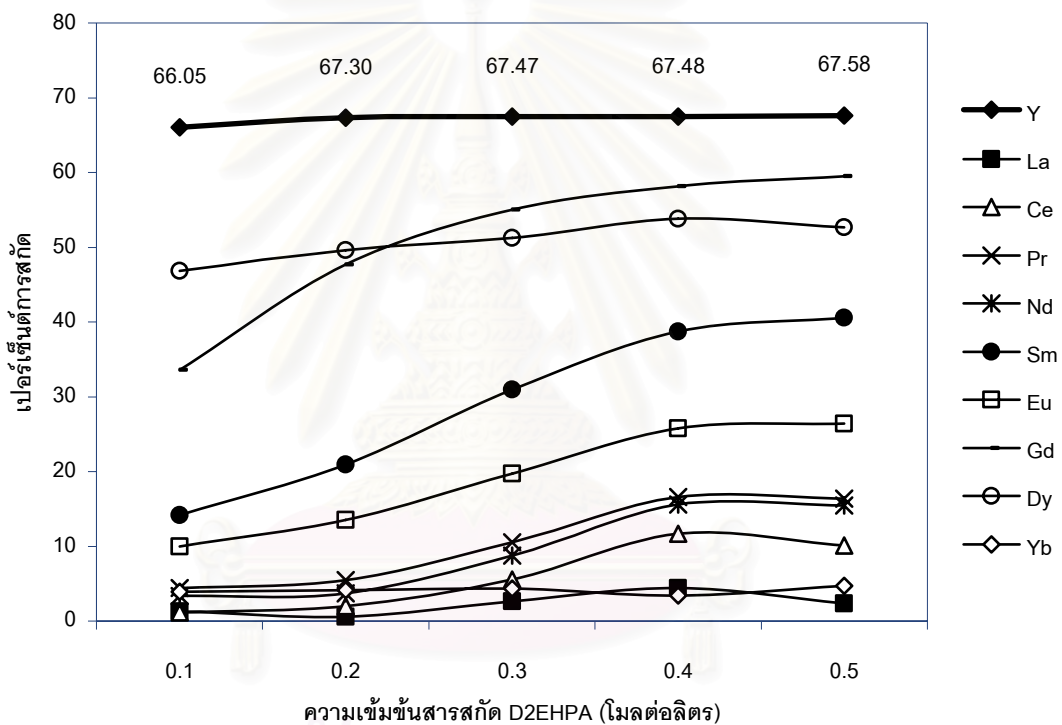


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารสกัด TBP ในช่วง 0.1-0.5 โมลต่อลิตร กับอัตราการถ่ายเทมวลในการสกัดไอออนของธาตุหายาก

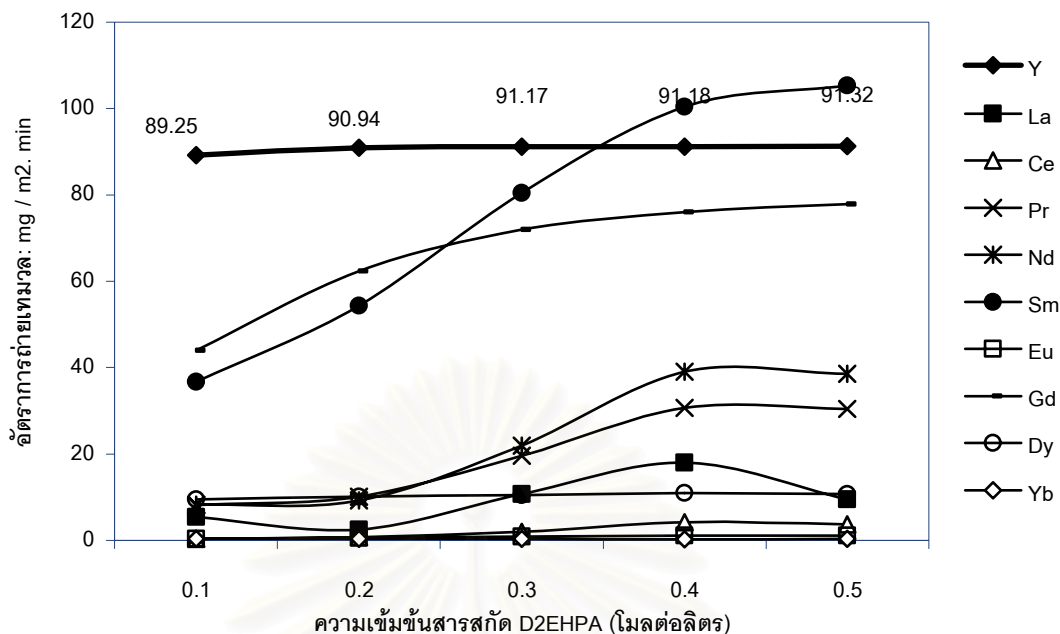
จากรูปที่ 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารสกัด TBP พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารสกัดมากขึ้นมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อสารสกัดมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น ตามหลักของนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอลิเยอร์ ทำให้สกัดไอออนของธาตุหายากได้มากขึ้นนั่นเอง แต่เปอร์เซ็นต์การสกัดที่ได้มีค่าที่ต่ำมาก เป็นเพราะสารสกัด TBP ซึ่งเป็นสารสกัดที่เป็นคอเนอร์กรุปหรือสารสกัดที่เป็นกลางซึ่งไม่เกิดการแตกตัว ดังนั้นเมื่อทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นซึ่งเป็นไอออนบวกจะทำปฏิกิริยากันได้ไม่ดีเกิดการสกัดได้น้อยเนื่องจากไอออนบวกจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกรด อีกทั้งเมื่อพิจารณาจากสมการ 4.1 พบว่าสารสกัด TBP นอกจะสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนที่มีประจุบวกได้แล้ว ก็ยังสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนที่มีประจุลบได้ในการทดลองนี้ความเข้มข้นของประจุลบคือ กรดไนตริกจะมีค่ามากกว่าไอออนที่มีประจุบวก คือไอออนของธาตุหายากมาก เป็นเหตุให้สารสกัด TBP ทำปฏิกิริยากับประจุลบได้มากกว่าทำให้ผลการสกัดไอออนที่มีประจุบวกเกิดขึ้นน้อย

4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดไอออนิตเทียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการสกัดไอออนิตเทียม โดยได้ทดลองใช้ค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA อยู่ในช่วง 0.1-0.5 มิลต่อลิตร โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นคงที่ดังนี้ คือความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่ความเข้มข้น 0.2 มิลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว โดยได้แสดงผลการทดลองไว้ในรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 มิลต่อลิตร

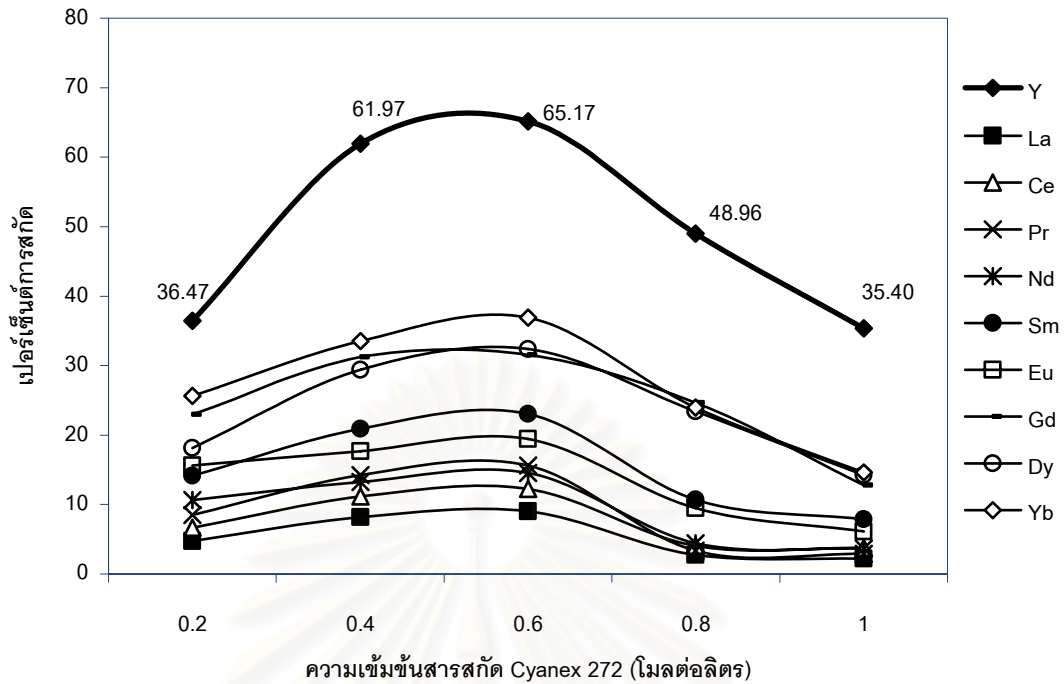


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA ในช่วง 0.1-0.5 โมลต่อลิตร กับ อัตราการถ่ายเทมวลในการสกัดไอออนของธาตุหายาก

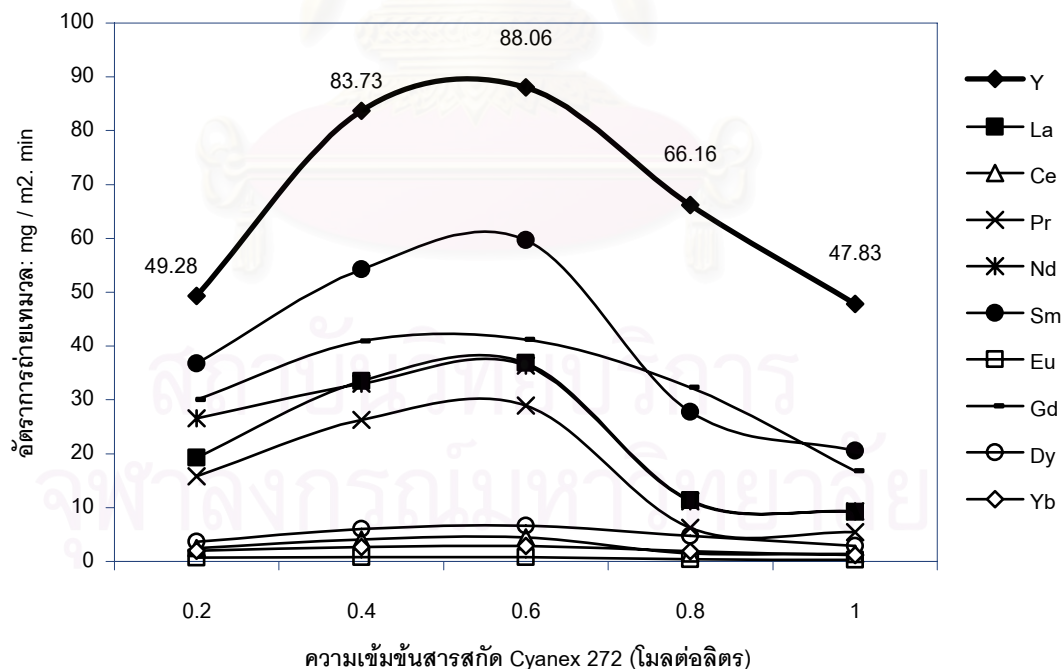
จากรูปที่ 4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารสกัดมากขึ้นมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย เพราะเมื่อสารสกัดมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น ตามหลักของนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอลิเยอร์ ทำให้สกัดไอออนของธาตุหายากได้มากขึ้นนั่นเอง โดยเฉพาะไอออนอิตเทรียมมีเปอร์เซ็นต์การสกัดที่สูงมาก ถึงแม้ใช้ความเข้มข้นของสารสกัดที่ความเข้มข้นต่ำๆ ก็ตาม แต่พบว่าค่าการคัดเลือกในการสกัด (Selectivity) ไม่ดีเมื่อพิจารณาจากผลที่ได้พบว่าจะมีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นที่ไม่ต้องการปะปนออกมาเป็นจำนวนมากเช่นกัน

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ต่อการสกัดไอออนอิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ที่มีต่อการสกัดไอออนอิตเทรียม โดยได้ทดลองใช้ค่าความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 อยู่ในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นคงที่ดังนี้ คือความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว โดยได้แสดงผลการทดลองไว้ในรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ในช่วงความเข้มข้น 0.2-1.0 มิลลิลิตร



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272 ในช่วง 0.2-1.0 มิลลิลิตรกับอัตราการถ่ายเทมวลในการสกัดไอออนของธาตุหายาก

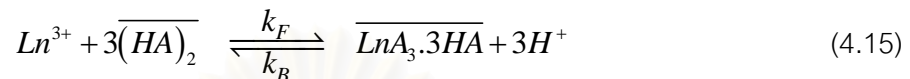
จากรูปที่ 4.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารสกัดเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้น 0.2-0.6 โมลต่อลิตร โดยเฉพาะไอออนนิตเตรียมมีเปอร์เซ็นต์การสกัดที่สูงมาก ลักษณะการสกัดที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มแปรตามเลขอะตอมหรือผกผันกับขนาดของรัศมีอะตอม ยกเว้นไอออนนิตเตรียมที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 39 และมีรัศมีอะตอมเท่ากับ 162 พิโคเมตร โดยไอออนที่มีเลขอะตอมสูงกว่า (ขนาดรัศมีอะตอมเล็กกว่า) จะสกัดออกมาได้มากกว่า (Peppard, D. F. 1961) เพราะว่าเมื่อพิจารณาที่รูพรุนของเยื่อแผ่นเหลว ไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าก็จะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารสกัดได้มากกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่จึงเป็นเหตุให้สกัดได้มากกว่า สาเหตุที่สกัดไอออนนิตเตรียมได้ดี เพราะว่าไอออนนิตเตรียมมีขนาดรัศมีไอออนเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับไอออนธาตุชนิดอื่นๆ จะสามารถสกัดได้ดีกว่าไอออนที่มีรัศมีใหญ่กว่า อีกทั้งสารสกัด Cyanex 272 สามารถทำปฏิกิริยาการสกัดไอออนนิตเตรียมได้ดีที่สารละลายป้อนมีค่าความเป็นกรดต่ำ หรือค่า pH มากกว่า 5 (Moonsung Koh, 2004) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ปฏิบัติคือ ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายป้อนมีค่า 5.4 และจากงานวิจัยหลายๆ งานที่ผ่านมาพบว่าการใช้สารสกัด Cyanex 272 สามารถทำการสกัดไอออนนิตเตรียมได้ออกมาอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเป็นเพราะสารสกัด Cyanex 272 เป็นสารสกัดที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สกัดและคัดเลือกไอออนนิตเตรียมออกจากไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะ (Xiaobo Sun et al., 2005) แต่การสกัดเริ่มลดลงในช่วงความเข้มข้นสารสกัด 0.6-1.0 โมลต่อลิตร เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้นมา (Luccio et al., 2000) ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนแพร่ได้ช้าลงหรืออีกนัยหนึ่งก็คือส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะที่ละลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีค่าน้อยลงดังสมการของ Stokes และ Einestien (Schulz, 1988; Cussler, 1997) ดังนี้

$$D = \frac{k_B T}{6r\pi\eta} \quad (4.14)$$

เมื่อ k_B คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann T คือ อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว r คือ รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน π คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.1416 η คือ ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว จากสมการเห็นได้ว่าค่าความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นสารสกัดมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นในขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าลดลงเช่นกัน เมื่อสารประกอบเชิงซ้อนแพร่ได้ช้าลง จึงยังมีสารประกอบเชิงซ้อนบางส่วนที่ยังเกาะอยู่ที่ผิวสัมผัสทำ

ให้ไอออนทำปฏิกิริยากับสารสกัดตรงบริเวณนั้นไม่ได้ ทำให้ไอออนที่ถูกทำปฏิกิริยามีจำนวนเท่าเดิมถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดมีค่าลดลง

นอกจากนี้ผลที่เกิดขึ้นยังอาจจะเกิดเพราะปฏิกิริยาในขั้นตอนการสกัดโดยอธิบายได้จากสมการการหายไปของไอออนธาตุหายากดังนี้



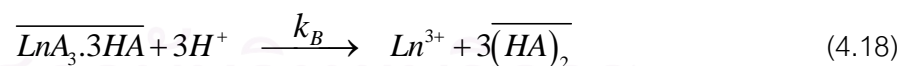
โดยที่ค่า k_F คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และ k_B คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไอออนของธาตุหายาก ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะถูกสกัดโดยปฏิกิริยาไปข้างหน้าระหว่างไอออนของธาตุหายากและสารสกัด



ดังนั้นอัตราการหายไปของไอออนธาตุหายากในวัฏภาคสารละลายป้อนคือ

$$-r_{c,forward} = k_F [\text{Ln}^{3+}] [(\overline{\text{HA}})_2]^3 \quad (4.17)$$

สำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออน



อัตราการเกิดของไอออนธาตุหายากในวัฏภาคสารละลายป้อนจะเป็น

$$r_{c,reverse} = k_B [\overline{\text{LnA}_3 \cdot 3\text{HA}}] [\text{H}^+]^3 \quad (4.19)$$

ถ้าคุณสมการนี้ทั้งสองฝั่งด้วย -1 จะได้สมการแสดงอัตราการหายไปของไอออนธาตุหายากในวัฏภาคสารละลายป้อนสำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับ

$$-r_{c,reverse} = -k_B [\overline{\text{LnA}_3 \cdot 3\text{HA}}] [\text{H}^+]^3 \quad (4.20)$$

ดังนั้นอัตราการหายไปของไอออนธาตุหายากจากวัฏภาคสารละลายป้อนสุทธิ คือ

$$-r_c = -r_{c,net} = -r_{c,forward} + -r_{c,reverse} \quad (4.21)$$

$$-r_c = k_F [Ln^{3+}] [(HA)_2]^3 - k_B [LnA_3 \cdot 3HA] [H^+]^3 \quad (4.22)$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้วัฏภาคสารละลายป้อนที่มีค่าความเบีรกรด-ต่าง มากกว่า 5 ทำให้พจน์ที่ 2 ของสมการ (4.22) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก สมการดังกล่าวจึงลดรูปเป็น

$$-r_c = k_F [Ln^{3+}] [(HA)_2]^3 \quad (4.23)$$

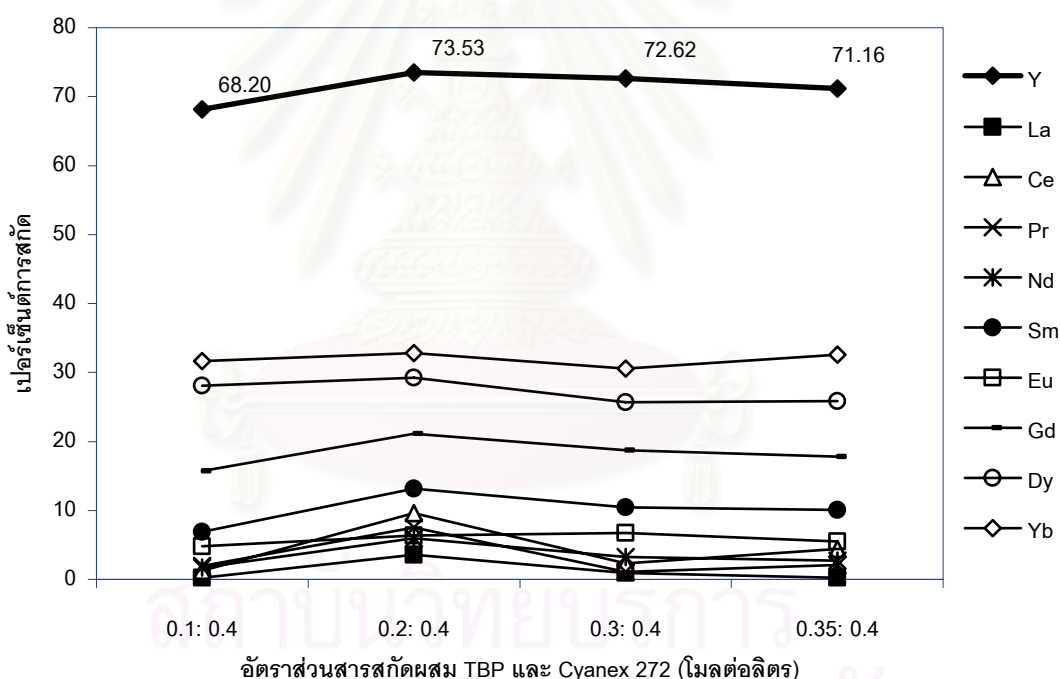
จากสมการ (4.23) จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด $[HA]$ อัตราการหายไปของไอออนธาตุหายากในวัฏภาคสารละลายป้อนจะมากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดต่อไป การสกัดมีแนวโน้มจะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นไฮโดรเนียมไอออนที่เกิดในวัฏภาคสารละลายป้อน โดยทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนของธาตุหายากกับสารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงขึ้นทำให้พจน์ที่ 2 ของสมการ (4.22) มีค่าสูงขึ้น อัตราการหายไปของไอออนธาตุหายากจึงเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลง ซึ่งยังเป็นเหตุผลในการอธิบายถึงว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการสกัดจะมีค่าลดลงอีกด้วย เพราะเมื่อเวลามากขึ้น ไฮโดรเนียมไอออนในฝั่งสารละลายนำกลับจะเกิดการถ่ายเทมาทางฝั่งสารละลายป้อนมากขึ้นนั่นเอง ทำให้การถ่ายเทมวลที่ใช้ผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายนำกลับเป็นแรงขับมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาอัตราการถ่ายเทมวลของสารสกัดทั้ง 3 ชนิด สาเหตุที่ต้องพิจารณาจากอัตราการถ่ายเทมวล เพราะว่าปริมาณความเข้มข้นไอออนของธาตุหายากแต่ละชนิดในสารตั้งต้นมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงใช้ค่าอัตราการถ่ายเทมวลเพราะเป็นการพิจารณาการสกัดที่พื้นที่เท่ากัน ในรูปที่ 4.2, 4.4 และ 4.6 พบว่าพบว่าสารสกัด Cyanex 272 ให้ผลการสกัดไอออนอิตเทรียมและมีค่าการคัดเลือกที่ดีจึงใช้เป็นสารสกัดตัวหลัก และใช้สารสกัดที่เหลืออีกสองชนิดเป็นตัวเสริมฤทธิ์ในการทดลองขั้นต่อไปคือการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction) เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.5 พบว่าความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร และ 0.6 โมลต่อลิตร ให้ผลการสกัดไอออนอิตเทรียมไม่แตกต่างกันมาก การทดลองขั้นต่อไปในระบบสารสกัดผสมจึง

เลือกใช้ความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272 เป็น 0.4 โมลต่อลิตร เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้สารสกัดเนื่องจากสารสกัด Cyanex 272 มีราคาที่สูงมาก

4.4 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ต่อการสกัดไอออนอิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่มีต่อการสกัดไอออนของอิตเทรียม โดยได้ทดลองที่อัตราส่วนความเข้มข้นสารสกัด 0.1: 0.4, 0.2: 0.4, 0.3: 0.4 และ 0.35: 0.4 โมลต่อลิตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นๆ คงที่ดังนี้ คือความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว โดยได้แสดงผลการทดลองไว้ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ

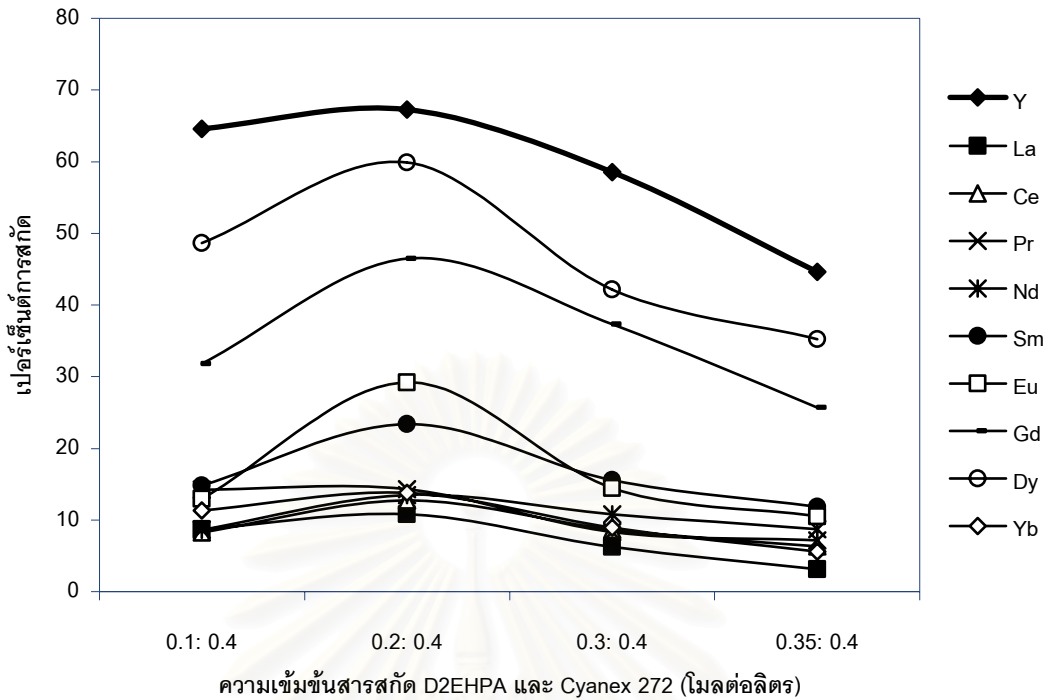
จากรูปที่ 4.7 ผลการสกัดด้วยสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าให้ผลการสกัดที่ดีมีเปอร์เซ็นต์การสกัดสูง โดยเฉพาะไอออนอิตเทรียมจะมีเปอร์เซ็นต์การสกัดที่สูงกว่าธาตุอื่นๆอย่างเห็นได้ชัดเจน มีค่าการคัดเลือกที่ดีแต่ก็ยังมีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นที่ปะปนออกมาเป็นจำนวนสมควร เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นพบว่าให้ผล

การสกัดที่ไม่แตกต่างกันมาก แต่จะมีค่าการสกัดดีที่สุดที่อัตราส่วนความเข้มข้นสารสกัด TBP: Cyanex 272 เป็น 0.2: 0.4 โมลต่อลิตร และเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการใช้สารสกัด Cyanex 272 ชนิดเดียว พบว่าการใช้สารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ให้ผลการสกัดที่ดีขึ้น สาเหตุเป็นเพราะจากสมการที่ (4.7) และ (4.9) การสกัดไอออนของธาตุหายากในขั้นตอนแรกไอออนของธาตุหายากจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักคือ Cyanex 272 (HA) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3}$ จากนั้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับสารสกัด TBP เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3 \cdot (TBP)_3}$ ด้วยเหตุนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดำเนินไปข้างหน้าตลอด คือเมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3}$ แล้วก็จะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับสารสกัด TBP ซึ่งทำให้สกัดไอออนได้มากขึ้น ซึ่ง TBP เป็นสารสกัดเอสเทอร์ชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติเดียวกับ isooctanol ซึ่งเป็นสารที่ใช้ลดแรงตึงผิว แต่สารสกัด TBP จะให้ผลที่ดีกว่า (Wei Li et al., 2007) และสามารถเป็นสารปรับปรุงคุณภาพ และเป็นสารที่เลียงเลียงไม่ให้เกิดอิมัลชันหรือเฟสที่ 3 ได้ (T. Masaaki et al. , 2000)

4.5 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ต่อการสกัดไอออนอิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่มีต่อการสกัดไอออนอิตเทรียม โดยได้ทดลองที่อัตราส่วนความเข้มข้นของสารสกัด 0.1: 0.4, 0.2: 0.4, 0.3: 0.4 และ 0.35: 0.4 โมลต่อลิตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นคงที่ดังนี้ คือความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว โดยได้แสดงผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



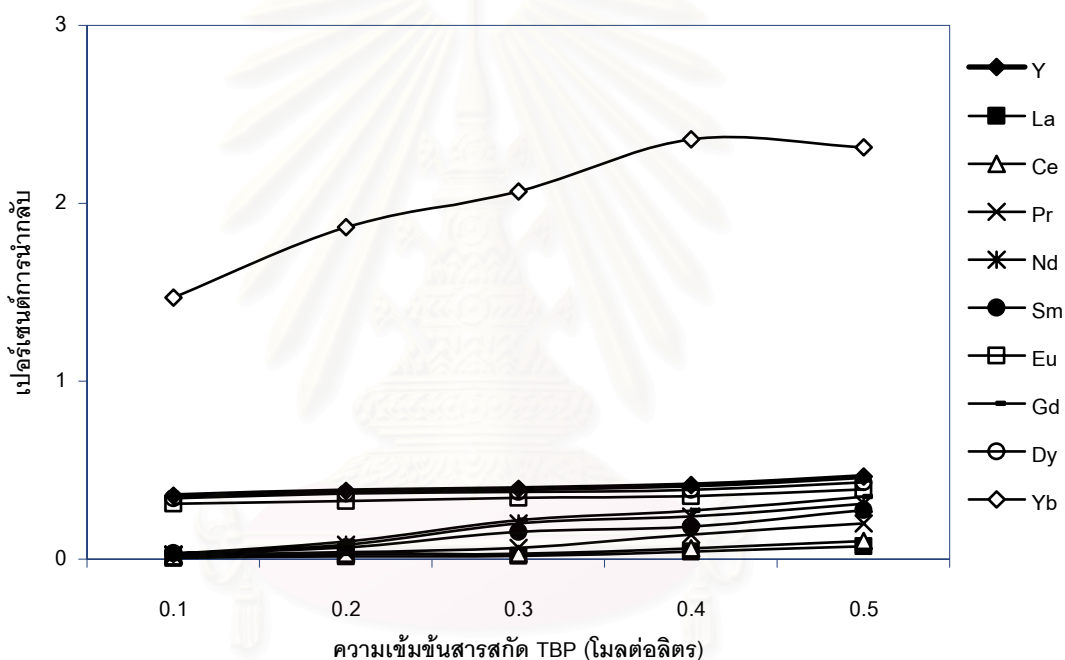
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการสกัดด้วยสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าให้ผลการสกัดที่ดีมีเปอร์เซ็นต์การสกัดสูงแต่ให้ผลไม่ดีเท่ากับการใช้สารสกัดผสม TBP กับ Cyanex 272 และผลการสกัดที่ได้ก็ไม่แตกต่างกับการใช้สารสกัด D2EHPA หรือ Cyanex 272 ชนิดเดียว ซึ่งตามหลักการสกัดแบบเสริมฤทธิ์คือ การสกัดไอออนของธาตุหายากโดยใช้สารสกัดสองชนิดมาผสมกันแล้วได้ประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อเทียบกับการนำสารสกัดทั้งสองชนิดนั้นมาแยกกันสกัดแล้วนำผลการสกัดมารวมกัน แต่จากผลที่ได้ไม่เป็นไปตามเช่นนั้นรวมทั้งยังมีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นที่ปะปนออกมาเป็นจำนวนมาก เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้นผลการสกัดมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น เป็นไปตามเหตุผลเดียวกับหัวข้อ 4.13

4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกต่อการนำกลับไอออนอิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

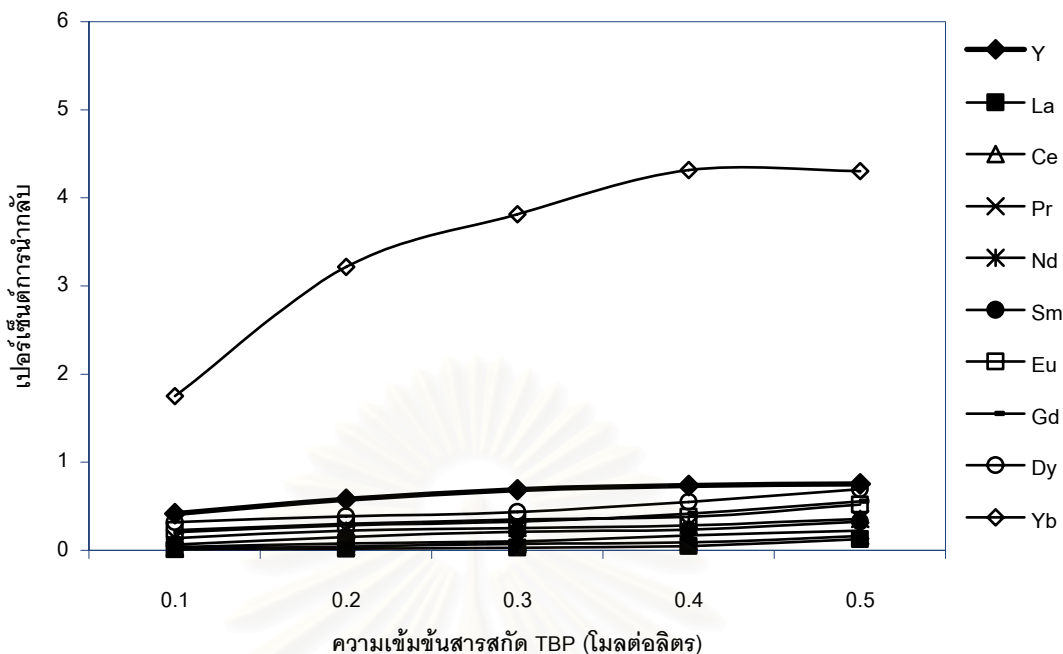
4.6.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกเมื่อใช้สารสกัด TBP

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกที่มีต่อการนำกลับไอออนอิตเทรียม โดยได้ทดลองที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นสารสกัด TBP 0.1-0.5 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด TBP ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

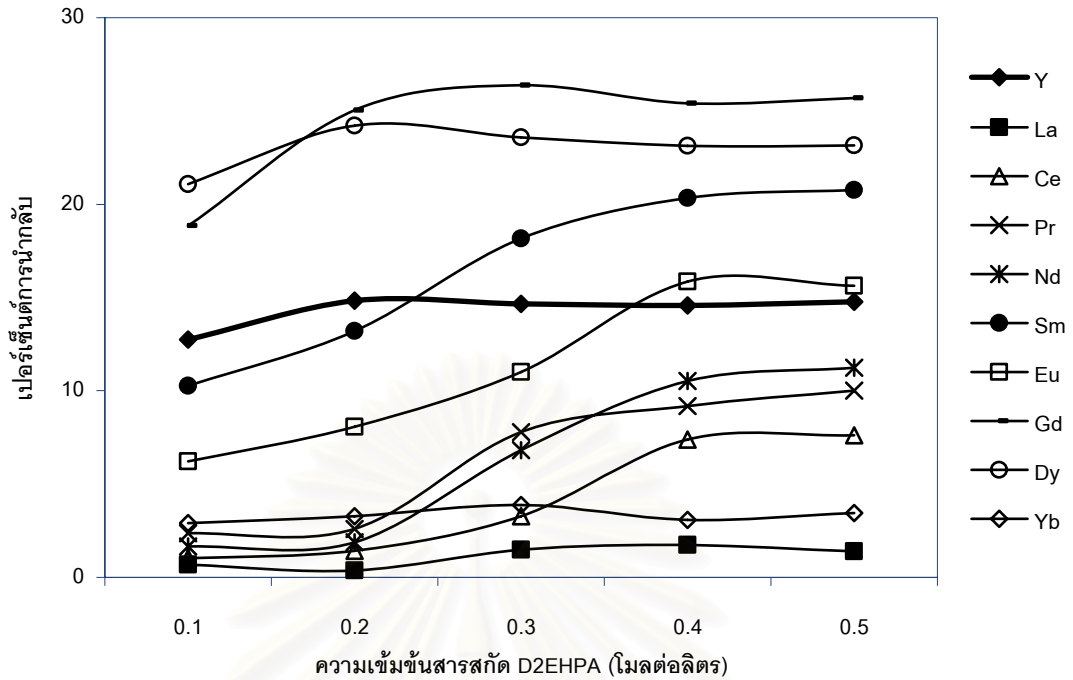


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด TBP ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร

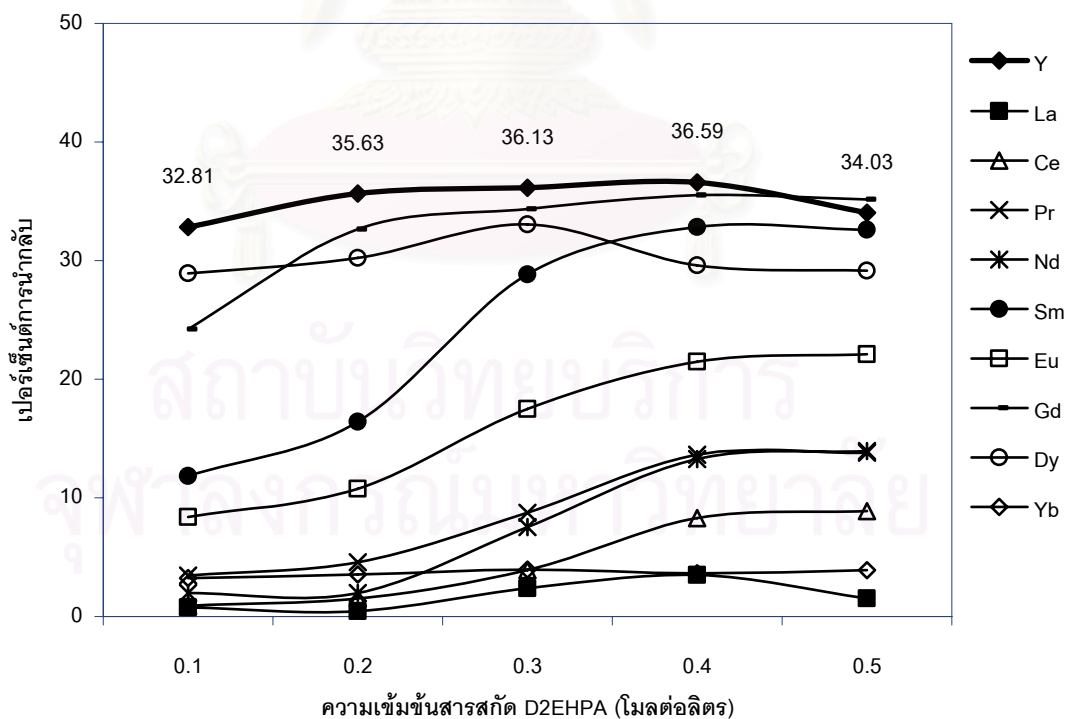
จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 ผลการนำกลับด้วยสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร ตามลำดับ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ต่ำมากโดยเฉพาะไอออนอิตเทรียมจะมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ต่ำมากซึ่งเป็นไปตามเปอร์เซ็นต์การสกัดซึ่งมีค่าต่ำมากเช่นกัน เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเปอร์เซ็นต์การนำกลับก็ไม่แตกต่างจากเดิม

4.6.2 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกเมื่อใช้สารสกัด D2EHPA

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกที่มีต่อการนำกลับไอออนอิตเทรียม โดยได้ทดลองที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA 0.1-0.5 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร

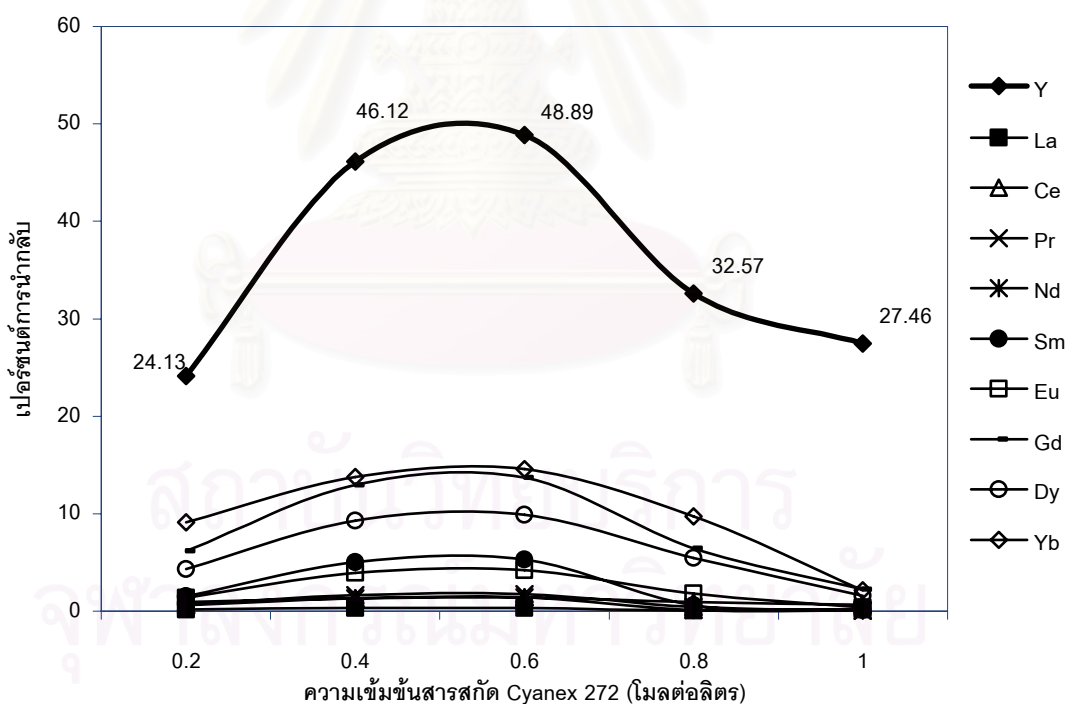


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร

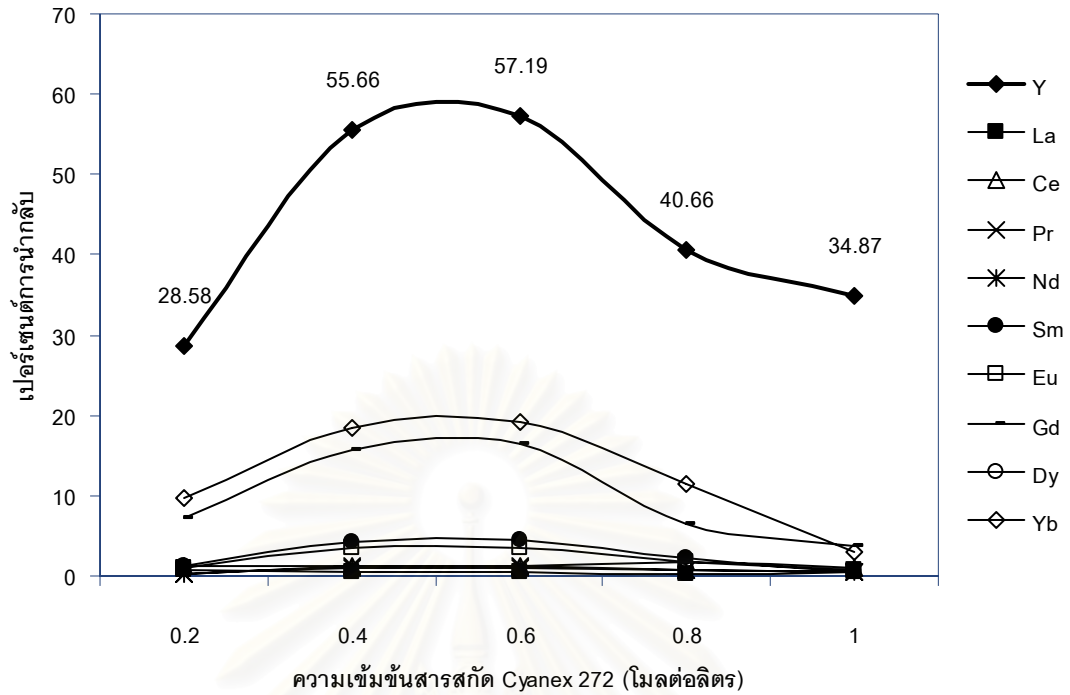
จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 ผลการนำกลับด้วยสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร ตามลำดับ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ดีโดยเฉพาะไอออนอิตเทรียมจะมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ดีขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นสารละลายนำกลับ แต่พบว่ามีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นที่ปะปนออกมาเป็นจำนวนมาก

4.6.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกเมื่อใช้สารสกัด Cyanex 272

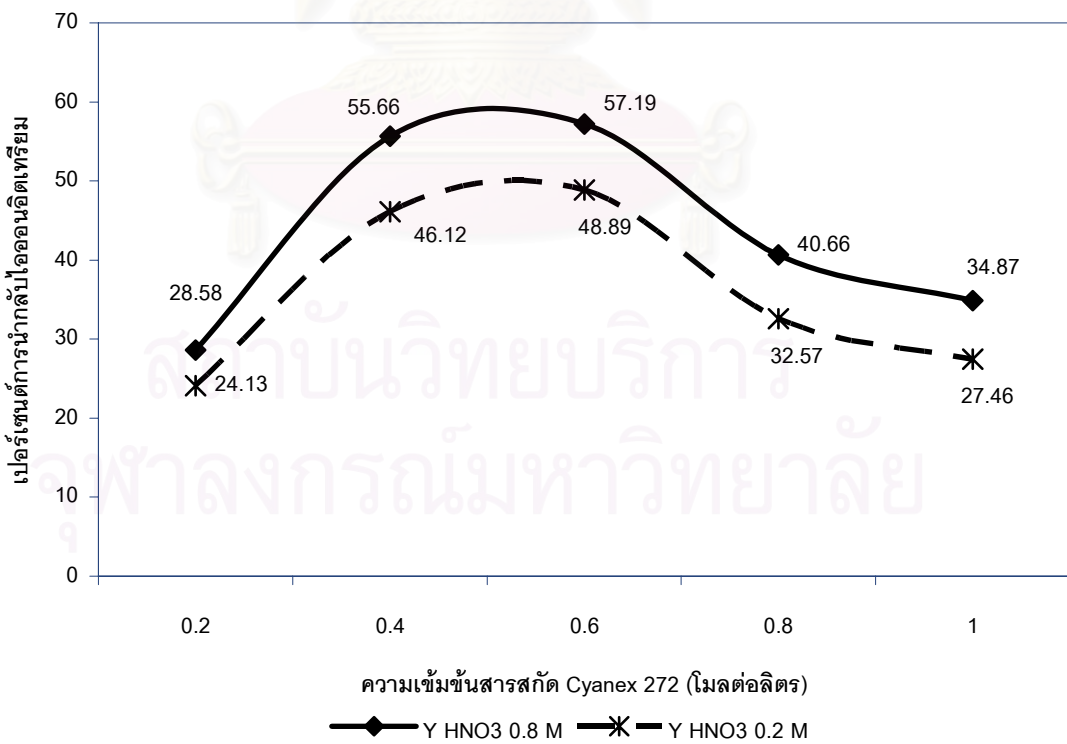
การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกที่มีต่อการนำกลับไอออนอิตเทรียม โดยได้ทดลองที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272 เป็น 0.2-1.0 โมลต่อลิตร ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 และผลของการสกัดต่อเวลาและต่อความเข้มข้นสารละลายนำกลับในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร เมื่อใช้ความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272 เป็น 0.4 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



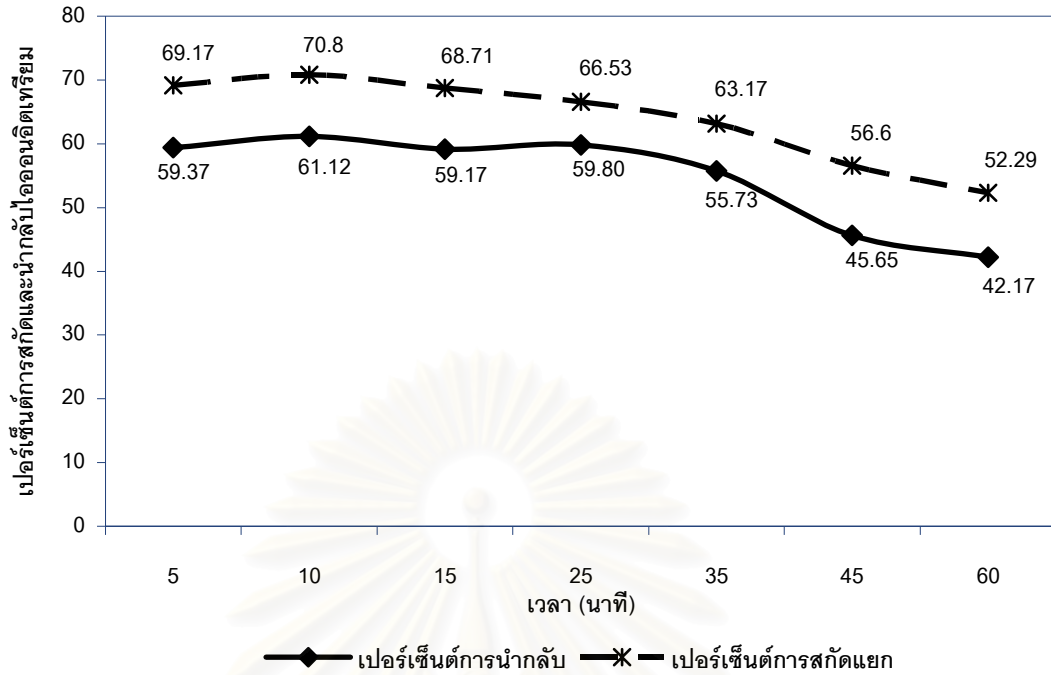
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร



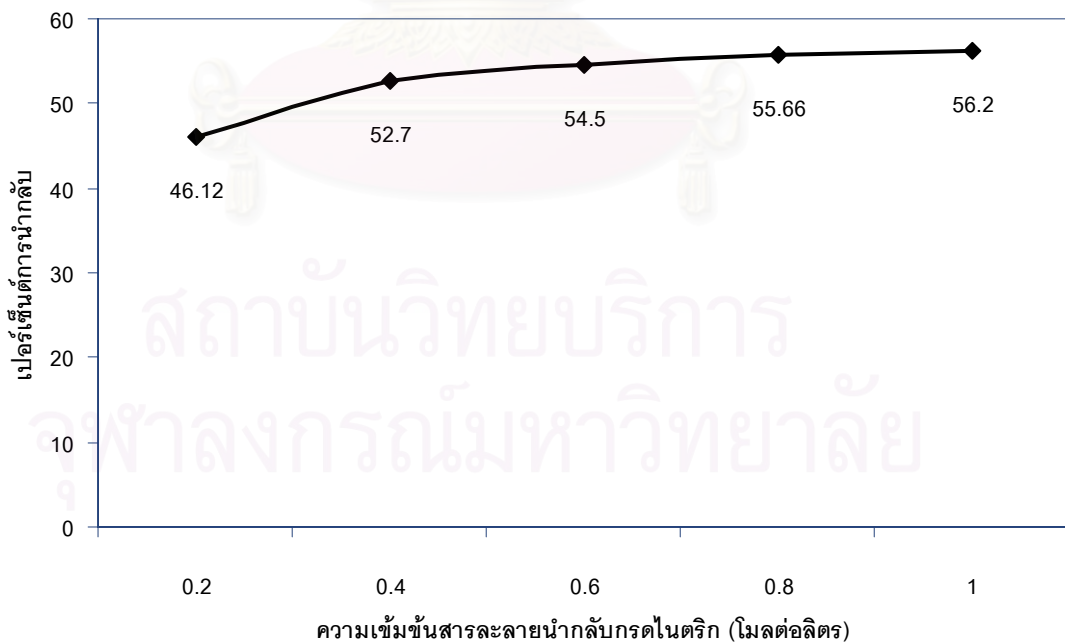
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนิตเทียมกับความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิตเตรียมกับเวลาในการนำกลับของสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร ที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร

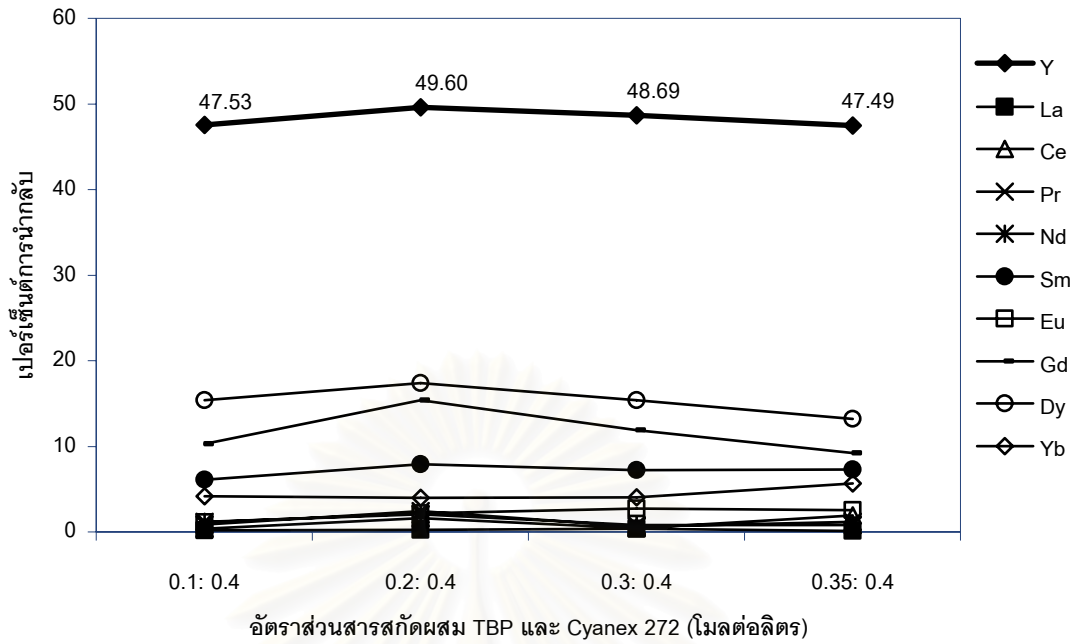


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิตเตรียมกับความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกต่างๆ โดยใช้สารสกัด Cyanex 272 ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร

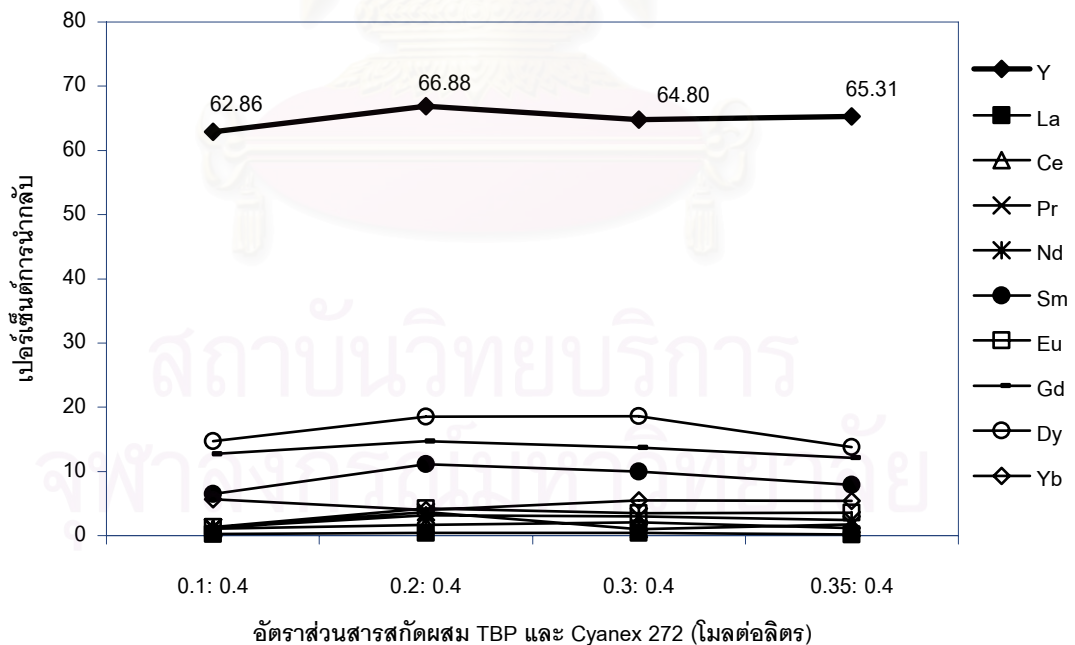
จากรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ผลการนำกลับด้วยสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าให้เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ดีมากโดยเฉพาะไอออนอิตเทรียมจะมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับที่สูง และยังพบว่าไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นที่ปะปนออกมาเป็นจำนวนน้อยมาก จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นสารละลายนำกลับจะสามารถนำกลับไอออนอิตเทรียมได้มากขึ้นอีกด้วยและมีค่าคงที่ในช่วง 0.4-1.0 โมลต่อลิตร เวลาในการนำกลับช่วงแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นและจะเริ่มลดลงต่อมา เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงพบว่าสารละลายเยื่อแผ่นเหลืองยังสามารถทำการสกัดได้แต่จะมีค่าต่ำกว่าในช่วงต้น

4.6.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกเมื่อใช้สารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272

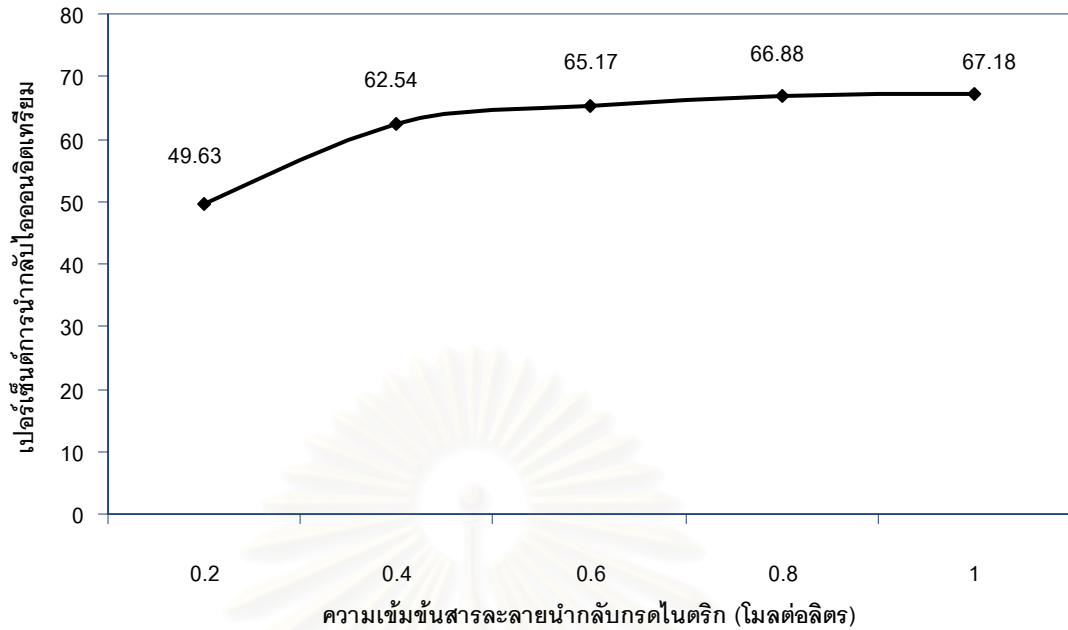
การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกที่มีต่อการนำกลับไอออนอิตเทรียม โดยได้ทดลองที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 อัตราส่วนสารสกัดผสม 0.1: 0.4, 0.2: 0.4, 0.3: 0.4 และ 0.35: 0.4 โมลต่อลิตร ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.18 และ 4.19 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตรและผลเปรียบเทียบการใช้สารสกัดผสมกับการใช้สารสกัดชนิดเดียว เมื่อใช้ความเข้มข้นสารสกัดผสม TBP: Cyanex 272 เป็น 0.2: 0.4 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.20 และ 4.21



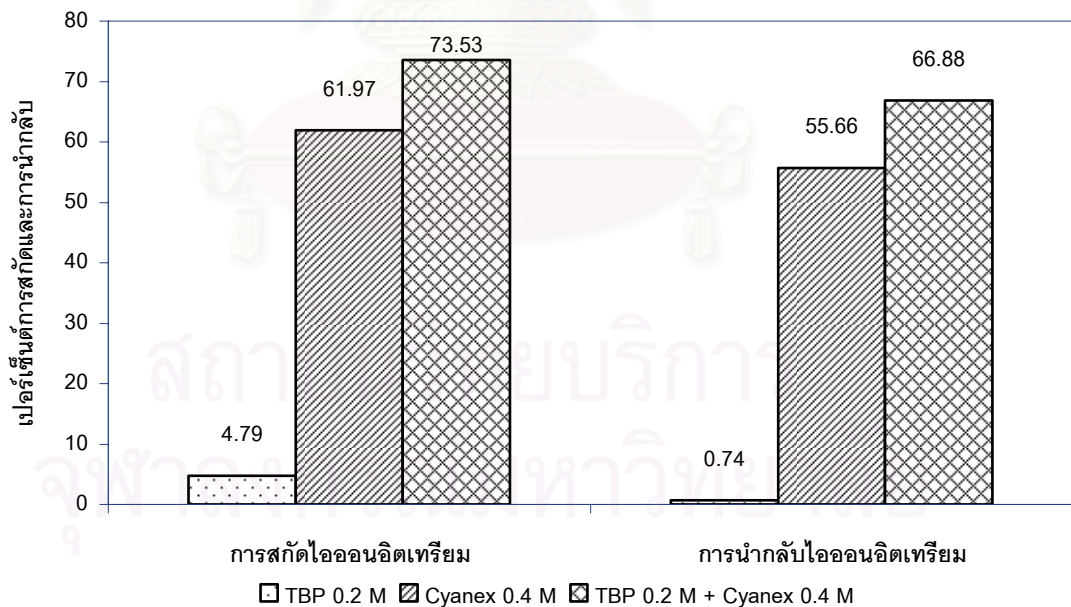
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ และความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ และความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิตเตรียมกับความเข้มข้นสารละลายน้ำกลั่นกรดไนตริกต่างๆ โดยใช้สารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.2: 0.4 โมลต่อลิตร

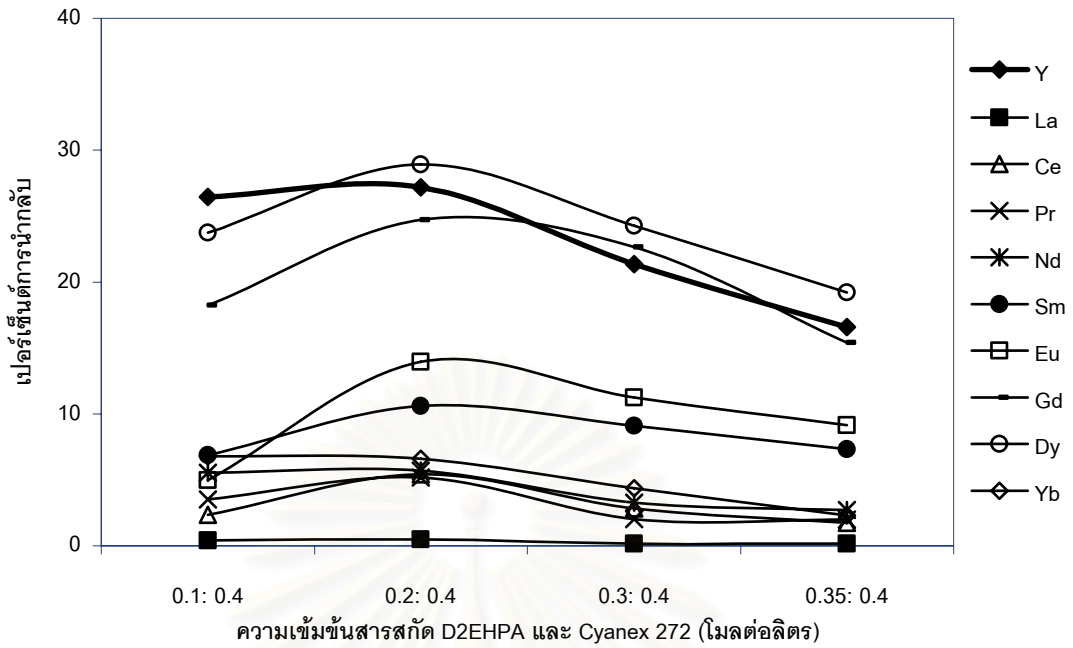


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิตเตรียมเมื่อใช้สารสกัด TBP ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร หรือ Cyanex 272 ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร ชนิดเดียวกับการใช้สารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.2: 0.4 โมลต่อลิตร

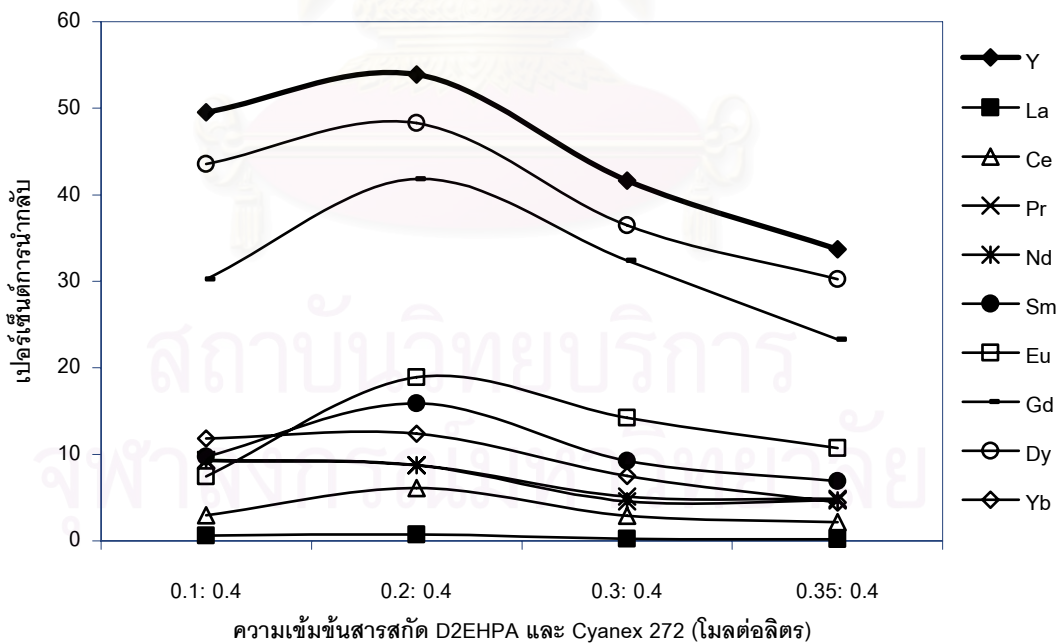
จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 ผลการนำกลับด้วยสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าให้เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ดีมากและโดยเฉพาะไอออนนิตเตรียม จะมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับที่สูงมาก และมีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นปะปนออกมาเป็นจำนวนน้อยมาก จากรูปที่ 4.20 เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นสารละลายนำกลับจะสามารถนำกลับไอออนไอออนนิตเตรียมได้มากขึ้นอีกด้วยในช่วงแรกและมีค่าคงที่ในช่วง 0.4-1.0 โมลต่อลิตร จากรูปที่ 4.21 เปรียบเทียบผลจากการใช้สารสกัด Cyanex 272 ชนิดเดียวกับใช้สารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 พบว่าสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ให้ผลการสกัดและการนำกลับที่ดีขึ้นเมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.20 พบว่าความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกที่ความเข้มข้น .ในช่วง 0.4-1.0 โมลต่อลิตร ให้ผลการนำกลับไอออนนิตเตรียมไม่แตกต่างกันมาก การทดลองขั้นต่อไปในระบบสองหอสกัดจึงเลือกใช้ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกเป็น 0.4 โมลต่อลิตรในการนำกลับไอออนธาตุหายากในหอสกัดที่ 1 เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้สารละลายนำกลับกรดไนตริก และเพื่อที่จะได้ใช้ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกในการนำกลับไอออนธาตุหายากในหอสกัดที่ 2 ไม่สูงจนเกินไปเพื่อป้องกันความเสียหายที่มีต่ออุปกรณ์การทดลอง

4.6.5 ผลของความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกเมื่อใช้สารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก ที่มีต่อการนำกลับไอออนนิตเตรียม โดยได้ทดลองที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 อัตราส่วนสารสกัดผสม 0.1: 0.4, 0.2: 0.4, 0.3: 0.4 และ 0.35: 0.4 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.22 และ 4.23



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ และความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 โมลต่อลิตร

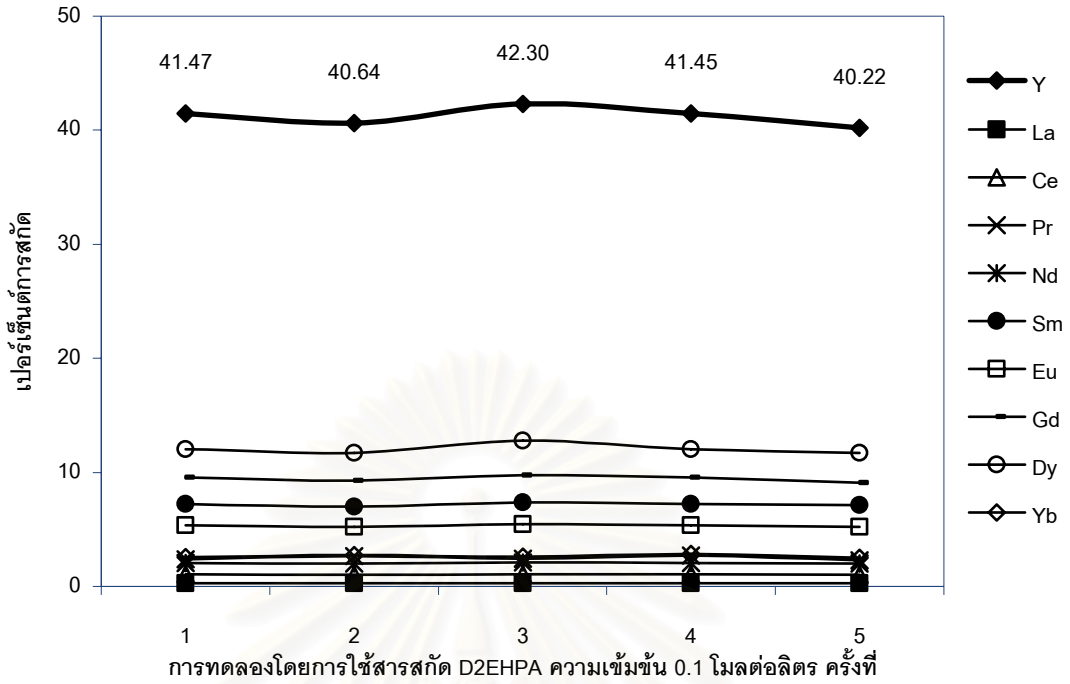


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนต่างๆ และความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.8 โมลต่อลิตร

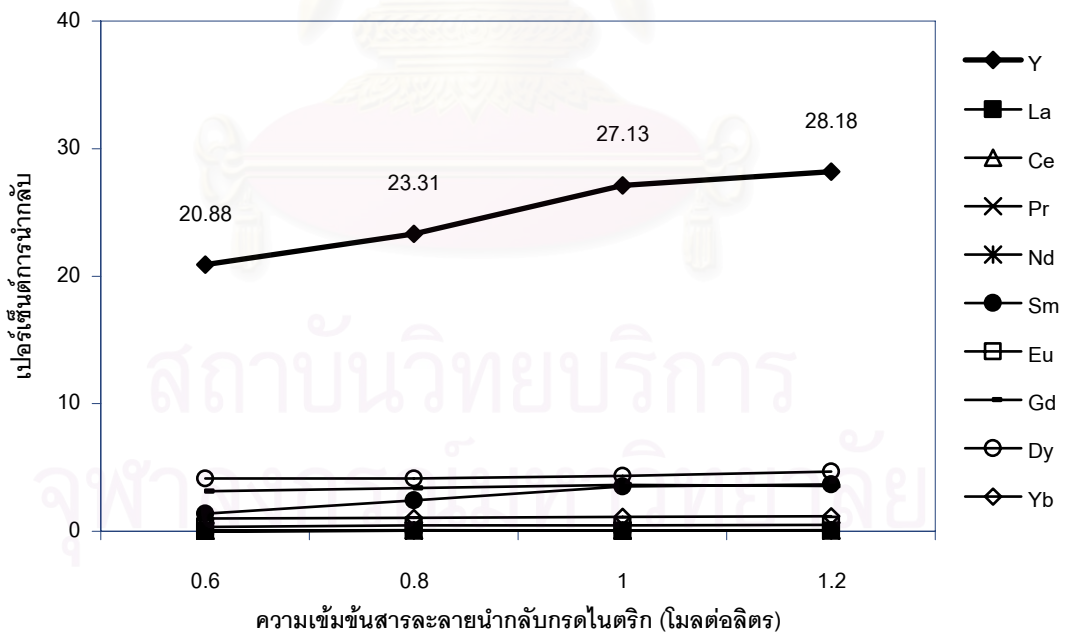
จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 ผลการนำกลับด้วยสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าให้เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ดี และเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นสารละลายนำกลับก็จะสามารถนำกลับไอออนธาตุของหายากได้มากขึ้น แต่มีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นที่ปะปนออกมาเป็นจำนวนมากและผลการนำกลับที่ได้ก็ไม่แตกต่างกับการนำกลับเมื่อใช้สารสกัด Cyanex 272 ชนิดเดียว เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ผลการนำกลับมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การสกัดที่ลดลงในหัวข้อ 4.15

4.7 ภาวะที่เหมาะสมของระบบสองหอสกัดในการสกัดไอออนอิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พวยด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ศึกษาระบบการสกัดแบบสองหอสกัดโดยนำผลที่ได้จากปัจจัยต่างๆ ที่ศึกษา มาในขั้นต้น มาทำการทดลองในระบบสองหอสกัด โดยหอสกัดแรกมีภาวะดังนี้ สารสกัดที่ใช้จะเป็นสารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกเป็น 0.4 โมลต่อลิตร ถึงแม้จะใช้ความเข้มข้นสูงกว่านี้แล้วจะให้ผลการนำกลับที่ดีกว่าแต่จะไม่แตกต่างกันมากในช่วง 0.4-1.0 โมลต่อลิตร โดยนำสารละลายนำกลับขาออกจากหอสกัดแรกเป็นสารละลายป้อนในหอสกัดสอง ซึ่งหอสกัดสองมีภาวะดังนี้ สารสกัดที่ใช้จะเป็นสารสกัด D2EHPA เพียงชนิดเดียว เนื่องจากให้ผลการสกัดที่มีเปอร์เซ็นต์ไอออนอิตเทรียมสูงมากเมื่อใช้ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นต่ำ แต่จะมีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นปะปนมาเป็นจำนวนมากแต่เมื่อผ่านกระบวนการสกัดจากหอสกัดแรกมาแล้ว ไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นที่ปะปนมาจะมีจำนวนน้อยลงมาก เนื่องจากหอสกัดแรกสารสกัดที่ใช้มีค่าคัดเลือกที่สูง ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA เป็น 0.1 โมลต่อลิตร และทำการทดลองหาความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกที่เหมาะสมโดยจะทดลองในช่วงความเข้มข้น 0.4-1.2 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในทั้งสองหอสกัดเป็น 100 มิลลิลิตรต่ออนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียวผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.24 และ 4.25



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 2 โดยสารสกัดที่ใช้คือ D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

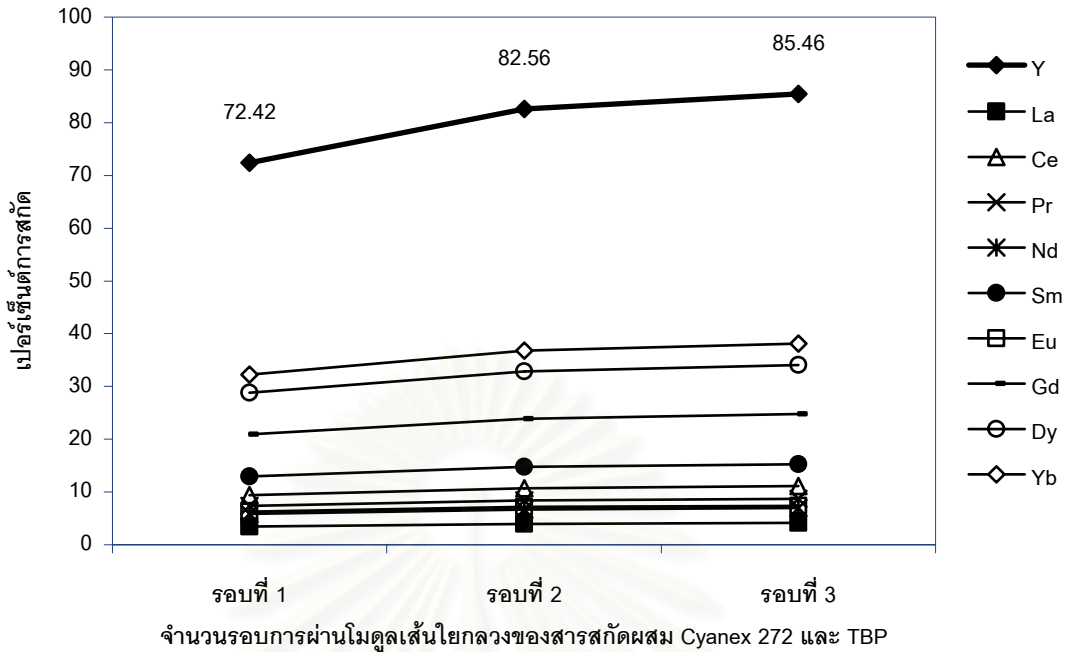


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.6-1.2 โมลต่อลิตร

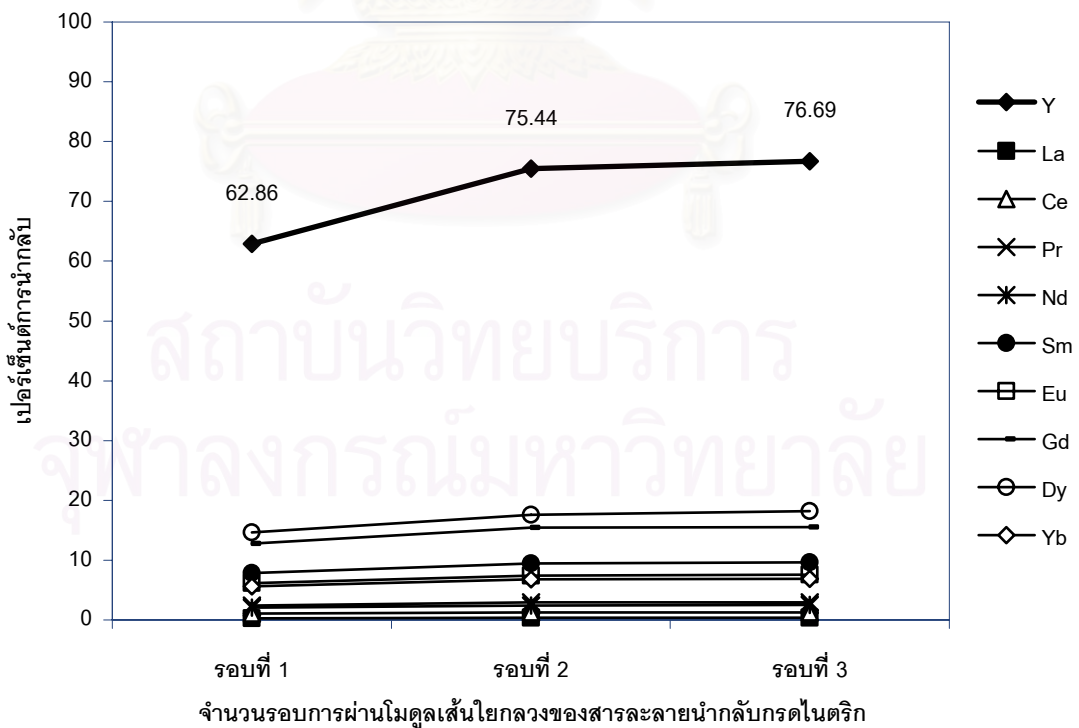
จากรูปที่ 4.24 ผลการสกัดต่อเนื่องจากหอสกัดที่ 1 ซึ่งเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารสกัดผสมของ Cyanex 272 กับ TBP ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร ด้วยสารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดที่ 2 พบว่าการทดลองให้ผลที่ใกล้เคียงกันในทุกๆ ครั้ง เพอร์เซ็นต์การสกัดไอออนนิตเตรียมมีค่าที่สูง มีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นปะปนออกมาจำนวนน้อยมาก จากรูปที่ 4.25 ผลการนำกลับด้วยสารละลายกรดไนตริกพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายนำกลับจะสามารถนำกลับไอออนนิตเตรียมได้มากขึ้นมีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นปะปนออกมาเป็นจำนวนน้อยมาก ทำให้ความบริสุทธิ์ของไอออนนิตเตรียมดีขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารละลายนำกลับ ผลของการนำกลับไอออนของธาตุหายากก็จะมีค่าที่ดีขึ้น แต่สาเหตุที่ไม่สามารถเพิ่มความเข้มข้นสารละลายนำกลับได้มากกว่านี้เพราะถ้าค่าความเป็นกรดต่างของวัฏภาคสารละลายนำกลับต่ำเกินไป ส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์การทดลองอาจได้รับความเสียหายได้ (Baker และ Blume, 1990) นอกจากนี้การใช้สารนำกลับที่มีความเป็นกรดมากก็จะนำไปสู่ปัญหาหมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ในแง่การกำจัด และการรั่วไหลที่อาจเกิดขึ้นได้ (Xiabo Sun et al., 2006)

4.8 ผลของการเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในโมดูลต่อการสกัดและนำกลับไอออนนิตเตรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

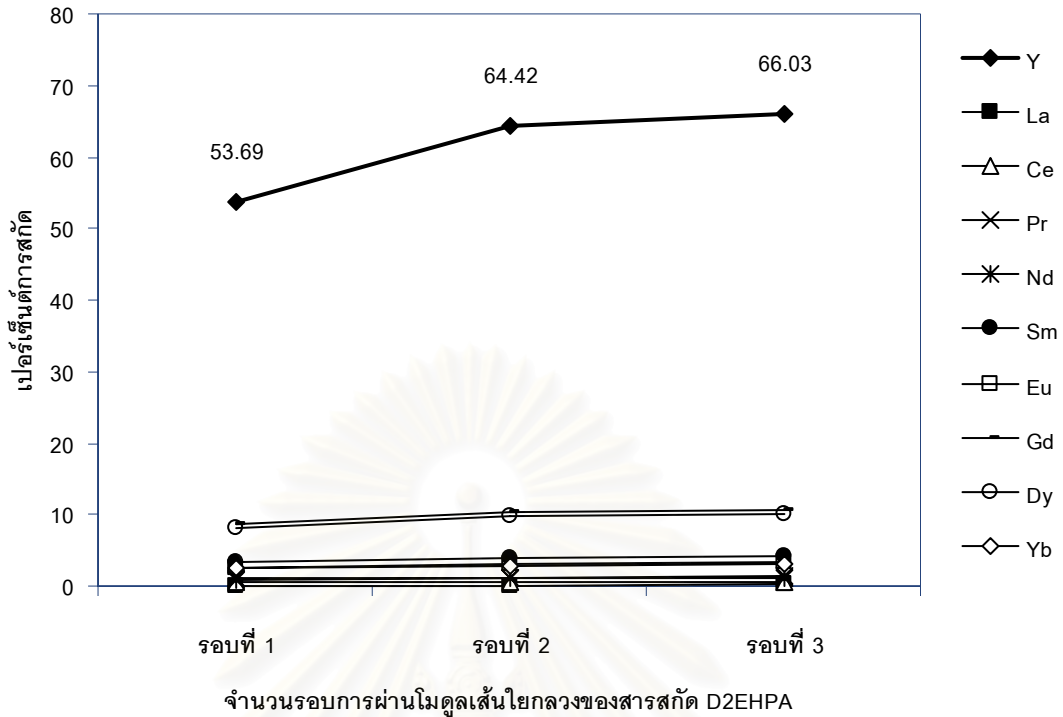
การทดลองนี้ได้นำภาวะการทดลองที่ได้ศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมา ได้แก่ หอสกัดแรก ซึ่งสารสกัดที่ใช้คือ สารสกัดผสม Cyanex 272 กับ TBP ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.4 โมลต่อลิตร หอสกัดสอง ซึ่งสารสกัดที่ใช้ คือ D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 1.2 โมลต่อลิตร นำมาทดลองเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงโดยการวนรอบสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในทั้งสองหอสกัดเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นกรไหลผ่านครั้งเดียวผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.26, 4.27, 4.28 และ 4.29



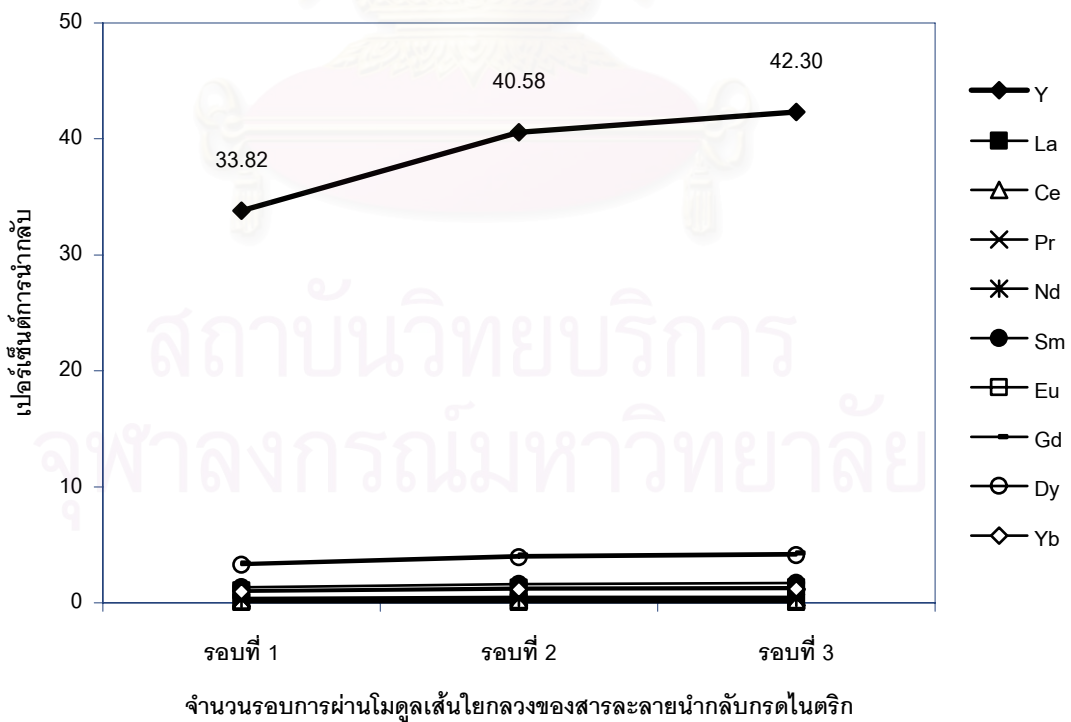
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับจำนวนรอบการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงของสารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากกับจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากกับจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 1.2 โมลต่อลิตร

จากรูปที่ 4.26, 4.27, 4.28 และ 4.29 ผลจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับกรดไนตริกในการสกัดแบบต่อเนื่อง โดยหอสกัดที่ 1 เยื่อแผ่นเหลวคือ สารสกัดผสม Cyanex 272 กับ TBP ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ 0.4 โมลต่อลิตร หอสกัดที่ 2 เยื่อแผ่นเหลวคือ สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ 1.2 โมลต่อลิตร พบว่าการเพิ่มจำนวนรอบสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกรดไนตริก สามารถเพิ่มค่าการสกัดและการนำกลับได้มากกว่าการสกัดและนำกลับรอบเดียว โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นในรอบที่ 2 ของการสกัดและการนำกลับ และมีค่าคงที่ในรอบที่ 3 การสกัดในรอบที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นน้อยเพราะว่า ไฮโดรเนียมไอออนที่ถ่ายเทจากสารละลายนำกลับไปยังสารละลายป้อนมีค่ามากขึ้น มีผลทำให้ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนทั้งสองฝั่งมีค่าลดลง เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นทำให้การถ่ายเทมวลที่อาศัยแรงขับเคลื่อนระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนทั้งสองฝั่งมีค่าน้อยลง เป็นผลให้การสกัดมีค่าลดลง อีกทั้งการสกัดจำนวน 3 รอบ ซึ่งใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 150 นาที มีผลทำให้เยื่อแผ่นเหลวเสื่อมสภาพลงเนื่องจากการหลุดของสารสกัดจากเยื่อแผ่นเหลว (Hann et al., 1989) ซึ่งเห็นได้ว่าการสกัดไอออนอิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงให้ผลการทดลองที่ดี โดยขั้นตอนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 12 ขั้นตอน แบ่งเป็น การสกัด 6 ขั้นตอน และการนำกลับ 6 ขั้นตอน แต่การทดลองด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้นสามารถรวมขั้นตอนการสกัดและนำกลับไว้ในขั้นตอนเดียวกันได้ ดังนั้นขั้นตอนการทดลองทั้งหมดจึงเท่ากับ 6 ขั้นตอน ซึ่งน้อยการระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย และที่เปอร์เซ็นต์การสกัดที่เท่ากันระบบการสกัดด้วยตัวทำละลายใช้ขั้นตอนทั้งหมด แบ่งเป็น การสกัด 15 ขั้นตอน และการชะล้าง 10 ขั้นตอน สามารถทำการสกัดไอออนอิตเทรียมได้ร้อยละ 85 (Wei Li et al., 2007) การที่ขั้นตอนระบบลดลงสามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านค่าสารสกัดและลดเวลาในกระบวนการผลิตลงได้เป็นการประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการสกัดไอออนนิตเตรียมออกจากสารละลายผสมของไอออนธาตุหายากชนิดอื่นในอนุกรมแลนทาไนด์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด TBP, D2EHPA และ Cyanex 272 ความเข้มข้นของสารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP และสารสกัดผสม Cyanex 272 และ D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการสกัดระบบสองหอสกัด โดยกำหนดให้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิลิตร ต่อ นาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ความเข้มข้นของสารสกัด TBP และ D2EHPA ในช่วงที่ศึกษาคือ 0.1-0.5 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 ในช่วงที่ศึกษาคือ 0.2-1.0 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของสารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP และสารสกัดผสม Cyanex 272 และ D2EHPA ในอัตราส่วนที่ศึกษาคือ 0.4: 0.1, 0.4: 0.2, 0.4: 0.3 และ 0.4: 0.35 โมลต่อลิตร สรุปได้ว่า

- เมื่อใช้สารสกัด TBP หรือ D2EHPA ชนิดเดียว การสกัดไอออนนิตเตรียมและไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นๆ มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารสกัดเพิ่มขึ้น โดยที่สารสกัด D2EHPA สกัดไอออนนิตเตรียมได้ปริมาณที่เท่าๆ กันที่ทุกๆ ความเข้มข้น
- เมื่อใช้สารสกัด Cyanex 272 การสกัดไอออนนิตเตรียมและไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นๆ มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารสกัดเพิ่มขึ้น ในช่วง 0.2-0.6 โมลต่อลิตร และจะลดลงในช่วง 0.6-1.0 โมลต่อลิตร สาเหตุจากความหนืดของสารสกัดที่เพิ่มขึ้น
- เมื่อใช้สารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP และสารสกัดผสม Cyanex 272 และ D2EHPA การสกัดด้วยสารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP สกัดไอออนนิตเตรียมได้ปริมาณที่เท่าๆ กันที่ทุกๆ อัตราส่วน มีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นปะปนออกมาปริมาณน้อย และการสกัดด้วยสารสกัดผสม Cyanex 272 และ D2EHPA สกัดไอออน

อิตเตรียมได้สูงที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.1 และ 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร แต่จะลดลงที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.3 และ 0.4: 0.35 โมลต่อลิตร

- เมื่อเปรียบเทียบสารสกัดทั้ง 3 ชนิดคือ D2EHPA และ Cyanex 272 ให้ผลการสกัดไอออนอิตเตรียมได้ดีไม่แตกต่างกันมากแต่สารสกัด D2EHPA มีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นปะปนออกมามากกว่า ส่วนสารสกัด TBP ให้ผลการสกัดที่ต่ำมากๆ และเมื่อเปรียบเทียบผลการสกัดทั้งแบบใช้สารสกัดชนิดเดียวและใช้สารสกัดผสม พบว่าเมื่อใช้สารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP ให้ผลการนำกลับไอออนอิตเตรียมดีที่สุดมีไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นปะปนออกมาปริมาณน้อย ที่ภาวะการทดลอง คือ อัตราส่วนสารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP เป็น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการใช้สารสกัด Cyanex 272 และ TBP ชนิดเดียวที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าการใช้สารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP ให้ผลการสกัดที่ดีกว่า

2. ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร พบว่าการนำกลับไอออนอิตเตรียมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกมีค่าเพิ่ม และเมื่อพิจารณาในแต่ละสารสกัดที่ใช้จะได้ว่า

- สารสกัดที่ใช้ TBP และ D2EHPA ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.2 และ 0.8 โมลต่อลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้นสามารถนำกลับไอออนของธาตุหายากได้มากขึ้น
- สารสกัดที่ใช้ Cyanex 272 ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร พบว่าสามารถนำกลับไอออนของธาตุหายากได้เพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นสารละลายนำกลับ 0.2-0.6 โมลต่อลิตร และคงที่ในช่วง 0.6-1.0 โมลต่อลิตร
- สารสกัดผสมที่ใช้ Cyanex 272 และ TBP ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร พบว่าสามารถนำกลับไอออนของธาตุหายากเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นสารละลายนำกลับ 0.2-0.6 โมลต่อลิตร และคงที่ในช่วง 0.6-1.0 โมลต่อลิตร

3. เวลาในการสกัดและนำกลับไอออนนิตเทรียมที่ทุกๆ สารสกัดที่ใช้ พบว่าในช่วงเวลา 0-10 นาที มีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงเวลา 10-40 นาที มีค่าการสกัดคงที่ และลดลงอย่างมากในช่วงเวลา 40-60 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที พบว่ายังสามารถสกัดไอออนของธาตุหายากได้แต่จะมีปริมาณที่ต่ำกว่าในช่วงแรกมาก

4. การทดลองระบบสองหอสกัดเมื่อภาวะหอสกัดที่ 1 เยื่อแผ่นเหลวคือ สารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกเป็น 0.4 โมลต่อลิตร ที่ทุกๆ การทดลอง ภาวะหอสกัดที่ 2 เยื่อแผ่นเหลวคือ สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริกในช่วง 0.6-1.2 โมลต่อลิตร สรุปได้ว่า

- การสกัดในหอสกัดที่ 2 สามารถสกัดไอออนนิตเทรียมได้ผลที่ดีและพบว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้นสามารถนำกลับไอออนนิตเทรียมได้มากขึ้น แต่มีปริมาณการสกัดที่ได้ไม่สูงมาก จึงปรับปรุงโดยการสกัดแบบวนซ้ำ

5. ผลจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกรดไนตริกการในการสกัดแบบต่อเนื่อง โดยหอสกัดที่ 1 เยื่อแผ่นเหลวคือ สารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.4 โมลต่อลิตร หอสกัดที่ 2 เยื่อแผ่นเหลวคือ สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับกรดไนตริก 1.2 โมลต่อลิตร พบว่าการเพิ่มจำนวนรอบการผ่านโมดูลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสามารถเพิ่มค่าการสกัดและการนำกลับได้มากกว่าการสกัดและนำกลับรอบเดียว จากตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 ความบริสุทธิ์ของไอออนนิตเทรียมจากสารตั้งต้นคิดเป็นร้อยละ 9.4 เมื่อผ่านการสกัดและนำกลับเป็นจำนวน 3 รอบ ในหอสกัดที่ 1 ความบริสุทธิ์ของไอออนนิตเทรียมจากเริ่มต้นคิดเป็นร้อยละ 62.07 และเมื่อผ่านการสกัดและนำกลับเป็นจำนวน 3 รอบ ในหอสกัดที่ 2 ความบริสุทธิ์ของไอออนนิตเทรียมจากเริ่มต้นคิดเป็นร้อยละ 81.13 ซึ่งเห็นได้ว่าการสกัดไอออนนิตเทรียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยางค์ด้วยเส้นใยกลวงให้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ตารางที่ 5.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก

ชนิดธาตุหายาก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความบริสุทธิ์คิดเป็นร้อยละ
Y	472.93	9.4
La	1429	28.39
Ce	127.1	2.53
Pr	648.42	12.88
Nd	875.67	17.4
Sm	908	18.04
Eu	14.97	0.3
Gd	457.73	9.1
Dy	71.3	1.42
Yb	27.59	0.55
Total	5032.71	100.00

ตารางที่ 5.2 ความเข้มข้นของธาตุหายากหลังการนำกลับในรอบที่ 3 หอสกัดที่ 1

ชนิดธาตุหายาก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความบริสุทธิ์คิดเป็นร้อยละ
Y	362.71	62.07
La	4.66	0.8
Ce	1.64	0.28
Pr	19.28	3.3
Nd	21.56	3.69
Sm	87.29	14.94
Eu	1.13	0.19
Gd	71.19	12.18
Dy	12.97	2.22
Yb	1.89	0.32
Total	584.33	100.00

ตารางที่ 5.3 ความเข้มข้นของธาตุหายากหลังการนำกลับในรอบที่ 3 หอสกัดที่ 2

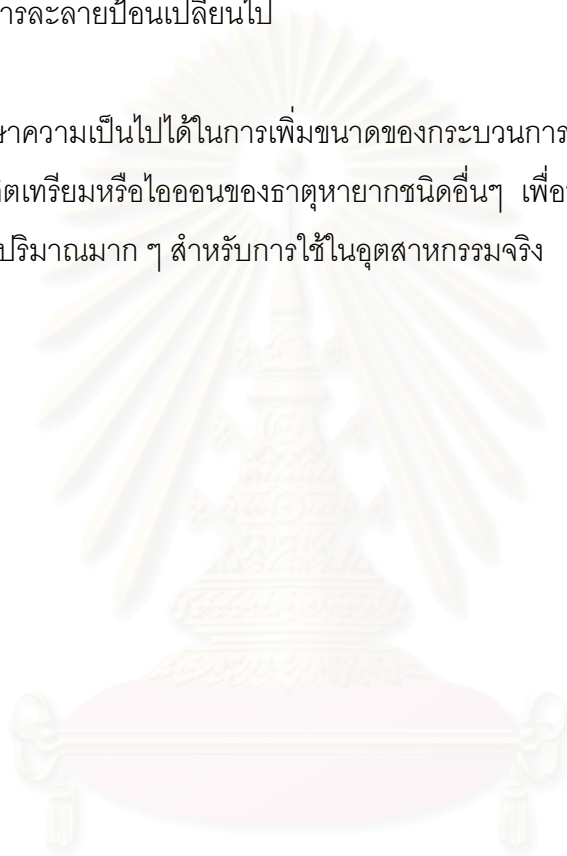
ชนิดธาตุหายาก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความบริสุทธิ์คิดเป็นร้อยละ
Y	200.07	81.13
La	0.84	0.34
Ce	0.29	0.12
Pr	3.35	1.36
Nd	3.77	1.53
Sm	15.28	6.19
Eu	0.2	0.08
Gd	19.58	7.94
Dy	2.92	1.18
Yb	0.33	0.13
Total	246.61	100.00

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาผลของความเข้มข้นของของสารละลายนำกลับกรดไนตริกที่มีต่อการนำกลับไอออนอิตเทรียมในระบบสองหอสกัด พบว่าปริมาณการนำกลับสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารละลายนำกลับมีค่ามากขึ้น แต่ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ นั้นถูกจำกัดด้วยความสามารถในการต้านทานของเส้นใยกลวง ซึ่งสามารถทนความเป็นกรดได้ ไม่เกิน 1.0 โมลต่อลิตร ดังนั้นการนำกลับไอออนอิตเทรียมยังมีแนวโน้มสูงขึ้นถ้าหากความเข้มข้นกรดไนตริกเพิ่มขึ้นได้
2. นอกจากการศึกษาชนิดสารสกัดที่ได้ใช้ในการทดลองนี้ ควรมีการศึกษาการใช้สารสกัดและปัจจัยต่างๆ ที่เคยใช้ในกระบวนการสกัดธาตุหายากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ที่ผ่านมามีเมื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นที่ใช้จากการเตรียมขึ้นมาเองมาเป็นสารตั้งต้นที่เป็นของจริงแล้ว ผลการทดลองจะสอดคล้องกันหรือไม่อย่างไร
3. ควรที่จะทดลองเปลี่ยนชนิดของสารสกัดเป็นชนิดอื่น ๆ ซึ่งการทดลองนี้ได้ใช้สารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกรดและกลาง โดยนำสารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกรดผสมกับสารสกัดที่มีฤทธิ์เป็น

กลาง และนำสารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกรดผสมกับสารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกรด โดยการลองเปลี่ยนไปใช้สารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นเบสผสมกับสารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกลาง หรือสารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นเบสผสมกับสารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกรด เป็นต้น

4. ควรศึกษาผลของความเป็นกรดเป็นด่างในสารละลายป้อนว่ามีผลอย่างไรต่อการสกัดธาตุหายาก เพราะสารสกัดบางชนิดอาจให้ค่าการสกัดที่ต่างกันเมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างในสารละลายป้อนเปลี่ยนไป
5. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มขนาดของกระบวนการการสกัดและการนำกลับไอออนอิตเทรียมหรือไอออนของธาตุหายากชนิดอื่นๆ เพื่อที่จะได้นำมาใช้กับสารละลายป้อนที่มีปริมาณมาก ๆ สำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมจริง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิทยาศาสตร์. 2532. เคมีทั่วไป. กรุงเทพมหานคร: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทรรชนก ประภาสวัสดิ. 2549. การแยกไอออนออร์ทีนิกโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิสิต สุไลมาน. 2544. การสกัดนีโอดีเนียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บริษัท Hefa Rare Earth จำกัด ประเทศแคนาดา. (2008). ราคาธาตุหายาก.

วีรวุฒิ ปัตทวิคองคา. 2546. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสกัดแยกไอออนที่เตรียมจากสารละลายผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกพิชญ์ ทรงคุณ. 2548. การถ่ายเทมวลโคบอลต์ไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

A. G. Gaikwad. Synergic transport of yttrium metal ions through supported liquid membrane. Chem. Biochem. Eng. Q. 17, 4 (2003): 327-334.

A. Tsuyoshi, H. Ito, H. Hoshi, K. Akiba and S. Nakamura. Separation of yttrium (III) from iron (III) through liquid membrane impregnated with D2EHPA. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 242, 2 (1999): 451-456.

- Bernadeta Gajda and Mariusz B. Bogacki. The effect of TBP on the extraction of nickel (II) and cobalt (II) ions with D2EHPA. Physicochemical Problems of Mineral Processing 41 (2007): 145-152. Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii 41 (2007): 145-152.
- D. Darvishia, D.F. Haghshenasa, E. Keshavarz Alamdarib, T, S.K. Sadrnezhaada and M. Halalia. Synergistic effect of Cyanex 272 and Cyanex 302 on separation of cobalt and nickel by D2EHPA. Hydrometallurgy 77 (2005): 227–238.
- Fiona M., D., Mark G. B., Juliana C. S., R.G. Bautista., Ding S. B., Hao X. K. and Ni D. Z. “Direct Production of Mixed, Rare Earth Oxide Feed for High Energy-Product Magnets”, In Rare Earths and Actinides. Science Technology and Applications 4 (2000): 31-44.
- Ivan Ondino de Carvalho Masson and Osvaldo Galvão Caldas da Cunha. Extraction of heavy rare earth and yttrium with a phosphonic solvent. CETEM 51, 1 (2002): 1-8.
- Izatt, R, M., Lamp, J, D., and Bruening, R, L. Comparison of bulk, emulsion, thin sheet supported, and hollow fiber supported liquid membrane in macrocycle-mediated cation separation. Separation Science and Technology 23 (1988): 1645—1658.
- Marr, R. and Kopp, A. Liquid membrane technology a survey of phenomena, Mechanism and Models. Ind. Chem. Eng. 22, 1 (1989): 44-60.
- M. Atanassova, I.L. Dukov. Solvent extraction and separation of lanthanoids with mixtures of chelating extractant and 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol. Separation and Purification Technology 49 (2006): 101–105.
- O’ Hara, P.A., and Bohrer, M.P. Supported liquid membrane for copper transport. Journal of Membrane Science 44 (1989): 273—287.

- Qiong Jia, Wuping Liao, Deqian Li and Chunji Niu. Synergistic extraction of lanthanum (III) from chloride medium by mixtures of 1-phenyl-3-methyl-4-benzoyl-pyrazalone-5 and triisobutylphosphine sulphide. *Analytica Chimica Acta* 477 (2003): 251–256.
- Ramakul Prakorn and Panchareon Ura. Synergistic extraction of mixture of lanthanum and neodymium by hollow fiber supported liquid membrane. *Korean J. Chem. Eng.* 20, 4 (2003): 724-730.
- Ramakul, P., Pattaveekongka, W., and Pancharoen, U. Selective separation of trivalent and tetravalent lanthanide from mixture by hollow fiber supported liquid membrane. *J. Chin. Inst. Chem. Engrs.* 36, 5 (2005): 1-7.
- Ramakul, P., Pattaveekongka, W., and Pancharoen, U. Mass transfer modeling of membrane carrier system for extraction of Ce(IV) from sulfate media using hollow fiber supported liquid membrane. *Korean J. Chem. Eng.* 23, 1 (2006): 85-92.
- Ramakul, P., Songkun, E., Pattaveekongka, W., Hronec, M., and Pancharoen, U. Permeation study on the hollow fiber supported liquid membrane for the extraction of cobalt(II). *Korean J. Chem. Eng.* 23, 1 (2006): 117-123.
- Rathore, N. S., Sonawane, J.V., Kumar, A., Venugopalan, A. K., Singh, R. K., Bajpai, D. D., and Shukla, J. P. Hollow fiber supported liquid membrane: a novel technique for separation and recovery of plutonium from aqueous acidic wastes. *Journal of Membrane Science* (2001): 109-119.
- Sayed, S.A., Sami, T.M., and EL Tawab, A.A.A. 1996. Synergistic extraction of some rare Earth from nitrate medium by thenoyltrifluoroacetone and tri-n-octylamine. *Separation Science and Techonology* 31 (1996): 2579-2585.
- Sheng, S. F., Hideto, M., and Masaaki, T. Ce(III) recovery by supported liquid membrane using polyethylene hollow fiber prepared via thermally induced phase separation. *Separation and Purification Technology* (2004): 17-36.

Tavlarides, L.L., Bae, J.H. and Lee, C.K. Solvent Extraction, Membrane and Ion Exchange in Hydrometallurgical Dilute Metals Separation. Separation Science and Technology 22 (1987): 581—617.

Teramoto Masaaki, Masuyama, Hiedo, Takaya, Hitoshi, and Asano, Shigehiro. Development of Spiral-Type Supported Liquid Membrane Module for Separation and Concentration Metal Ions. Separation Science and Technology 22 (1987): 2175—2201.

Wei Li, Xianglan Wang, Shulan Meng, Deqian Li and Ying Xiong. Extraction and separation of yttrium from the rare earths with sec-octylphenoxy acetic acid in chloride media. Separation and Purification Technology 54 (2007): 164–169.

Xiaobo Sun, Junmei Zhao, Shulan Meng and Deqian Li. Synergistic extraction and separation of yttrium from heavy rare earths using mixture of sec-octylphenoxy acetic acid and bis (2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid. Analytica Chimica Acta 533 (2005): 83–88.

Xiaobo Sun, Jinping Wang , Deqian Li and Hongfei Li. Synergistic extraction of rare earths by mixture of bis (2,4,4-trimethylpentyl)phosphinic acid and Sec-nonylphenoxy acetic acid. Separation and Purification Technology 50 (2006): 30–34.

Yang, Ming-Chien, and Cussle, E.L. Designing Hollow Fiber Contractor. AIChE 32 (1986): 1910-1916.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลความเข้มข้นสารตั้งต้นในรูปสารละลายแอร์เวิร์ทไนเทรต

ชนิดไอออน	รัศมีอะตอม (10^{-12}) เมตร	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
Yttrium (Y)	162	472.93
Lanthanum (La)	195	1429.00
Cerium (Ce)	185	127.10
Praseodymium (Pr)	185	648.42
Neodymium (Nd)	185	875.67
Samarium (Sm)	185	908.00
Europium (Eu)	185	14.97
Gadolinium (Gd)	180	457.73
Dysprosium (Dy)	175	71.30
Ytterbium (Yb)	175	27.59
Total		5032.71

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยสารสกัด TBP ช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การสกัดที่ความเข้มข้นสารสกัด TBP				
	0.1 M	0.2 M	0.3 M	0.4 M	0.5 M
Y	0.917	3.228	4.674	4.793	4.615
La	0.132	1.674	2.647	2.984	3.219
Ce	0.417	1.76	2.423	3.251	3.683
Pr	0.377	1.921	2.461	3.423	3.517
Nd	0.471	2.083	3.332	4.178	3.952
Sm	0.585	2.583	3.817	4.323	4.471
Eu	0.63	2.678	3.973	4.508	4.319
Gd	0.721	2.856	3.621	4.575	4.563
Dy	0.694	2.942	4.292	4.752	4.782
Yb	0.863	3.435	5.127	5.171	4.839

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรด
ไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด TBP				
	0.1 M	0.2 M	0.3 M	0.4 M	0.5 M
Y	0.356	0.384	0.394	0.416	0.464
La	0.005	0.014	0.017	0.041	0.073
Ce	0.014	0.029	0.031	0.061	0.102
Pr	0.022	0.039	0.063	0.138	0.201
Nd	0.027	0.082	0.201	0.239	0.312
Sm	0.034	0.067	0.152	0.184	0.275
Eu	0.310	0.326	0.345	0.354	0.392
Gd	0.031	0.099	0.218	0.271	0.351
Dy	0.341	0.367	0.377	0.389	0.432
Yb	1.469	1.865	2.067	2.358	2.315

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้นความเข้มข้น
0.2 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2-2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรด
ไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด TBP				
	0.1 M	0.2 M	0.3 M	0.4 M	0.5 M
Y	0.417	0.579	0.691	0.737	0.752
La	0.013	0.021	0.029	0.049	0.126
Ce	0.017	0.044	0.071	0.093	0.165
Pr	0.039	0.079	0.101	0.169	0.221
Nd	0.138	0.226	0.253	0.282	0.354
Sm	0.069	0.152	0.211	0.238	0.323
Eu	0.228	0.302	0.348	0.381	0.521
Gd	0.204	0.285	0.327	0.418	0.556
Dy	0.319	0.387	0.432	0.547	0.692
Yb	1.752	3.220	3.817	4.316	4.304

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยสารสกัด D2EHPA ช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การสกัดที่ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA				
	0.1 M	0.2 M	0.3 M	0.4 M	0.5 M
Y	66.05	67.30	67.47	67.48	67.58
La	1.32	0.59	2.62	4.42	2.33
Ce	1.12	2.02	5.58	11.65	10.09
Pr	4.42	5.45	10.55	16.56	16.40
Nd	3.31	3.71	8.74	15.60	15.43
Sm	14.13	20.94	30.99	38.71	40.59
Eu	9.94	13.55	19.75	25.80	26.44
Gd	33.62	47.71	55.05	58.16	59.52
Dy	46.80	49.61	51.27	53.81	52.70
Yb	3.94	4.15	4.37	3.44	4.72

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรด
ไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA				
	0.1 M	0.2 M	0.3 M	0.4 M	0.5 M
Y	12.73	14.84	13.14	14.28	14.77
La	0.68	0.38	1.49	1.75	1.40
Ce	1.03	1.42	3.27	7.38	7.61
Pr	2.37	2.59	7.78	9.18	10.02
Nd	1.65	1.88	6.81	10.52	11.23
Sm	10.28	13.20	18.18	20.33	20.77
Eu	6.23	8.07	11.01	15.86	15.63
Gd	18.86	25.03	26.38	25.41	25.70
Dy	21.07	24.21	23.57	23.12	23.17
Yb	2.90	3.28	3.89	3.09	3.46

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3-2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรด
ไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA				
	0.1 M	0.2 M	0.3 M	0.4 M	0.5 M
Y	32.81	35.63	36.13	36.59	34.03
La	0.76	0.46	2.38	3.49	1.52
Ce	0.88	1.53	3.88	8.28	8.89
Pr	3.45	4.56	8.73	13.62	13.82
Nd	1.95	1.99	7.52	13.28	13.93
Sm	11.85	16.41	28.86	32.83	32.61
Eu	8.37	10.78	17.50	21.50	22.13
Gd	24.20	32.64	34.37	35.51	35.17
Dy	28.94	30.23	33.07	29.61	29.14
Yb	3.23	3.55	3.93	3.63	3.91

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยสารสกัด Cyanex 272 ช่วง
ความเข้มข้น 0.2-1.0 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การสกัดที่ความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272				
	0.2 M	0.4 M	0.6 M	0.8 M	1.0 M
Y	36.47	61.97	65.17	48.96	35.40
La	4.71	8.21	9.03	2.77	2.24
Ce	6.67	11.17	12.29	4.09	3.74
Pr	8.52	14.21	15.63	3.35	2.94
Nd	10.61	13.21	14.53	4.48	3.71
Sm	14.17	20.92	23.01	10.69	7.92
Eu	15.63	17.71	19.48	9.51	6.15
Gd	22.94	31.25	31.53	24.68	12.81
Dy	18.13	29.42	32.36	23.42	14.22
Yb	25.63	33.53	36.88	23.96	14.63

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรด
ไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272				
	0.2 M	0.4 M	0.6 M	0.8 M	1.0 M
Y	24.13	46.12	48.89	32.57	27.46
La	0.15	0.31	0.33	0.06	0.14
Ce	0.91	1.32	1.40	0.93	0.63
Pr	0.66	1.64	1.73	0.43	0.06
Nd	0.59	1.33	1.40	0.12	0.04
Sm	1.51	5.02	5.32	0.58	0.12
Eu	1.37	3.95	4.18	1.79	0.36
Gd	6.15	12.93	13.71	6.43	2.23
Dy	4.32	9.30	9.86	5.45	1.56
Yb	9.13	13.74	14.56	9.71	2.13

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4-2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรด
ไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด Cyanex 272				
	0.2 M	0.4 M	0.6 M	0.8 M	1.0 M
Y	28.58	55.66	57.19	40.66	34.87
La	0.63	0.44	0.45	0.16	0.49
Ce	1.31	1.17	1.22	1.73	1.09
Pr	0.37	1.22	1.27	0.71	0.53
Nd	0.31	0.92	0.96	0.63	0.51
Sm	1.16	4.31	4.49	2.18	0.59
Eu	1.04	3.43	3.57	1.76	0.79
Gd	7.30	15.75	16.38	6.39	3.68
Dy	4.40	10.42	10.84	3.83	1.63
Yb	9.70	18.43	19.17	11.42	2.96

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การสกัดที่ความเข้มข้นสารสกัด TBP: Cyanex 272			
	0.1: 0.4	0.2: 0.4	0.3: 0.4	0.35: 0.4
Y	68.20	73.53	72.62	71.16
La	0.25	3.52	0.94	0.24
Ce	1.27	9.56	2.31	4.44
Pr	1.97	7.47	1.06	2.12
Nd	1.70	5.97	3.27	2.73
Sm	6.89	13.11	10.44	10.08
Eu	4.82	6.35	6.76	5.53
Gd	15.74	21.13	18.72	17.83
Dy	28.05	29.27	25.67	25.87
Yb	31.61	32.78	30.53	32.56

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรดไน
ตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด TBP: Cyanex 272			
	0.1: 0.4	0.2: 0.4	0.3: 0.4	0.35: 0.4
Y	47.53	49.60	48.69	47.49
La	0.18	0.26	0.38	0.12
Ce	0.37	1.64	0.44	1.96
Pr	0.88	2.45	0.61	1.21
Nd	1.17	2.04	0.78	0.83
Sm	6.12	7.92	7.21	7.32
Eu	1.14	2.16	2.72	2.58
Gd	10.29	15.41	11.89	9.21
Dy	15.42	17.39	15.38	13.22
Yb	4.15	3.99	4.02	5.69

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5-2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรด
ไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด TBP: Cyanex 272			
	0.1: 0.4	0.2: 0.4	0.3: 0.4	0.35: 0.4
Y	62.86	66.88	64.80	65.31
La	0.22	0.41	0.39	0.16
Ce	1.07	1.62	2.04	1.15
Pr	1.24	3.65	0.98	1.71
Nd	1.22	3.16	3.01	2.43
Sm	6.48	11.10	9.97	7.89
Eu	1.35	4.27	3.47	3.56
Gd	12.75	14.74	13.73	12.14
Dy	14.67	18.55	18.60	13.80
Yb	5.65	3.96	5.47	5.36

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากด้วยสารสกัดผสม D2EHPA และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การสกัดที่ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA: Cyanex 272			
	0.1: 0.4	0.2: 0.4	0.3: 0.4	0.35: 0.4
Y	64.61	67.28	58.52	44.65
La	8.62	13.45	10.81	8.71
Ce	8.29	12.74	8.63	6.32
Pr	14.21	14.29	8.32	7.15
Nd	8.73	10.80	6.29	3.12
Sm	14.84	23.39	15.57	11.83
Eu	12.96	29.23	14.43	10.47
Gd	31.82	46.50	37.35	25.69
Dy	48.61	59.89	42.19	35.23
Yb	11.35	13.81	8.91	5.59

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรด
ไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA: Cyanex 272			
	0.1: 0.4	0.2: 0.4	0.3: 0.4	0.35: 0.4
Y	26.44	27.17	21.34	16.57
La	0.39	0.48	0.17	0.15
Ce	2.36	5.42	2.83	1.73
Pr	3.50	5.19	2.02	1.99
Nd	5.56	5.72	3.27	2.69
Sm	6.87	10.58	9.10	7.32
Eu	4.98	13.94	11.23	9.15
Gd	18.25	24.72	22.63	15.40
Dy	23.73	28.91	24.25	19.23
Yb	6.78	6.58	4.37	2.29

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6-2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรด
ไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA: Cyanex 272			
	0.1: 0.4	0.2: 0.4	0.3: 0.4	0.35: 0.4
Y	49.52	53.91	41.62	33.67
La	0.62	0.73	0.24	0.21
Ce	2.93	6.13	2.87	2.17
Pr	9.25	8.72	5.12	4.84
Nd	9.34	8.75	4.55	4.71
Sm	9.71	15.87	9.27	6.92
Eu	7.47	18.91	14.23	10.73
Gd	30.24	41.83	32.40	23.31
Dy	43.53	48.29	36.49	30.27
Yb	11.83	12.41	7.53	4.42

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.8 โมลต่อ
ลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากในระบบสองหอสกัดของหอสกัดที่ 2 ด้วยสารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การสกัดที่ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA เป็น 0.1 M ครั้งที่				
	1	2	3	4	5
Y	41.47	40.64	42.30	41.45	40.22
La	0.27	0.26	0.27	0.27	0.26
Ce	1.06	1.03	1.08	1.06	1.02
Pr	2.37	2.66	2.42	2.71	2.31
Nd	2.05	1.99	2.10	2.05	1.99
Sm	7.22	7.02	7.36	7.23	7.15
Eu	5.37	5.21	5.48	5.37	5.21
Gd	9.58	9.29	9.77	9.57	9.11
Dy	12.06	11.69	12.78	12.05	11.69
Yb	2.57	2.75	2.63	2.84	2.54

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.4 -1.2 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากด้วยสารละลายนำกลับกรดไน
ตริกความเข้มข้น 0.6-1.2 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับที่ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ			
	0.6 M	0.8 M	1 M	1.2 M
Y	20.884	23.314	27.127	28.182
La	0.018	0.024	0.028	0.029
Ce	0.062	0.064	0.062	0.065
Pr	0.033	0.042	0.042	0.044
Nd	0.019	0.021	0.029	0.036
Sm	1.387	2.417	3.513	3.689
Eu	0.326	0.448	0.472	0.514
Gd	3.127	3.389	3.647	3.564
Dy	4.137	4.128	4.321	4.687
Yb	0.984	1.042	1.140	1.159

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.6-1.2 โมล
ต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 1 แบบวนรอบจำนวน 3 รอบ ด้วยสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การสกัด		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
Y	72.42	82.56	85.46
La	3.47	3.96	4.13
Ce	9.41	10.73	11.11
Pr	7.36	8.39	8.68
Nd	5.88	6.71	6.94
Sm	12.92	14.73	15.24
Eu	6.26	7.13	7.38
Gd	20.95	23.88	24.72
Dy	28.83	32.87	34.02
Yb	32.29	36.81	38.07

ภาวะที่ทำการทดลอง: อัตราส่วนความเข้มข้นสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 เป็น 0.2: 0.4 มิลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.4 มิลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 1 แบบวนรอบ
จำนวน 3 รอบ สารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับ		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
Y	62.86	75.44	76.69
La	0.27	0.32	0.33
Ce	1.07	1.28	1.29
Pr	2.44	2.93	2.97
Nd	2.02	2.42	2.46
Sm	7.88	9.46	9.61
Eu	6.15	7.38	7.56
Gd	12.75	15.43	15.55
Dy	14.67	17.61	18.19
Yb	5.65	6.78	6.84

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 2 แบบวนรอบจำนวน
3 รอบ ด้วยสารสกัด D2EHPA

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การสกัด		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
Y	53.69	64.42	66.03
La	0.11	0.14	0.14
Ce	0.45	0.54	0.56
Pr	1.04	1.25	1.28
Nd	0.86	1.03	1.06
Sm	3.36	4.04	4.14
Eu	2.65	3.18	3.28
Gd	8.55	10.27	10.52
Dy	8.19	9.83	10.07
Yb	2.39	2.87	2.94

ภาวะที่ทำการทดลอง: ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA เป็น 0.1 โมลต่อลิตร สารละลายนำกลับ
กรดไนตริกความเข้มข้น 1.2 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9-1 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนของธาตุหายากในหอสกัดที่ 2 แบบวนรอบ
จำนวน 3 รอบ สารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 1.2 โมลต่อลิตร

ชนิดธาตุหายาก	เปอร์เซ็นต์การนำกลับ		
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3
Y	33.82	40.58	42.30
La	0.05	0.05	0.06
Ce	0.18	0.22	0.23
Pr	0.42	0.51	0.52
Nd	0.34	0.41	0.43
Sm	1.35	1.62	1.68
Eu	1.06	1.27	1.32
Gd	3.42	4.11	4.28
Dy	3.28	3.93	4.09
Yb	0.96	1.15	1.20

ภาวะที่ทำการทดลอง: สารละลายนำกลับกรดไนตริกความเข้มข้น 1.2 โมลต่อลิตร อัตราการไหล
ของสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ

ข.1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด (Percent Extraction)

ข้อมูลจากภาคผนวก ก.1 สามารถคำนวณร้อยละการสกัดได้ดังนี้

พิจารณาข้อมูลของไอออนิตเทรียม (Y^{3+}) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 เท่ากับ 0.4 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับเท่ากับ 0.8 โมลต่อลิตร โดยที่

ความเข้มข้นไอออนิตเทรียมในสารละลายป้อนขาเข้าเท่ากับ	472.93	มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นไอออนิตเทรียมในสารละลายป้อนขาออกเท่ากับ	179.86	มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ดังนั้น ร้อยละการสกัดมีค่าเท่ากับ } \frac{472.93 - 179.86}{472.93} \times 100 = 61.97$$

ข.2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ (Percent Stripping)

ข้อมูลจากภาคผนวก ก.1 สามารถคำนวณร้อยละการนำกลับได้ดังนี้

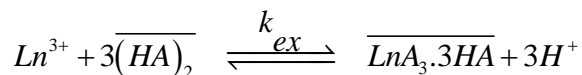
พิจารณาข้อมูลของไอออนิตเทรียม (Y^{3+}) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 เท่ากับ 0.4 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับเท่ากับ 0.8 โมลต่อลิตร โดยที่

ความเข้มข้นไอออนิตเทรียมในสารละลายป้อนขาเข้าเท่ากับ	472.93	มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นไอออนิตเทรียมในสารละลายนำกลับขาเข้าเท่ากับ	0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นไอออนิตเทรียมในสารละลายนำกลับขาออกเท่ากับ	263.23	มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ดังนั้น ร้อยละการนำกลับมีค่าเท่ากับ } \frac{263.23}{472.93} \times 100 = 55.66$$

ข.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, K_{ex})

1. การคำนวณค่าคงที่สมดุลเมื่อใช้สารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร



โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{ex} = \frac{[\overline{LnA_3 \cdot 3HA}][H^+]^3}{[(\overline{HA})_2]^3 [Ln^{3+}]}$$

สารละลายป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 472.93 มิลลิกรัมต่อลิตร

คิดเป็น $\left(\frac{472.93}{1000 \times 88.90582}\right) = 0.0053194$ โมลต่อลิตร

สารละลายป้อนออกมีค่าเท่ากับ 398.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

คิดเป็น $\left(\frac{398.05}{1000 \times 88.90582}\right) = 0.0044773$ โมลต่อลิตร

ดังนั้น สารละลายป้อนที่หายไปทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ

$0.0053194 - 0.0044773 = 0.0008422$ โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นสารตั้งต้นที่เวลาเริ่มต้น มีค่าดังนี้

$Ln^{3+} (Y^{3+}) = 0.0053194$ โมลต่อลิตร (สารละลายป้อนเข้า)

$(HA) = 0.1$ โมลต่อลิตร (สารสกัด Cyanex 272)

ความเข้มข้นสารตั้งต้นที่เวลาสมดุล มีค่าดังนี้

$Ln^{3+} (Y^{3+}) = 0.0044773$ โมลต่อลิตร

$(HA) = 0.1 - (6 \times 0.000842) = 0.094947$ โมลต่อลิตร

ดังนั้น $[(\overline{HA})_2]^3 [Ln^{3+}]$ มีค่าเท่ากับ 3.83226×10^{-6} (โมลต่อลิตร)⁴

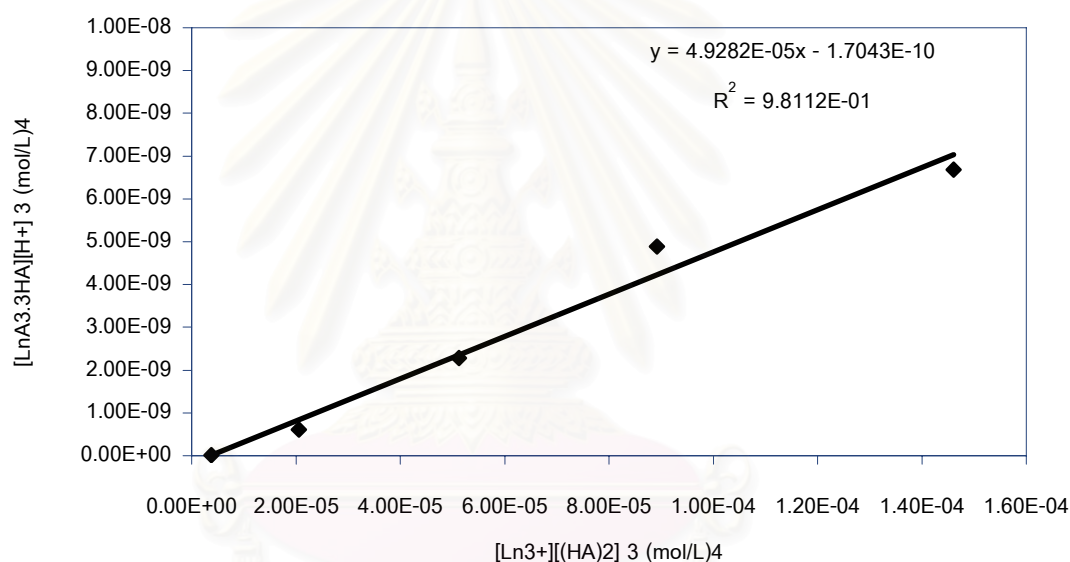
สารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออนที่เกิดขึ้น คือส่วนของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาหรือความเข้มข้นที่หายไป มีค่าดังนี้

ความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3 \cdot 3HA} = 0.0008422$ โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นไฮโดรเนียมไอออน $H^+ = (3 \times 0.0008422) = 0.002527$ โมลต่อลิตร

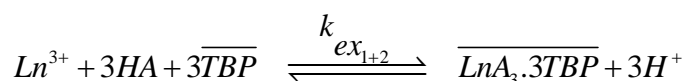
ดังนั้น $[\overline{LnA_3 \cdot 3HA}][H^+]^3$ มีค่าเท่ากับ 1.35831×10^{11} (โมลต่อลิตร)⁴

ดังนั้น $K_{ex} = 4.9282 \times 10^{-5}$



รูปที่ ข-1 ค่าคงที่สมดุลของสารสกัด Cyanex 272 ที่ความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร

2. การคำนวณค่าคงที่สมดุลเมื่อใช้สารสกัดผสม Cyanex 272 และ TBP ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 0.4: 0.05 โมลต่อลิตร



โดยมีค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาดังนี้

$$K_{ex_{1+2}} = \frac{[LnA_3 \cdot 3TBP][H^+]^3}{[TBP]^3 [HA]^3 [Ln^{3+}]}$$

สารละลายป้อนขาเข้ามีค่าเท่ากับ 472.93 มิลลิกรัมต่อลิตร

คิดเป็น $\left(\frac{472.93}{1000 \times 88.90582} \right) = 0.005319$ โมลต่อลิตร

สารละลายป้อนขาออกมีค่าเท่ากับ 141.12 มิลลิกรัมต่อลิตร

คิดเป็น $\left(\frac{141.12}{1000 \times 88.90582} \right) = 0.001587$ โมลต่อลิตร

ดังนั้น สารละลายป้อนที่หายไปทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ

$0.005319 - 0.001587 = 0.003732$ โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นสารตั้งต้นที่เวลาเริ่มต้น มีค่าดังนี้

$Ln^{3+} (Y^{3+}) = 0.005319$ โมลต่อลิตร (สารละลายป้อนขาเข้า)

$(HA:TBP) = 0.4:0.05$ โมลต่อลิตร (สารสกัด Cyanex 272)

ความเข้มข้นสารตั้งต้นที่เวลาสมดุล มีค่าดังนี้

$Ln^{3+} (Y^{3+}) = 0.001587$ โมลต่อลิตร

$(HA) = 0.4 - (3 \times 0.003732) = 0.395238$ โมลต่อลิตร

$(TBP) = 0.05 - (3 \times 0.003732) = 0.045238$ โมลต่อลิตร

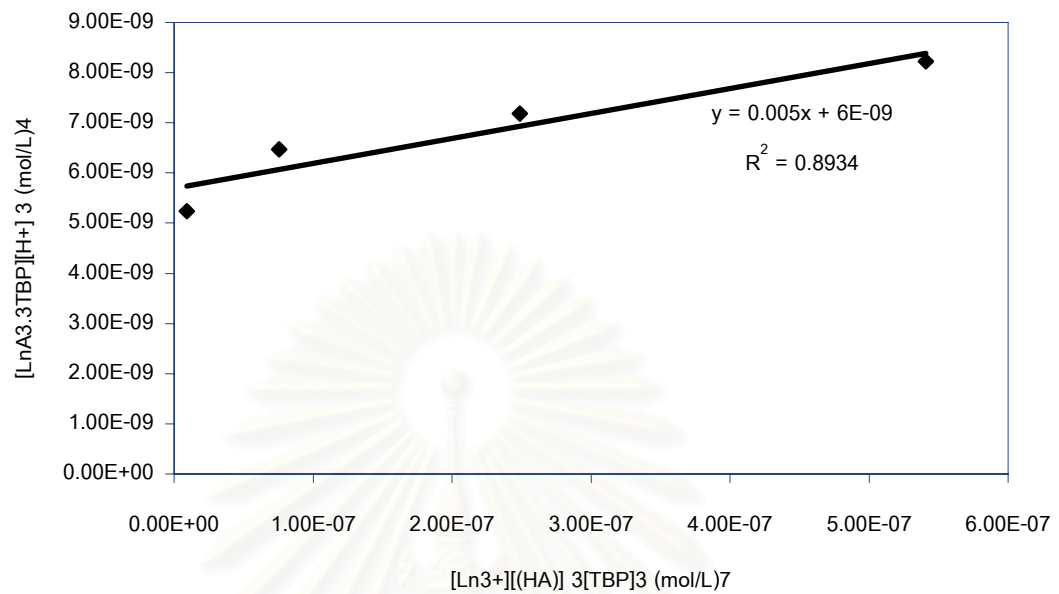
ดังนั้น $[TBP]^3 [HA]^3 [Ln^{3+}]$ มีค่าเท่ากับ 9.07303×10^{-9} (โมลต่อลิตร)⁷

สารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออนที่เกิดขึ้น คือส่วนของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาหรือความเข้มข้นที่หายไป มีค่าดังนี้

ความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อน $\overline{LnA_3 \cdot 3TBP} = 0.003732$ โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นไฮโดรเนียมไอออน $H^+ = (3 \times 0.003732) = 0.011196$ โมลต่อลิตร

ดังนั้น $[LnA_3 \cdot 3TBP][H^+]^3$ มีค่าเท่ากับ 5.23828×10^{-9} (โมลต่อลิตร)⁴
 ดังนั้น $K_{ex_{1+2}} = 0.005 \times 10^{-9}$



รูปที่ ข-2 ค่าคงที่สมดุลของสารสกัดผสม TBP และ Cyanex 272 ที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างๆ

$\beta_{n,x}$ ค่าคงที่ความเสถียรของปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction)

$$\begin{aligned} \beta_{n,x} &= \frac{K_{ex,1+2}}{K_{ex,1}} \\ &= \frac{5 \times 10^{-3}}{4.92 \times 10^{-5}} = 101.45 \left(\frac{mol}{L} \right)^{-3} \end{aligned}$$

ถ้า $\beta_{n,x}$ มีค่ามากหมายถึงเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction) มาก

ข.4 ตัวอย่างในการการคำนวณฟลักซ์ในการสกัด ($Flux_{Extract}$)

ข้อมูลจากภาคผนวก ก.4 สามารถคำนวณฟลักซ์ในการสกัดได้ดังนี้

พิจารณาข้อมูลของไอออนของธาตุหายากที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 เท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร โดยที่

ความเข้มข้นไอออนอิตเทรียมในสารละลายป้อนขาเข้าเท่ากับ 472.93 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นไอออนอิตเทรียมในสารละลายป้อนขาออกเท่ากับ 300.45 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการทดลองปฏิบัติการที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 ml/min

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นได้ว่า Resident Time} &= \text{Volume of Tube} / \text{Mass Flow Rate} \\ &= (250 \text{ ml}) / (100 \text{ ml} / \text{min}) \\ &= 2.5 \text{ min} \end{aligned}$$

(Volume of Tube = 250 ml: วีวัฒน์ ปัททวิคองศา, 2541: 114)

จากตารางที่ 3.2 พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 1.4 m^2 ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ฟลักซ์ในการสกัด (} Flux_{Extract} \text{)} &= \left(\frac{472.93 - 300.45}{1.4 \times 2.5} \right) \\ &= 49.28 \text{ mg} / \text{m}^2 \cdot \text{min} \end{aligned}$$

ข.5 ตัวอย่างในการการคำนวณฟลักซ์ในการนำกลับ ($Flux_{Recovery}$)

ข้อมูลจากภาคผนวก ก.4 สามารถคำนวณฟลักซ์ในการนำกลับได้ดังนี้

พิจารณาข้อมูลของไอออนของธาตุหายากที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 272 เท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ 0.8 โมลต่อลิตรโดยที่

ความเข้มข้นไอออนอิตเทรียมในสารละลายนำกลับขาเข้าเท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นไอออนอิตเทรียมในสารละลายนำกลับขาออกเท่ากับ 135.14 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการทดลองปฏิบัติการที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 ml/min

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้นได้ว่า Resident Time} &= \text{Volume of Tube / Mass Flow Rate} \\
 &= (640 \text{ ml}) / (100 \text{ ml / min}) \\
 &= 2.5 \text{ min}
 \end{aligned}$$

(Volume of Tube = 640 ml: วีวัฒน์ ปัตทวีคองศา, 2541: 114)

จากตารางที่ 3.2 พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 1.4 m^2 ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \text{ฟลักซ์ในการสกัด (Flux}_{\text{Extract}}) &= \left(\frac{135.14 - 0}{1.4 \times 6.4} \right) \\
 &= 15.08 \text{ mg / m}^2 \cdot \text{min}
 \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทศพร สุภาจรรยา เกิดเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลสุพรรณบุรี จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนกรรณสูตศึกษาลัย จังหวัดสุพรรณบุรี และสำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายในปีการศึกษา 2544 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีปริญญาบัตรในหัวข้อ การศึกษากระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ใช้แล้ว และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี ในปีการศึกษา 2548 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีวิทยานิพนธ์ในหัวข้อ การสกัดเสริมฤทธิ์แยกไอออนอิตเทรียมจากธาตุหายากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี ในปีการศึกษา 2550 ขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโท ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 ประจำปี 2550 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเคมี ในปีการศึกษา 2550

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย