

การสกัดธาตุหายากจากซีเรียมเอนริชด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยแบบแผ่น



นางสาวกรองทอง งามณรงค์พงษ์
นางสาวพัชรพร วชิรพันธุ์
นางสาวพิมพ์ชนก สกลวารี

ปี
การศึกษา
2543

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 42394
วัน, เดือน, ปี 20 พ.ค. 2545

.b.....
.i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5/11/2017

EXTRACTION OF RARE EARTHS FROM ENRICHED CERIUM
BY FLAT-SHEET SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



Miss Krongtong Ngamnarongpong

Miss Patcharaporn Washiraphan

Miss Pimchanok Sakolwaree

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
For the Degree of Bachelor of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การสกัดธาตุหายากจากซีเรียมเอนริชด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย
แบบแผ่น
โดย นางสาวกรรทอง งามณรงค์พงษ์
นางสาวพัชรพร วชิรพันธุ์
นางสาวพิมพ์ชนก สกลวารี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คุณสุรศักดิ์ พงษ์พันธุ์สุข¹
1. นักนิเวศเคมี 7 วช. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)

..... กรรมการ
(คุณสุรศักดิ์ พงษ์พันธุ์สุข)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

..... กรรมการ

(อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การสกัดธาตุหายากจากซีเรียมเอนริชด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยแบบแผ่น

โดย นางสาวกรองทอง งามณรงค์พงษ์
นางสาวพัชรพร วชิรพันธุ์
นางสาวพิมพ์ชนก สกลวารี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา

ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดแยกธาตุหายากออกจากสารละลายป้อนซีเรียมเอนริช โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยแบบแผ่นซึ่งมีกรดไดเอทิลเอทิลฟอสฟอริก (D2EHPA) ในน้ำมันก๊าดเป็นสารสกัด ตัวแปรในการสกัดที่ศึกษา ได้แก่ พีเอชของสารละลายป้อน ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 และ 1000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) และอัตราส่วนโดยโมลของ Ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) ต่อธาตุหายากทั้งหมดที่เติมด้านสารละลายป้อนเป็น 1, 3, 5 และ 10 ผลของการสกัดแยกสามารถวิเคราะห์โดยการวัดความเข้มข้นของธาตุหายากจากทั้งสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป โดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES)

จากผลการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm และ 1000 ppm สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดแยกธาตุหายากที่ทำให้ค่าการแยกของธาตุหายากแต่ละชนิดมากที่สุดเมื่อเทียบกับซีเรียมซึ่งเป็นสารอ้างอิง คือ พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อน 2.0 และมีอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 และ 1 ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าในกระบวนการนี้อัตราการซึมผ่านของธาตุหายากจากสารละลายป้อนถูกจำกัดด้วยการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างธาตุหายากกับ D2EHPA ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report title Extraction of Rare Earths from Enriched Cerium by Flat-sheet Supported Liquid Membrane

By Miss Krongtong Ngamnarongpong
Miss Patcharaporn Washiraphan
Miss Pimchanok Sakolwaree

Advisor Assist.Prof.Dr. Prakob Kitchaiya

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This project is the study of separation of rare earths from enriched cerium by a flat-sheet supported liquid membrane using di (2-ethylhexyl) phosphoric acid (D2EHPA) dissolved in kerosene as an extractant. The parameters such as the initial pH of feed solution, the concentration of rare earths in feed solution at 100 and 1000 ppm, and the molar ratio of ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) to rare earths in feed solution at 1, 3, 5 and 10 were studied. The concentrations of rare earths in feed and strip solutions were analyzed by the Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES)

The results showed that with the concentration of rare earths at 100 and 1000 ppm, the initial pH of the feed solution at 2.0 and the molar ratio of EDTA to rare earths in feed solution at 5 and 1, respectively, the highest separation factors of rare earths from cerium were obtained. The permeation rate of rare earths was determined by the diffusion of rare earths and D2EHPA complexes through the pores of the supported liquid membrane.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณผู้มีส่วนช่วยเหลือทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ผศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาผู้คอยให้คำแนะนำปรึกษาและให้แนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองตลอดมา อ. บุญชัย โชติวิริยวณิชย์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่ช่วยประกอบและซ่อมอุปกรณ์การทดลองเสมอตลอดระยะเวลา 2 ภาคการศึกษา

คุณสุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องธาตุหายาก และพี่ ๆ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP-AES

ท้ายสุดนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา รวมทั้งขอขอบคุณพี่และเพื่อน ๆ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำโครงการนี้จนสำเร็จ ซึ่งคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

นางสาวกรรทอง งามณรงค์พงษ์
นางสาวพัชรพร วชิรพันธุ์
นางสาวพิมพ์ชนก สกลวารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 .ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.6 งานวิจัยที่ผ่านมา	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	8
2.1 ธาตุหายาก	8
2.2 เยื่อแผ่น	15
2.3 กระบวนการเยื่อแผ่น	16
2.4 ลักษณะเฉพาะของกระบวนการเยื่อแผ่น	23
2.5 กระบวนการถ่ายโอนมวลแบบคู่ควบ	27
2.6 กลไกการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบสวนทางกัน	31
2.7 แบบจำลอง	33
2.8 สารละลายเยื่อแผ่นเหลว	35
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	41
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	41
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
3.3 การดำเนินการทดลอง	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุ หายาก เป็น 1000 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 2.0	56
4.6 สมมติฐานของข้อจำกัดอัตราการถ่ายโอนมวลในงานวิจัยนี้	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
รายการอ้างอิง	62
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลอง	66
ภาคผนวก ข กราฟแสดงผลการทดลอง	85
ภาคผนวก ค ชุดอุปกรณ์การทดลอง	106
ภาคผนวก ง ขนาดไอออนของธาตุหายาก	108

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การทดลอง	45
3.4.1 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm	45
3.4.2 การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เพื่อเติมลงในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.1	45
3.4.3 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm	45
3.4.4 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2	46
3.4.5 การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.4	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	47
4.1 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm	47
4.2 การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เมื่อเติมลงในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 2.0	50
4.3 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm	52
4.4 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5	54

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	การแบ่งกลุ่มธาตุหายาก	9
ตารางที่ 2.2	คุณสมบัติของตัวทำละลาย	36
ตารางที่ 2.3	ตัวอย่างการใช้งานสารปรับปรุงสภาพ	37
ตารางที่ 3.1	ข้อมูลสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	41
ตารางที่ ก.1	ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm ที่ พีเอช 2.0	67
ตารางที่ ก.2	ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm ที่ พีเอช 2.5	68
ตารางที่ ก.3	ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm ที่ พีเอช 3.0	69
ตารางที่ ก.4	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	70
ตารางที่ ก.5	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	71
ตารางที่ ก.6	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	72
ตารางที่ ก.7	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	73
ตารางที่ ก.8	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.0	74
ตารางที่ ก.9	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.5	75
ตารางที่ ก.10	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.5	76
ตารางที่ ก.11	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 3.5	77
ตารางที่ ก.12	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 5.0	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ ก.13	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	79
ตารางที่ ก.14	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.0	80
ตารางที่ ก.15	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.5	81
ตารางที่ ก.16	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 5.0	82
ตารางที่ ก.17	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	83
ตารางที่ ก.18	ความเข้มข้นของธาตุหายากที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	84
ตารางที่ ง.1	ขนาดไอออนของธาตุหายาก	108

สารบัญญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	แหล่งที่มาของธาตุหายาก	10
รูปที่ 2.2	กลไกการสกัดธาตุหายาก (Ln) ด้วย D2EHPA ในน้ำมันก๊าด	17
รูปที่ 2.3	ลักษณะของโมดูลแบบเส้นใยกลวง	19
รูปที่ 2.4	ลักษณะของโมดูลแบบเส้นใยม้วน	19
รูปที่ 2.5	ESPLIM	23
รูปที่ 2.6	ระบบการสกัดแบบกะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยแบบแผ่น	27
รูปที่ 2.7	การถ่ายโอนมวลแบบสวนทางกัน	28
รูปที่ 2.8	การถ่ายโอนมวลแบบตามกัน	30
รูปที่ 2.9	รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในการถ่ายโอนมวลแบบสวนทางของไอออนธาตุหายาก	32
รูปที่ 4.1	การซึมผ่านของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับพีเอช ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm	48
รูปที่ 4.2	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับพีเอช ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm	48
รูปที่ 4.3	การแยกของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับพีเอช ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm	49
รูปที่ 4.4	พีเอชของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm	49
รูปที่ 4.5	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมด ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	51
รูปที่ 4.6	การแยกของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมด ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	51
รูปที่ 4.7	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm	53
รูปที่ 4.8	การแยกของธาตุหายากโดยรวม ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.5.2 การแยกของธาตุหายากแต่ละธาตุ ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	90
รูปที่ ข.6.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	91
รูปที่ ข.6.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	91
รูปที่ ข.7.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	92
รูปที่ ข.7.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	92
รูปที่ ข.8.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.0	93
รูปที่ ข.8.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.0	93
รูปที่ ข.9.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.5	94
รูปที่ ข.9.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.5	94
รูปที่ ข.10.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	95
รูปที่ ข.10.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	95
รูปที่ ข.11.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.5	96
รูปที่ ข.11.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.5	96

สารบัญญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.9	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm	55
รูปที่ 4.10	การแยกของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับพีเอช ที่ความเข้มข้นของธาตุหายาก 1000 ppm	55
รูปที่ 4.11	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมด ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	57
รูปที่ 4.12	การแยกของธาตุหายากโดยรวม ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	57
รูปที่ ข.1.1	การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	86
รูปที่ ข.1.2	การแยกของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	86
รูปที่ ข.2.1	การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.5	87
รูปที่ ข.2.2	การแยกของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.5	87
รูปที่ ข.3.1	การซึมผ่านของธาตุหายากที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 3.0	88
รูปที่ ข.3.2	การแยกของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	88
รูปที่ ข.4.1	การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	89
รูปที่ ข.4.2	การแยกของธาตุหายากแต่ละธาตุ ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	89
รูปที่ ข.5.1	การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.12.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 3.5	97
รูปที่ ข.12.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 3.5	97
รูปที่ ข.13.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 5.0	98
รูปที่ ข.13.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 5.0	98
รูปที่ ข.14.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	99
รูปที่ ข.14.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	99
รูปที่ ข.15.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.0	100
รูปที่ ข.15.2 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.0	100
รูปที่ ข.16.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.5	101
รูปที่ ข.16.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.5	101
รูปที่ ข.17.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 5.0	102
รูปที่ ข.17.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 5.0	102
รูปที่ ข.18.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	103

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.18.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	103
รูปที่ ข.19.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	104
รูปที่ ข.19.2 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	104
รูปที่ ข.20. i การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	105
รูปที่ ข.20.2 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0	105
รูปที่ ค.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง	106
รูปที่ ค.2 ถังกวนและเส้นใยแบบแผ่น	107

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์อำนวยความสะดวกชั้นสูงมีมากมาย อาทิเช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ติดตามตัว เป็นต้น โลหะที่ใช้ในการผลิตวัสดุต่าง ๆ ที่รู้จักกันดี คือ เหล็ก ทองแดง สังกะสี อะลูมิเนียม เป็นทรัพยากรที่ถูกใช้มานานโดยไม่คำนึงถึงประโยชน์สูงสุดที่จะได้รับและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้สินแร่เหล่านี้มีปริมาณลดน้อยลง การวิจัยและพัฒนาโลหะตลอดจนกระบวนการผลิตได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาประเทศเพื่อแสวงหาวัสดุและกรรมวิธีในการผลิตที่มีประสิทธิภาพทำให้เกิดผลคุ้มค่าและเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด [1]

1.1 ความเป็นมา

ธาตุหายากเป็นธาตุที่มีคุณค่าและมูลค่า เป็นทรัพยากรที่อยู่ในรูปของสินแร่โมนาไซต์ (Monazite) และซีโนไทม์ (Xenotime) ซึ่งเป็นหางแร่จากการทำเหมืองดีบุกในประเทศไทยที่มีค่าทางเศรษฐกิจอย่างมาก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างทั้งในด้านอุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมแก้ว เซรามิก อุตสาหกรรมเคมีและตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ธาตุหายากจึงเป็นที่ต้องการมากขึ้น ในอดีตสินแร่นี้ถูกนำไปขายให้ต่างประเทศในราคาถูกเพราะยังไม่มีเทคโนโลยีในการแยกธาตุ จนกระทั่งใน พ.ศ. 2517 ได้มีการเรียกร้องจากหน่วยงานและองค์กรต่าง ๆ ให้รัฐบาลระงับการส่งออกสินแร่โมนาไซต์ออกนอกประเทศ ซึ่งต่อมารัฐบาลได้กำหนดนโยบายการพัฒนาควบคุมสงวนสินแร่โมนาไซต์และแร่กัมมันตรังสีไว้ในประเทศ ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2518 รัฐบาลได้ให้กรมทรัพยากรธรณีและสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติร่วมเป็นเจ้าของเรื่องจัดทำโครงการสกัดและแปรรูปสินแร่ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติได้ศึกษาวิจัยและทดลองแปรรูปสินแร่โมนาไซต์เพื่อแยกธาตุผลิตภัณฑ์และผลพลอยได้ และรายงานผลเสนอต่อรัฐบาลซึ่งได้รับความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นชอบให้จัดสร้างโรงงานแปรรูปสภาพโมนาไซต์ จนแล้วเสร็จในพ.ศ. 2541 สามารถดำเนินการผลิตได้บางส่วนแต่ยังไม่สามารถดำเนินงานได้เต็มประสิทธิภาพ [2]

ธาตุหายากประกอบด้วยธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ซึ่งมีด้วยกันทั้งหมด 15 ธาตุ มีเลขอะตอมตั้งแต่ 57-71 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ในกระบวนการผลิตธาตุหายากจะมีการแยกซีเรียมบางส่วนออกก่อนซึ่งเรียกว่าซีเรียมเอนริช (Enriched cerium) แต่พบว่ายังมีความบริสุทธิ์น้อยอยู่ ถ้าเราสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับซีเรียมเอนริชได้จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับธาตุหายากส่วนนี้

ในการสกัดแยกธาตุหายากโดยทั่วไปจะใช้กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแยกธาตุหายากในระดับอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องใช้สารสกัดในปริมาณมาก รวมทั้งอาจเกิดการสูญเสียสารสกัดซึ่งมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่คล้ายคลึงกันของกลุ่มธาตุหายาก ทำให้ยุ่งยากต่อกระบวนการผลิตที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง [3]

เทคนิคที่น่าสนใจในการสกัดธาตุหายากได้แก่ กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane) โดยเฉพาะเยื่อแผ่นเหลวชนิดพองตัว (Supported liquid membrane) เนื่องจากสามารถแก้ไขปัญหาค่าการผสมกันระหว่างสารละลายป้อน สารละลายสตริป และสารละลายอินทรีย์ในการสกัดด้วยตัวทำละลาย [9] อีกทั้งเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนการดำเนินงานไม่ยุ่งยาก ใช้พลังงานในการแยกต่ำ สามารถดำเนินการแบบกะหรือแบบต่อเนื่องได้ รวมทั้งขยายขนาดได้ไม่ยาก การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการสกัดแยกธาตุหายากเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด [5]

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาทฤษฎี และข้อมูลเบื้องต้นในการสกัดแยกธาตุหายาก ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองตัวด้วยเส้นใยแบบแผ่น
- 1.2.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการสกัดแยกธาตุหายาก ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองตัวด้วยเส้นใยแบบแผ่น
- 1.2.3 ศึกษาและทดลองหาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดแยกธาตุหายากดังนี้
 - 1.2.3.1 พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อน
 - 1.2.3.2 ผลของปริมาณ EDTA ที่เติมด้านสารละลายป้อน
 - 1.2.3.3 ผลกระทบจากความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการเป็นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาคุณค่าเอกสารวิชาการที่เกี่ยวกับการสกัดธาตุหายากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองตัวด้วยเส้นใยแบบแผ่น
- 1.3.2 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์การทดลอง
- 1.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ได้แก่
 - 1.3.3.1 พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อน
 - 1.3.3.2 ผลของปริมาณ EDTA ที่เติมด้านสารละลายป้อน
 - 1.3.3.3 ผลกระทบจากความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 มีความเข้าใจทฤษฎีและข้อมูลเบื้องต้นของการสกัดแยกธาตุหายากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองตัวด้วยเส้นใยแบบแผ่น
- 1.4.2 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยกธาตุหายากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองตัวด้วยเส้นใยแบบแผ่น
- 1.4.3 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาไปสู่ระดับอุตสาหกรรมในการสกัดธาตุหายากที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมาแปรรูปเป็นธาตุที่บริสุทธิ์มากขึ้นสามารถนำไปพัฒนาเทคโนโลยีด้านอื่นต่อไป
- 1.4.4 เพิ่มทักษะการวางแผนและการควบคุมการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้บรรลุผลตามวัตถุประสงค์

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 การศึกษาข้อมูลและรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการสกัดธาตุหายากเพื่อวางแผนการดำเนินงาน
- 1.5.2 ศึกษาการใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุหายาก Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.5.3 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์การทดลอง
- 1.5.4 ดำเนินการทดลอง
- 1.5.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.5.6 สรุปผลและเสนอแนะผลงานวิจัย

1.6 งานวิจัยที่ผ่านมา

Kolarik และ Pankova [3] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการแยกกลุ่มธาตุหายากโดยใช้สารละลายกรดไดอัลคิลฟอสฟอริกได้แก่ Di-n-amyl phosphoric acid (DAPA), Di-n-octyl phosphoric acid (DOPA), Di-iso-amyl phosphoric acid (DIAPA) และ Di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid (D2EHPA) พบว่าประสิทธิภาพการสกัดไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและขนาดของหมู่อัลคิล แต่จะขึ้นกับจำนวนกิ่งก้านที่ต่อจากหมู่อัลคิล โดยพบว่าถ้าจำนวนกิ่งก้านของหมู่อัลคิลเพิ่มขึ้นมีผลให้ประสิทธิภาพการสกัดลดลง และเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างที่เหมือนกันประสิทธิภาพการสกัดจะเพิ่มขึ้นถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมในหมู่อัลคิลมากขึ้น

Ceccaroli และ Alstad [6] ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ 15 ธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์เมื่อใช้ D2EHPA หรือ Tri-n-butylphosphate (TBP) ละลายใน n-octane และ Adogen 464 ละลายด้วย 10% n-octanol ใน n-octane เป็นสารละลายวัฏภาคอินทรีย์และสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายวัฏภาคน้ำ พบว่าค่าการแยกระหว่างธาตุโดยเฉลี่ยเมื่อใช้ D2EHPA เท่ากับ 3.05 TBP เท่ากับ 0.17 และ Adogen 464 เท่ากับ 1.32 จึงสรุปว่าที่สภาวะการทดลองนี้ D2EHPA เหมาะที่จะเป็นสารสกัดมากที่สุด

Huang และ Juang [7] ศึกษากลไกการแพร่ของสังกะสีผ่านเยื่อแผ่นเหลวชนิดพองตัวภายในบรรจุด้วย D2EHPA ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพา (Carrier) เมื่อศึกษาอัตราการซึมผ่านของสังกะสีโดยการแพร่ผ่านชั้นของสารละลายป้อน การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสและการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวพร้อม ๆ กัน พบว่าการแพร่ในเยื่อแผ่นเหลวจะควบคุมอัตราการซึมผ่าน แต่เมื่อความเข้มข้นของสังกะสีและไฮโดรเจนไอออนในสารละลายป้อนต่ำ การแพร่ในเยื่อแผ่นและสารละลายป้อนจะควบคุมอัตราการซึมผ่าน รวมทั้งหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในสาร-
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายป้อนและค่าคงที่การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสังกะสีและ D2EHPA

Matsuyama, Komori และ Teramoto [8] ได้เสนอการแยก Erbium และ Yttrium โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดพุงตัวภายในบรรจุ Bis-(2,4,4-trimethylpentyl) phosphoric acid (DTMPPA) ใน 1,2,4-Trimethylbenzene และเติม Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA) ในสารละลายป้อน งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติม DTPA และตัวพาต่ออัตราการซึมผ่านและค่าการเลือกผ่านเยื่อแผ่น พบว่าการเติม DTPA จะทำให้อัตราการซึมผ่านลดลง เนื่องจากเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของธาตุหายากเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ DTPA ในด้านสารละลายป้อนเหลือธาตุหายากในรูปอิสระ (Free rare earths) ลดลง และเมื่อความเข้มข้นของ DTPA เข้าใกล้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนธาตุหายาก ค่าการเลือกผ่านเยื่อแผ่นจะเพิ่มขึ้นมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 4.5 และเมื่อความเข้มข้นของตัวพามากขึ้นจะทำให้อัตราการซึมผ่านและค่าการเลือกเพิ่มขึ้นด้วย

Kataoka, Nishiki และ Muto [4] นำเสนอกลไกการสกัดธาตุแลนทานัมโดยใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวชนิดพุงตัว ซึ่งใช้เยื่อแผ่นเหลวที่ทำจากเทฟลอนภายในบรรจุสารละลาย D2EHPA ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพาที่ละลายอยู่ในน้ำมันก๊าดและยึดเกาะในเยื่อแผ่นเหลวชนิดพุงตัวด้วยแรงคาпилลารี (Capillary forces) เยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปที่มีพีเอชต่างกัน แลนทานัมจะถูกทำให้เข้มข้นขึ้นและถ่ายเทมวลจากด้านของสารละลายป้อนที่มีพีเอชสูงมายังด้านของสารละลายสตริปที่มีพีเอชต่ำกว่า งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากความเข้มข้นของสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของแลนทานัมในสารละลายป้อนและสารละลายสตริป พีเอชของสารละลายป้อนต่ออัตราการซึมผ่าน รวมทั้งผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวในเยื่อแผ่นเหลวซึ่งพบว่าจะทำให้อัตราการซึมผ่านลดลง

Kubota, Goto และ Nakashio [9] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ที่เกี่ยวกับสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุหายากกับสารละลาย 2-Ethylhexyl phosphonic acid mono-2 ethylhexyl ester เป็นสารสกัดใน n-heptane สารละลายนี้จะถูกเคลือบฝังในเยื่อแผ่นเหลวที่พุงตัวด้วยเส้นใยกลวงชนิดไม่ชอบน้ำทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ ในงานวิจัยนี้เสนอผลกระทบที่เกิดจากความเข้มข้นของธาตุในสารละลายน้ำและความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายอินทรีย์ รวมทั้งแสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เห็นถึงกลไกการสกัดธาตุหายาก จากการทดลองสามารถทำนายได้ว่าการแพร่ในสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปจะควบคุมการสกัด โดยสารละลายอินทรีย์ และปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสทั้งสอง

Geist, Nitsch และ Kim [10] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการสกัดธาตุหายาก (La^{3+} , Ce^{3+} , Pr^{3+} , Nd^{3+} , Eu^{3+}) ในกรดไนตริก ไคโอไฮยานेट และฟอร์มเมต ใน D2EHPA 0.05 โมลต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 2.1 พบว่าการแพร่ของธาตุหายากจะจำกัดอัตราการสกัด และจะไม่พบสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง D2EHPA กับธาตุหายากที่เสถียรอยู่ในสารละลายป้อน

Moreno และ Valiente [11] ได้เลือก Praseodymium (Pr) และ Holmium (Ho) เป็นตัวแทนของธาตุหายากกลุ่มเบาและหนักตามลำดับ เพื่อจะทำการศึกษากการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดพยางค์โดยใช้ธาตุหายากในรูปไนเตรต ใช้ D2EHPA ที่ละลายในน้ำมันก๊าดเป็นตัวสกัดรวมทั้งกลไกการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุหายาก และทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางกราฟฟิกและเชิงตัวเลข ภายใต้สภาวะที่ศึกษาจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อน 2 ชนิดในสารละลายอินทรีย์ คือ $\text{Ln}(\text{NO}_3)_2(\text{HA})_3$ และ $\text{LnA}_3(\text{HA})_2$ เมื่อ Ln แทนไอออนของธาตุหายาก และ HA แทนสารสกัด D2EHPA ซึ่งจะเกิดเป็นชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลายป้อน

ไววิทย สมนิก และเอกสิทธิ์ [12] ศึกษาความเป็นไปได้ของการสกัดพร้อมกับการดึงกลับของไอออนโคบอลต์ (Co^{2+}) ออกจากสารละลายป้อนเข้าสู่สารละลายสตรีปด้วยกระบวนการสกัดแบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยางค์ด้วยเส้นใยแบบแผ่นและยังได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อระบบการสกัดนี้ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแบบกะของไอออนโคบอลต์ซึ่งได้แก่ความเร็วรอบของการปั่นกวนทั้งสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในโถลู่อื่นในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 12 ถึง 24 โดยปริมาตร พีเอชของสารละลายป้อนในช่วงที่เป็นกรด และชนิดของสารละลายสตรีปคือ สารละลายกรดเกลือและสารละลายกรดออกซาลิก

จากการทดลองพบว่า การใช้ความเร็วรอบการปั่นกวนในสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปสูงขึ้นจะทำให้เกิดการสกัดได้สูงขึ้นด้วย นอกจากนี้การใช้สารละลายกรดออกซาลิกเป็นสารละลายสตรีปไม่สามารถใช้ได้ในระบบนี้เนื่องจากเกิดการอุดตันบนเส้นใยด้วยตะกอนของโคบอลต์ออกซาลेट อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กรดเกลือเป็นสารละลายสตรีป ไอออนโคบอลต์มากกว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 50 จะถูกสกัดและดึงกลับ ซึ่งถ้าเพิ่มพีเอชที่สารละลายป้อนเป็นค่า 6 จะทำให้เกิดการสกัดมากกว่าร้อยละ 65 ของไอออนโคบอลต์ทั้งหมด

วิทยา นามสว่าง [1] ได้ตรวจสอบการสกัดแลนทานัมไอออนโดยใช้ D2EHPA ละลายในน้ำมันก๊าดเป็นสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้เส้นใยกลวงชนิดไม่ชอบน้ำเป็นตัวพุง และได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการนี้ได้แก่ ความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อนอยู่ในช่วง 1 ถึง 1000 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 โมลต่อลิตร ค่าพีเอชในสารละลายป้อนในช่วงที่มีความเป็นกรด ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายสตริปในช่วง 0.05 ถึง 0.5 โมลต่อลิตรและการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายสตริป

ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนในสารละลายป้อน อัตราการถ่ายโอนมวลของแลนทานัมไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มากกว่า 0.5 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของแลนทานัมจะไม่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนมวลเมื่อสารสกัดมีความเข้มข้นต่ำกว่านี้ สำหรับความเข้มข้นของแลนทานัมไอออนหนึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นของสารสกัดในช่วง 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัดและจะมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 0.5 โมลต่อลิตร ค่าร้อยละการสกัดสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 2.5 และพบว่าการปรับพีเอชในสารละลายป้อนด้วยกรดไฮโดรคลอริกดีกว่าการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.25 โมลต่อลิตรจะไม่มีผลกระทบต่อสกัด และสุดท้ายกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนี้สามารถเพิ่มความเข้มข้นให้กับแลนทานัมไอออนในสารละลายสตริปโดยการแพร่จากสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นต่ำไปยังสารละลายสตริปที่มีความเข้มข้นสูงกว่า

Biswas, Habib และ Islam [13] ศึกษาการกระจายข้อมูลของ D2EHPA ในน้ำมันก๊าด และ 0.1 โมลต่อลิตรของ $(\text{Na}^+, \text{H}^+)\text{Cl}^-$ พบว่าค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการเกิดไดเมอร์ของ D2EHPA เท่ากับ 3.39×10^4 ลิตรต่อโมล ค่าคงที่การกระจายตัวของสารสกัด D2EHPA เท่ากับ 1.66×10^{-3} โมลต่อลิตร และค่าคงที่การแตกตัวของกรดเท่ากับ 1.99×10^{-2} โมลต่อลิตร ทั้งนี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 ± 0.5 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้ประกอบไปด้วยทฤษฎีเกี่ยวกับธาตุหายากและเยื่อแผ่นซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ธาตุหายาก

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับธาตุหายาก [2]

พ.ศ. 2330 ถึง 2490 นักวิทยาศาสตร์เชื่อกันว่าธาตุหายากเป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยเพราะถูกพบในแร่ซึ่งหาพบได้ยาก และมักเกิดอยู่รวมกันเป็นกลุ่มและมีความยากต่อการแยกให้เป็นธาตุบริสุทธิ์ แต่ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่าธาตุหายากแม้จะมีปริมาณไม่มากเมื่อเทียบกับเหล็กและอลูมิเนียม แต่ก็ยังมีปริมาณพอ ๆ กับสังกะสีและทองแดง ชนิดของธาตุหายากได้แสดงในตารางที่ 2.1 ธาตุหายากเหล่านี้พบในแร่โมนาไซต์และซีโนไทม์ซึ่งเป็นหางแร่จากการทำเหมืองแร่ดีบุก โดยอยู่ในรูปของ สารประกอบฟอสเฟตและฟลูออโรคาร์บอเนตตามลำดับ พบมากในจังหวัดทางภาคใต้ นับแต่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ลงไป

แร่โมนาไซต์โดยทั่วไปเกิดในหินอัคนีชนิดหินแกรนิตและในหินแปรชนิดหินไนส์ บางครั้งพบแหล่งของแร่โมนาไซต์ในบริเวณที่มีหินดังกล่าวเป็นหินแม่ ซึ่งอาจมีมากพอจนกลายเป็นแหล่งแร่ที่สำคัญโดยมีแร่อื่น ๆ ที่เกิดร่วมได้แก่ ซีโนไทม์ เซอร์คอนและอิลเมไนท์ ในประเทศไทยพบแร่โมนาไซต์อยู่ในแหล่งแร่ดีบุกเกือบทุกแห่ง ทั้งแหล่งลานแร่ บนบก ในทะเล และแหล่งสายคลาบบนภูเขาโดยแหล่งลานแร่มักพบปริมาณของแร่โมนาไซต์ค่อนข้างสูงกว่าแหล่งสายคลา อย่างไรก็ตามตามความสมบูรณ์ของแร่โมนาไซต์เมื่อเทียบกับแร่ดีบุกแล้วต่ำมาก จากตัวอย่างหลุมสำรวจอาจเจอแร่โมนาไซต์ตั้งแต่เพียงร่องรอยหรือในปริมาณที่ต่ำกว่า 0.001%โดยมวล ในขณะที่แร่ดีบุกมีความสมบูรณ์พอที่จะทำเหมืองได้ตั้งแต่ 0.012%โดยมวล ขึ้นไปหัวแร่ดีบุกชั้นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Primary concentrate) โดยปกติมีแร่ดีบุกอยู่ตั้งแต่ 10% ขึ้นไปจนถึง 70-80 %โดยน้ำหนัก และจะมีแร่โมนาไซต์ตั้งแต่ 0.01% จนถึงสูงกว่า 1%โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามในขบวนการแต่งแร่จะมีการสูญเสียของแร่โมนาไซต์พร้อมแร่อื่น ๆ ไปกับหางแร่หรือซีแร่ หลังจากแต่งแร่ดีบุกสะอาดออกไปแล้วจะเหลือมูลค่าแร่หนักหรือแร่คละ ซึ่งประกอบด้วยแร่ที่มีค่าหลายชนิดเป็นแร่พลอยได้จากแร่ดีบุกประกอบด้วยแร่ซีโนไทม์ โมนาไซต์ เซอร์คอน รูไทล์ อิลเมไนต์ ฯลฯ โรงงานที่ผลิตแร่โมนาไซต์ก็คือโรงแต่งแร่ในท้องที่จังหวัดภูเก็ต พังงา และระนอง แหล่งแร่โมนาไซต์สำคัญอีกแหล่งหนึ่งก็คือแหล่งแร่ชายหาด (Beach sand deposit) ที่จังหวัดชุมพร ซึ่งมีการแต่งแร่เซอร์คอนและแร่โมนาไซต์เป็นแร่สำคัญ โดยแร่ดีบุกมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

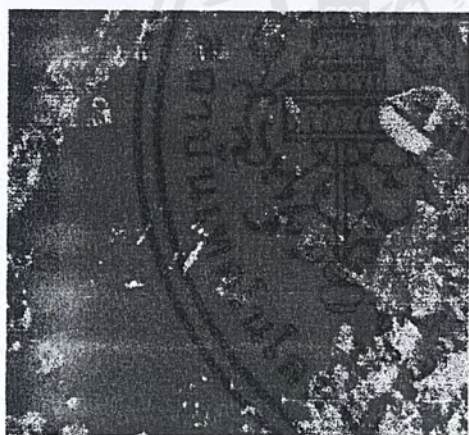
ตารางที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มธาตุหายาก [14]

Element	Symbol	Atomic number	Atomic mass	
Lanthanum	La	57	138.9	Light rare earths
Cerium	Ce	58	140.1	
Praesodymium	Pr	59	140.9	
Neodymium	Nd	60	144.2	
Promethium	Pm	61	145.0	
Samarium	Sm	62	150.4	
Europium	Eu	63	152.0	
Gadolinium	Gd	64	157.3	Heavy rare earths
Terbium	Tb	65	158.9	
Dysprosium	Dy	66	162.5	
Holmium	Ho	67	164.9	
Erbium	Er	68	167.3	
Thulium	Tm	69	168.9	
Ytterbium	Yb	70	173.0	
Lutetium	Lu	71	175.2	
Yttrium	Y	39	88.9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธาตุหายากที่พบมากในเปลือกโลกได้แก่ ซีเรียมมีปริมาณ 46 กรัม/ตัน และแลนทานัม 18 กรัม/ตัน เมื่อคิดเป็นปริมาณธาตุหายากทั้งหมด 144.5 กรัม/ตัน ซึ่งจะมากกว่าทองคำที่มี 0.005 กรัม/ตันถึงประมาณ 3.0×10^4 เท่า เนื่องจากในสารละลายป้อนของการทดลองนี้ประกอบด้วยซีเรียมเป็นจำนวนมากจึงนำเสนอข้อมูลของธาตุซีเรียม

ซีเรียมเป็นธาตุหนึ่งที่มีความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและเทอร์โมไดนามิก ซีเรียมถูกค้นพบโดย Martin Klaproth ในปี 1803 ซึ่งเดิมเชื่อว่าเป็นสารบริสุทธิ์ ซีเรียมเป็นธาตุหายากที่มีมากที่สุดในธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุหายากตัวอื่น ๆ ซึ่งหมายถึงธาตุในอนุกรมแลนทานาไนด์รวมกับอีก 2 ธาตุ คือ อิตเทรียม (Y) และสแกนเดียม (Sc) จัดเป็นธาตุหายากกลุ่มเบา พบมากในแร่โมนาไซต์ และบาสนไซต์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 แหล่งที่มาของธาตุหายาก (ก) แร่โมนาไซต์ (ข) แร่บาสนไซต์ [2]

ซีเรียมที่พบมี 2 เวเลนซ์ คือ Ce^{4+} (Ceric) และ Ce^{3+} (Cerous) โดย Ceric ion เป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรงสามารถถูกรีดิวซ์ได้โดย กรดออกซาลิก กรดแอสไจเจน เกลือเฟอริคและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [14] โดยมากพบในรูป CeO_2 (Ceria) มากที่สุด เนื่องด้วยประจุบวกที่สูง และไอออนมีขนาดเล็กทำให้เกิดลิวทิกสามารถละลายในสารละลายง่ายกว่าไตรวาเลนซ์แลนทานาไนด์อื่น ๆ และจะคงตัวในสารละลายกรดแก่ได้ดี มีสีส้มหรือแดงเนื่องจากแรงปฏิกริยาระหว่างประจุลบในกรดและประจุบวกของซีเรียม ส่วน Ce^{3+} สามารถละลายน้ำได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปในเทอร์ตและคลอไรด์ เช่น $\text{Ce}(\text{OH})_3$ จะถูกออกซิไดส์ได้อย่างรวดเร็วโดยอากาศและออกซิเจนในน้ำจึงอยู่ในรูปผสมของ $\text{Ce}(\text{OH})_3$ และ $\text{Ce}(\text{OH})_4$ และเมื่อผ่านกระบวนการเผาให้ความร้อนจะได้ CeO_2 เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย

กระบวนการผลิตแร่หายากของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก [2] คือ

- 2.1.1.1 การแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยโซดาไฟเข้มข้น เพื่อเปลี่ยนจากสารประกอบฟอสเฟตเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ เมื่อละลายด้วยกรดเกลือ (HCl) และตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะสามารถแยกสารประกอบไฮดรอกไซด์ของยูเรเนียมปนกับทอเรียมออกจากกลุ่มธาตุหายากในสารละลายกรดเกลือ
- 2.1.1.2 การแยกวัสดุนิวเคลียร์ โดยอาศัยกรรมวิธีสกัดด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction) สารละลายอินทรีย์ที่ใช้ คือ ไตรบิวทิลฟอสเฟต (TBP) เจือจางด้วยน้ำมันก๊าด จะได้ยูเรเนียมมาอยู่ในส่วนสกัดและทอเรียมในส่วนคงเหลือ
- 2.1.1.3 การแยกธาตุหายาก ใช้กรรมวิธีสกัดด้วยของเหลวโดยของเหลวที่ใช้คือ TBP ซึ่งแยกซีเรียมออกก่อนโดยใช้อุปกรณ์ปั่นกววน และแยกส่วนที่เหลือโดยใช้หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท (Pulsed perforated plate column) เรียกซีเรียมที่ถูกแยกออกก่อนนี้ว่า ซีเรียมเอนริช (Enriched cerium) ซึ่งนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

2.1.2 ประโยชน์ของธาตุหายาก [2]

2.1.2.1 ในอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก

- ไอออนของซีเรียมที่เป็นองค์ประกอบในแก้ว ทั้ง Ce^{3+} และ Ce^{4+} เป็นตัวดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดดี จึงใช้ซีเรียมผสมในแก้วสีชา สำหรับทำขวดยา ภาชนะบรรจุเปปเปอร์ อาหาร ป้องกันการเสื่อมของสารที่ถูกทำลายได้ด้วยรังสีดังกล่าว
- ใช้ผสมแก้วสำหรับผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์
- แก้วผสมซีเรียมออกไซด์ ใช้ทำแผ่นกำบังรังสีเอกซ์ (X-ray shield) จอโทรทัศน์เพื่อป้องกันมิให้จอเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเนื่องจากถูกอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผงซีเรียมออกไซด์ 60–80% โดยมวลใช้สำหรับขัดเลนส์แว่นตา ปริซึม จอโทรทัศน์ และแก้วคริสตัล โดยไม่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน
- Photochromic glass สำหรับทำเลนส์แว่นตาที่เปลี่ยนเป็นสีเข้มเมื่อถูกรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงแดด โดยเกิดการจับตัวใหม่ของออกไซด์ในเนื้อแก้ว ซึ่งส่วนหนึ่งคือออกไซด์ของซีเรียม และเมื่อไม่ถูกกับแสงแดด แก้วก็จะใสดังเดิม
- ใช้กำจัดสีเขียวจากเหล็กในเนื้อแก้วแทนแมงกานีส แต่มีข้อเสียคือทำให้เกิดสีม่วงหากเติมมากเกินไป
- โคบอลต์ออกไซด์ผสมกับซีเรียมออกไซด์จะทำให้แก้วเป็นสีน้ำเงิน
- เพอร์ซีโอติเมียมหรือนิโอติเมียม ให้ออกสีร่วมกับธาตุอื่น ๆ เช่น ไทเทเนียม แมงกานีส สำหรับเคลือบเลนส์ทำให้ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) สูงขึ้น ช่วยลดการสะท้อนเงาของเลนส์ได้เกือบทั้งหมด

2.1.2.2 ในอุตสาหกรรมสี

- ใช้เป็นแม่สีสีแดง (Cerium sulfide, Ce_2S_3) ทดแทนแม่สีที่ทำจากโลหะหนักเช่น แคดเมียม (Cadmium sulfoselenide) ตะกั่ว (Lead molybdate) โดยมีคุณสมบัติใกล้เคียงกันเช่น สีไม่ซีดเมื่อถูกแสงแดด ความคงทนต่อความร้อน แต่แม่สีซีเรียมแตกตัวง่ายกว่าและไม่เป็นรอย

2.1.2.3 ในอุตสาหกรรมเคมี – ตัวเร่งปฏิกิริยา

- ใช้ซีเรียมเป็นส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนีย เพื่อลดอุณหภูมิของปฏิกิริยาจาก 450 – 550 องศาเซลเซียส เป็น 400 – 470 องศาเซลเซียส
- ใช้อิทเทรียมหรือซีเรียมเป็นส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับของเสียจากการเผาไหม้ของน้ำมันรถยนต์ (Catalytic converter) ซึ่งตามปกติจะต้องใช้สารถึง 3 ชนิด คือ แพลทินัม โรเดียม และแพลเลเดียมผสมกัน และมีราคาแพงโดยเฉพาะอย่างยิ่งแพลทินัม การใช้ธาตุหายากมาผสมช่วยให้สามารถใช้แพลเลเดียมเพียงธาตุเดียวได้ ซึ่งมีราคาถูกกว่าเป็นผลให้ค่าใช้จ่ายลดลงร้อยละ 30 – 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้ซีเรียมเป็นสารกันรอยคแทนสารตะกั่วได้ดีและช่วยลดมลพิษ

2.1.2.4 ในอุตสาหกรรมโลหะ

- การเติมซีเรียมเข้าไปในเหล็กเล็กน้อย (0.02%โดยน้ำหนัก) ทำให้แกรไฟต์เปลี่ยนรูปจากลักษณะเป็นแผ่นมาเป็นทรงกลม ความเปราะลดลงเรียกว่า High strength low alloy steel ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานวิศวกรรม ทั้งในด้านวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมยานยนต์
- ใช้ Mischmetal หรือ Rare earth silicides ซึ่งมีธาตุหายากอยู่ 30%โดยน้ำหนัก เติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม แมกนีเซียม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลที่อุณหภูมิสูง สำหรับผลิตเครื่องยนต์ของเครื่องบิน

2.1.2.5 ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟอสฟอรัส

- ผสม Gallium – gadolinium – garnet ใช้ทำ Bubble memory film ใช้ในระบบคอมพิวเตอร์ฟิล์มชนิดนี้สามารถเก็บข้อมูลด้วยความเร็วสูงกว่าแถบแม่เหล็ก (Magnetic tape) และจานแม่เหล็ก (Magnetic disc) ประมาณ 10 เท่าตัวแต่ใช้พลังงานน้อยกว่า นอกจากนี้ข้อมูลที่เก็บไว้จะไม่ถูกลบออกเมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าดับ
- ใช้เส้นทางนำออกไซด์มากถึง 20%โดยน้ำหนัก ผสมในใยแก้วนำแสง (Optic fiber) ซึ่งต้องเป็นแก้วที่มีค่าดัชนีหักเหสูง ๆ
- การใช้ธาตุหายากผลิตได้หลอดไฟเรืองแสงมีพัฒนาการอยู่เรื่อย ๆ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานลงกว่าหลอดไฟแบบเก่า เนื่องจากตัดพลังงานบางส่วนที่ไม่จำเป็นต่อสายตาในสเปกตรัมของแสงสีขาวออกไป เช่น ยูโรเพียมใน Strontium chlor apatite ให้แสงในช่วงน้ำเงิน-ม่วง ยูโรเพียมในอิตเทรียมออกไซด์ให้แสงในช่วงส้ม – แดง และซิงค์ซิลิเกตให้แสงในช่วงสีเขียว
- นิโอดีเนียมใช้เป็นวัสดุต้นกำเนิดแสงเลเซอร์
- ในการผลิตพลังงานสำหรับอนาคต แลนทานัม – นิกเกิลอัลลอย (LaNi_5) สามารถดูดซับและคายไฮโดรเจนเป็นปริมาณมาก ๆ ได้ในอุณหภูมิและความดันที่ไม่สูงนักและยังดูดซับด้วยอัตราที่สูงมาก ช่วยลดอันตรายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บกักไฮโดรเจนซึ่งมีความดันสูงและติดไฟง่ายจนอาจเกิดการระเบิดได้ นอกจากนี้ LaNi_5 ถูกนำมาผลิตแบตเตอรี่แห้งชนิด Rechargeable ตระกูล Nickel-metal hydride (Ni-MH) โดยมีความจุไฟฟ้าสูงกว่าแบตเตอรี่แบบนิเกิล-แคดเมียมถึง 1.6-2 เท่าตัว ซึ่งนอกจากความจุไฟฟ้าที่สูงกว่าแล้วยังไม่ทำให้เกิดมลพิษเหมือนแคดเมียมที่เป็นโลหะหนักอีกด้วย

2.1.2.6 ในอุตสาหกรรมสารตัวนำยิ่งยวด

- สารประกอบออกไซด์เชิงซ้อนระหว่างแลนทานัมกับทองแดง แสดงคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวด
- สารประกอบเซรามิกของอิตเทรียม แบริยม ทองแดง และออกซิเจน มีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิ 90-160 เคลวิน ซึ่งอุณหภูมิในระดับนี้สามารถใช้ในโทรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็นแทนฮีเลียมเหลวที่มีราคาสูงกว่าได้

2.1.2.7 ในทางนิวเคลียร์เทคโนโลยีและเซลล์เชื้อเพลิง [15]

- ธาตุแลนทาไนด์และสารประกอบใช้ได้มากในนิวเคลียร์เทคโนโลยี เช่น การควบคุมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์และควบคุมการไหลของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์
- ทางด้านพลังงาน เซลล์เชื้อเพลิงชนิด Solid oxide fuel cell (SOFC) ที่มีส่วนประกอบสำคัญของเซลล์ทุกส่วนทำมาจากธาตุหายากทั้งสิ้น โดยแลนทานัมเป็นส่วนประกอบของขั้วลบ

2.1.2.8 ในทางการแพทย์และทางการเกษตร [15]

- เกลือซาลิไซเลต (Salicylates) ของเพรซีโอดีเมียม (Pr) และนีโอดีเมียม (Nd) ใช้เป็นยารักษาเชื้อโรค เกลือของซีเรียมใช้สำหรับรักษาอาการคลื่นไส้และเมาเรือ เกลือของเออร์เบียม (Er) และซีเรียมสามารถเพิ่มปริมาณของเม็ดเลือดแดงและฮีโมโกลบินในเลือดได้

2.2 เยื่อแผ่น [12], [16]

เยื่อแผ่น (Membrane) คือวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นกลางแบ่งสารละลาย 2 เฟส ออกจากกัน และจำกัดการถ่ายเทสารเคมีองค์ประกอบต่างๆ ให้มีความจำเพาะมากๆ

ชนิดของเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งตามลักษณะขององค์ประกอบพื้นฐานออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.2.1 เยื่อแผ่นชนิดเอกพันธ์ (Homogeneous membrane) คือเยื่อแผ่นที่ประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานเพียงชนิดเดียวขณะใช้งาน นิยมใช้ในการกรอง เช่น เยื่อแผ่นเหลวที่ทำจากแก้ว เยื่อแผ่นเหลวที่ทำจากสารพอลิเมอร์ เป็นต้น

2.2.2 เยื่อแผ่นชนิดวิวิธพันธ์ (Heterogeneous membrane) คือเยื่อแผ่นที่ประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐานสองชนิดขึ้นไปขณะใช้งาน โดยมากเป็นการนำเยื่อแผ่นชนิดเอกพันธ์มาทำการประยุกต์เพื่อให้การใช้งานมีลักษณะที่เฉพาะมากขึ้น เช่น เยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane)

ถ้าหากแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของเยื่อแผ่น ก็จะแบ่งเยื่อแผ่นออกได้หลายแบบ เช่น มีโครงสร้างแบบสมมาตรหรืออสมมาตร มีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลว อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุเป็นบวกหรือลบหรืออาจมีทั้ง 2 ขั้วก็ได้ เพื่อใช้ในการเลือกผ่านองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวอาจแปรผันได้ตั้งแต่น้อยกว่า 100 ไมโครเมตร จนถึงมากกว่า 1 เซนติเมตร เพื่อประโยชน์ในการใช้งานและความทนทานต่อสภาวะที่ต่างกัน เยื่อแผ่นอาจมีความต้านทานไฟฟ้าตั้งแต่หลายเมกกะโอห์มจนถึงน้อยกว่า 1 โอห์ม การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่อาจเกิดขึ้นโดยอาศัยการพา (Convection) หรือการแพร่ (Diffusion) ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้า หรือความแตกต่างของความเข้มข้น ความดัน และ อุณหภูมิก็ได้ [16]

2.3 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว [16]

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวเป็นกระบวนการแยกที่รวมเอาขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนของการดั่งกลับ ให้เกิดอยู่ในหน่วยปฏิบัติการเดียว ปฏิกริยาจะเกิดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวโดยอาศัยสารพาเป็นตัวเลือกผ่านไอออนของสารที่ต้องการ

โดยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจะประกอบด้วยของเหลว 3 เฟสด้วยกัน คือ เฟสของสารละลายป้อน เยื่อแผ่นของเหลว และสารละลายสตริป

2.3.1 กลไกการถ่ายเทมวลที่ใช้ในกระบวนการสกัดทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 กลไกหลักคือ

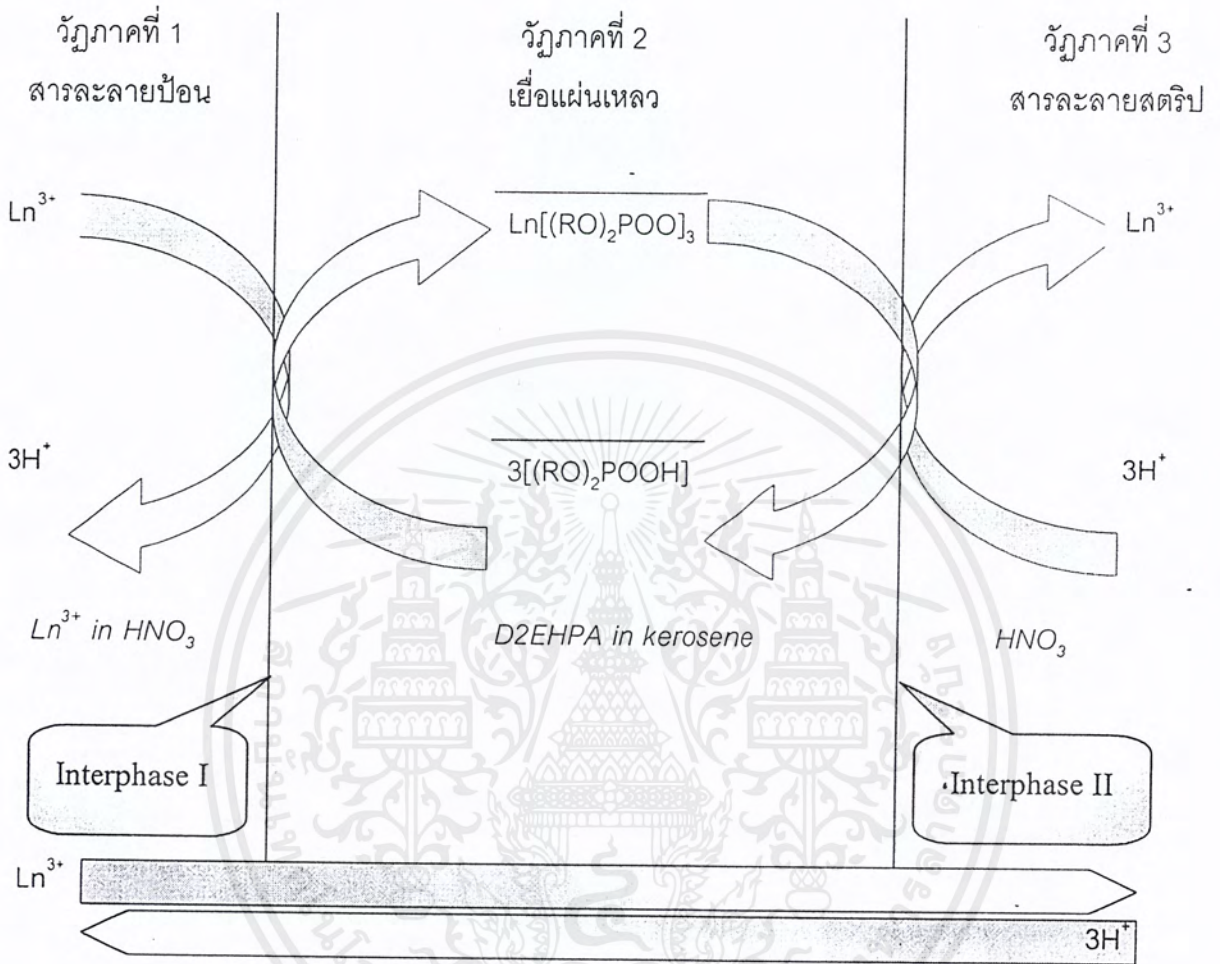
2.3.1.1 กลไกการถ่ายเทโดยไม่อาศัยตัวพา (Unfacilitated transport)

กลไกนี้อาศัยความสามารถในการละลายที่ดีกว่าของตัวถูกละลาย ในตัวทำละลายอีกชนิดหนึ่ง เป็นกลไกพื้นฐานสำหรับการสกัดด้วยตัวทำละลายทั่วไป อย่างไรก็ตาม ถ้าในสารละลายป้อนมีตัวถูกละลายหลายชนิดที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ใช้เป็นตัวสกัดแล้ว กลไกนี้จะให้ความสามารถในการเลือกต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำ

2.3.1.2 กลไกการถ่ายเทโดยอาศัยตัวพา (Facilitated transport)

กลไกนี้มีความสามารถในการเลือกสูงกว่ากลไกแบบที่ 1 และเหมาะสำหรับไอออนที่ไม่สามารถละลายในวัฏภาคอินทรีย์ได้ เช่น ไอออนโลหะ เป็นต้น โดยกลไกนี้ต้องใช้ตัวพาหรือสารสกัดในการเลือกผ่านเฉพาะไอออนที่ต้องการสกัด โดยการทำให้ปฏิบัติกริยาเคมีกับสารสกัดดังกล่าวที่พื้นผิวสัมผัส (อินเตอร์เฟส I) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งจะแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นไปยังพื้นผิวสัมผัสและเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับคายไอออนดังกล่าวออก (อินเตอร์เฟส II) จากนั้นสารสกัดจะแพร่กลับที่อินเตอร์เฟส I เพื่อเริ่มปฏิกิริยาการสกัดต่อไป ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งขีดบนตัวอักษรหมายถึง วัฏภาคเยื่อแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กลไกการสกัดธาตุหายาก (Ln) ด้วย D2EHPA ในน้ำมันก๊าด [12]

2.3.2 รูปลักษณะของเยื่อแผ่นเหลว

รูปร่าง (Configuration) เยื่อแผ่นเหลวสามารถถูกเตรียมขึ้น ในรูปร่างลักษณะต่าง ๆ ได้ 3 แบบหลัก ๆ [16] เพื่อให้มีความหนาของเยื่อแผ่นที่เหมาะสมกับระบบดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่เคลื่อนที่ไม่ได้ (Immobilized liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่เคลื่อนที่ไม่ได้ หรือที่นิยมเรียกว่า Supported liquid membrane มีลักษณะสำคัญ คือ เยื่อแผ่นเหลวจะถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยบรรจุของเหลวภายในรูพรุนของตัวพองที่โดยมากเป็นวัสดุจำพวกพอลิเมอร์ วัสดุรองรับควรมีความพรุนสูงเพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทมวล และมีขนาดรูพรุนที่เล็กพอที่จะรองรับเยื่อแผ่นเหลว เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวจะยึดติดกับตัวพองโดยอาศัยแรงคาปิลารี (Capillary force) เพียงอย่างเดียว [1] ชนิดของวัสดุรองรับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดได้แก่ วัสดุรองรับชนิดไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งจะใช้พองวัสดุเยื่อแผ่นที่เป็นสารละลายอินทรีย์สำหรับระบบ น้ำ - น้ำมัน - น้ำ และวัสดุรองรับชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งจะใช้พองวัสดุเยื่อแผ่นที่เป็นสารละลายเอเควียส สำหรับระบบ น้ำมัน - น้ำ - น้ำมัน รูปร่างลักษณะของเยื่อแบบแผ่นยังแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามรูปแบบของวัสดุรองรับได้แก่

1) ตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat-sheet support)

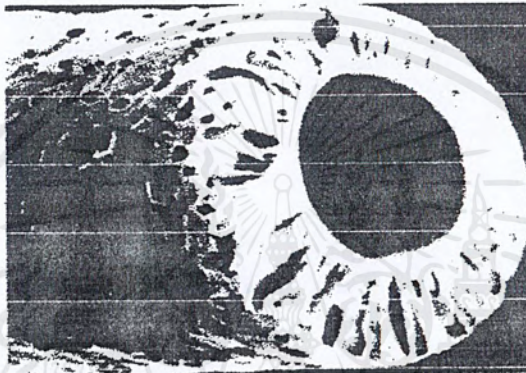
ตัวรองรับแบบแผ่นแบน มีลักษณะเป็นแผ่นบางซึ่งอาจเป็น 2 แผ่นวางขนานกันและบรรจุของเหลวที่เป็นเยื่อแผ่น (Membrane liquid) ระหว่างตัวรองรับทั้งสองแผ่นนี้ หรืออาจใช้เพียงแผ่นเดียวและเคลือบฝัง (Impregnate) ของเหลวดังกล่าวซึ่งจะช่วยลดความหนาของชั้นเยื่อแผ่นเหลวลงได้มาก ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิซิลิโคน เป็นต้น [12], [16]

2) ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (Hollow-fiber liquid membrane)

ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงลักษณะจะคล้ายกับตัวรองรับแบบแผ่นแบนที่ใช้แผ่นพอลิเมอร์เพียงแผ่นเดียว แต่พอลิเมอร์ที่ใช้จะอยู่ในรูปของเส้นใยกลวงแทนแบบแผ่นแบนซึ่งจะให้พื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูงมาก รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของพอลิเมอร์ชนิดไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic polymer) ในการดำเนินการสกัดจำเป็นต้องเคลือบฝังสารละลาย

อินทรีย์ในรูพรุนของเส้นใยกลวงโดยการหมุนเวียนสารละลายอินทรีย์เข้าสู่ด้านในของเส้นใยกลวง
เอ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

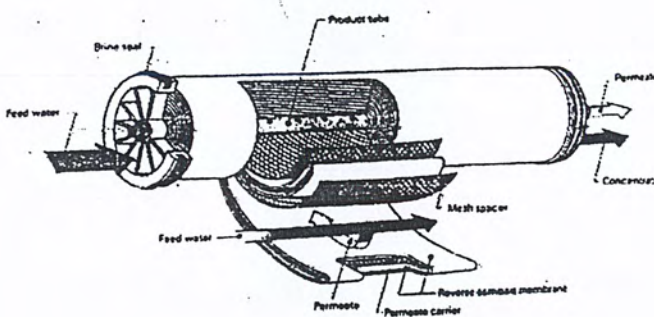
ประมาณ 5 -10 นาที ซึ่งสารละลายอินทรีย์จะซึมเข้าสู่รูพรุนด้วยสัมพรรคภาพ (ความชอบ, Affinity) ระหว่างพอลิเมอร์กับสารละลายอินทรีย์ และถูกขังอยู่ภายในด้วยแรงคาปิลารี จากนั้นล้างสารละลายอินทรีย์ที่ค้างอยู่ภายในออก และเริ่มต้นป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปเข้าสู่ภายในโมดูลพร้อมกัน โดยอาจให้ไหลตามกันหรือสวนทางกันก็ได้ และอาจเลือกให้สารละลายชนิดใดไหลภายในท่อก็ได้



รูปที่ 2.3 ลักษณะของโมดูลแบบเส้นใยกลวง [12]

3) ตัวรองรับแบบเส้นใยม้วน (Spiral - wound support)

ลักษณะของเส้นใยแบบม้วนจะคล้ายกับเส้นใยแบบแผ่นแบน เพียงแต่นำม้วนให้กะทัดรัดขึ้น โดยสารละลายเอควิวสทั้ง 2 เฟสจะต้องไหลเป็นเกลียวขนานไปกับผิวหน้าของเยื่อแผ่นเหลว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของโมดูลแบบเส้นใยม้วน [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวรองรับแบบเส้นใยมันจะใช้แทนโมดูลของเส้นใยกลวงเมื่อสารละลายป้อนมีความสกปรกมาก เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกลวงเล็กมาก ทำให้เกิดการอุดตันได้ง่ายเมื่อสารละลายป้อนมีสิ่งเจือปนมาก

2.3.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่เคลื่อนที่ได้ (Mobilized liquid membrane)

เยื่อแผ่นของเหลวที่เคลื่อนที่ได้หรือเรียกว่าเยื่อแผ่นของเหลวที่ไม่ถูกพุง (Unsupported liquid membrane) ได้แก่ เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion liquid membrane, ELM) ลักษณะของอิมัลชันจะประกอบด้วยเฟสภายใน (Internal or encapsulated) และตัวเยื่อแผ่นเหลวเอง โดยเฟสเยื่อแผ่นจะล้อมรอบเฟสภายใน จากนั้นต้องนำอิมัลชันนี้ไปสัมผัสกับเฟสภายนอก (External phase) เพื่อให้เกิดการสกัด และการดึงกลับขึ้นพร้อม ๆ กัน ขั้นตอนการดำเนินงานสามารถสรุปเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1) การเตรียมอิมัลชัน (Emulsification)

โดยปกติแล้วเมื่อกวนสารละลาย 2 ชนิดที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน จะเกิดอิมัลชันขึ้น แต่อิมัลชันดังกล่าวจะคงรูปอยู่ไม่นาน ดังนั้น เพื่อให้อิมัลชันที่เตรียมขึ้นมีความเสถียรตลอดการดำเนินการสกัด จึงต้องเติมสารทำให้เสถียรหรือสารลดแรงตึงผิว (Stabilizer, emulsifier, หรือ surfactant) ทั้งนี้การเตรียมอิมัลชันต้องใช้ความเร็วรอบสูง ๆ (ประมาณ 10,000 รอบต่อนาที) โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Homogenizer เพื่อให้อิมัลชันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมยิ่งเล็กเท่าใด พื้นที่ผิวต่อปริมาตรของทรงกลมก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดภายใน (Encapsulated droplet) จะอยู่ในช่วง 1-3 ไมครอน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโกลบูลอิมัลชัน (Emulsion globule) ภายนอกจะอยู่ในช่วง 0.1-1.2 มิลลิเมตร ทั้งนี้ขนาดดังกล่าวขึ้นอยู่กับความแรงของการกวน ความหนืดของสารละลายทั้ง 2 ชนิด ที่เกิดเป็น

อิมัลชัน และธรรมชาติและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว [16] ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELM ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่อิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน (Water-in-oil emulsion, W/O) เมื่อเฟสภายใน (Internal phase) เป็นสารละลายน้ำและแบบน้ำมันในน้ำ (Oil-in-water emulsion, O/W) เมื่อเฟสภายในเป็นสารละลายอินทรีย์อิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ ถูกนำไปสัมผัสกับสารละลายน้ำ จะได้ระบบของน้ำ-น้ำมัน-น้ำ (W/O/W) ในขณะที่ถ้าเป็นอิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน (W/O emulsion) จะได้ระบบของน้ำมัน-น้ำ-น้ำมัน (O/W/O) ดังนั้นชนิดของสารลดแรงตึงผิวจึงแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะของอิมัลชัน กล่าวคือ สารลดแรงตึงผิวแบบชอบน้ำ (Hydrophilic surfactant) สำหรับอิมัลชันน้ำมันในน้ำ และ สารลดแรงตึงผิวแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surfactant) สำหรับ อิมัลชันน้ำในน้ำมัน

2) การสกัดและการดึงกลับ (Extraction and stripping steps)

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการนำอิมัลชันที่เตรียมขึ้นในขั้นตอนแรก ไปสัมผัสกับเฟสภายนอกหรือเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) เพื่อให้เกิดการสกัดและการดึงกลับขึ้น โดยปกติแล้วการเตรียมอิมัลชันจะให้สารละลายสตริปเป็นเฟสภายในและสารละลายป้อนเป็นเฟสต่อเนื่อง เพื่อเป็นการแยกและเพิ่มความเข้มข้นให้กับตัวถูกละลายที่ถูกสกัดมา นอกจากนี้จะทำให้สามารถทิ้งส่วนกราฟิเฟนตได้ทันที ในขณะที่วัฏภาคภายในที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ต้องผ่านขั้นตอนต่อไป

3) การพัก (Setting)

เมื่อการสกัดเสร็จสิ้นแล้ว จะยุติการกวนเพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างกราฟิเฟนตกับอิมัลชันที่มีตัวถูกละลายที่ถูกสกัดได้ แล้วนำอิมัลชันไปบำบัดในขั้นต่อไป

4) การแตกอิมัลชัน (Demulsification)

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการแตกอิมัลชัน เพื่อนำตัวถูกละลายที่สกัดได้ในสารละลายสตริปไปใช้งาน และ/หรือเพื่อนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวไปใช้เตรียมอิมัลชันขึ้นมาใหม่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

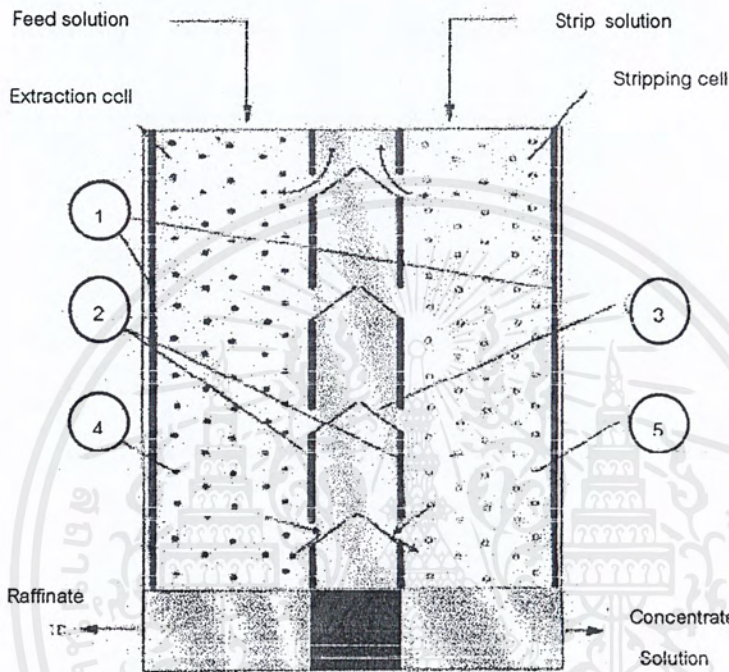
โดยทั่วไป การแตกอิมัลชันนิยมใช้อยู่ 2 วิธีได้แก่ การเติมสารแตกอิมัลชัน (Demulsifier) เพื่อยับยั้งการทำงานของ Emulsifier แต่วิธีนี้อาจทำให้ไม่สามารถนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวไปใช้ได้อีกต่อไป และการใช้กระแสไฟฟ้าในการแตกตัวของอิมัลชัน

2.3.3 Electrostatic pseudo-liquid membrane (ESPLIM)

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1988 ซึ่งเป็นการรวมเทคนิคของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) กับหลักการของเยื่อแผ่นเหลว ESPLIM มีข้อดีเหนือกว่ากระบวนการเยื่อแผ่นเหลวอื่น คือลดการดำเนินการที่ซับซ้อนของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน และเอาชนะความไม่เสถียรของเยื่อแผ่นเหลวที่ถูกพองได้ ซึ่งกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวนี้นี้เป็นกระบวนการที่ไม่มีสมดุลของการถ่ายเทมวล (Non-equilibration mass transfer) ข้อดีประการหนึ่งของเทคนิคนี้คือต้องใช้ของเหลวที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นในปริมาณมาก เนื่องจากระบบนี้ใช้ของเหลวที่เป็นเยื่อแผ่นของเหลวที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง [17] ESPLIM จะเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์พิเศษดังรูปที่ 2.5

ในกระบวนการนี้ ของเหลวเยื่อแผ่นของเหลวจะเป็นเฟสต่อเนื่อง และสารละลายน้ำทั้งสองจะถูกพ่นเป็นละอองเข้าสู่แต่ละฝั่งของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งถูกแยกด้วยแผ่นกั้น (Divider) แผ่นกั้นดังกล่าวจะเป็นแผ่นพลาสติกสามเหลี่ยมยกขึ้นตรงกลาง และถูกร้อยเชื่อมกันด้วยเส้นลวด สามเหลี่ยมปลายแหลมนี้อาจทำหน้าที่ป้องกันการไหลข้ามฝั่งของสารละลายป้อนและสารละลายสตริป ในขณะที่เส้นลวดทำหน้าที่เป็นสายดิน ที่ข้างถึงด้านในจะต่อกับสายไฟแรงสูงเพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าให้กับสารละลายเอเคเวียส ทำให้เกิดการกระจายตัวเป็นหยดเล็ก ๆ ในของเหลวเยื่อแผ่นเหลว ปฏิกริยาการสกัดจะเกิดขึ้นที่รอบ ๆ หยดของสารละลายป้อน จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะแล้วจะแพร่ไปสู่ฝั่งสารละลายสตริปด้วยความแตกต่างของความเข้มข้น ปฏิกริยาการดึงกลับจะเกิดขึ้นที่รอบ ๆ หยดของสารละลายสตริป กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบ จะมีผลต่อหยดน้ำเท่านั้น เนื่องจากในระบบนี้หยดน้ำจะมีขั้ว แต่เยื่อแผ่นเหลวจะไม่มีขั้ว ดังนั้น เมื่อหยดน้ำไหลเข้าสู่แผ่นพลาสติกจะเกิดการรวมตัวเป็นหยดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณดังกล่าวไม่มีกระแสไฟฟ้าที่ทำหน้าที่กระจายหยดน้ำ และเมื่อหยดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น ก็ จะตกลงสู้งของตัวเองด้วยแรงดึงดูดของโลก



รูปที่ 2.5 ESPLIM (Electrostatic pseudo-liquid membrane) (1) ขั้วไฟแรงดันสูง (2) ขั้วลบ (3) แผ่นกั้น (4) หยดละอองของสารละลายป้อน (5) หยดละอองของสารละลายstripping [16]

เมื่อเข้าสู่สนามไฟฟ้าหยดน้ำมันก็จะกระจายเป็นหยดเล็กๆ อีกครั้งเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น และเมื่อหยดน้ำตกลงมาเรื่อย ๆ ตามแรงดึงดูดโลกจนถึงบริเวณที่ไม่มีกระแสไฟฟ้า ก็จะเกิดการรวมตัวเป็นหยดใหญ่ขึ้นและตกลงสู่ถังพัก ก่อนปล่อยจากเครื่องปฏิกรณ์

2.4 ลักษณะเฉพาะของกระบวนการเยื่อแผ่นของเหลว

กระบวนการสกัดด้วยสารสกัดนั้น เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป - โดยถือเป็นพื้นฐานของกระบวนการแยก ในกระบวนการดังกล่าวสารที่ต้องการแยกจะละลายรวมอยู่ในตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ จึงทำให้การแยกโดยวิธีอื่นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากสารเหล่านั้นละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกันหมด การแยกโดยอาศัยกระบวนการทางกลจึงเป็นไปได้ยาก การสกัดจึงอาศัยความสามารถในการละลายในตัวทำละลายต่างกัน โดยแพร่เข้าสู่สารที่สามารถละลายได้ดีกว่า แล้วทำให้สารที่ต้องการนั้นเข้าสู่อีกเฟสหนึ่ง โดยต้องอาศัยพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนเป็นจำนวนมากและต้องพิจารณาอัตราในการสกัดอีกด้วย เพื่อให้เกิดการสกัดได้สูงขึ้น จึงต้องเพิ่มพื้นที่สัมผัสที่เกิดปฏิกิริยาหรือการเพิ่มอัตราการสกัดให้มากขึ้น กระบวนการสกัดนั้นอาศัยอุปกรณ์ที่สำคัญ 2 ชนิดคือ เครื่องปั่นกววน (Mixer-settler) เพื่อให้เกิดการสร้างฟิล์มบางๆ ให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา การสกัดอาจใช้เป็นแบบสมดุลเดียวหรือทำการต่อเชื่อมเข้าด้วยกันเป็นแบบหลายสมดุล และอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างสารสกัดกับสารละลายป้อน (Counter current contacting equipment) โดยมักจะอยู่ในรูปแบบของคอลัมน์ หรือเครื่องเหวี่ยงแบบหมุนเพื่อให้เกิดจำนวนชั้นสมดุลมาก ๆ ในเครื่องเดียว

วิธีการสกัดโดยใช้เครื่องสกัดแบบปกตินั้นมีข้อด้อยหลายประการดังนี้

- 1) ควบคุมการรวมตัวและแตกออกของสารที่ต้องการ
- 2) ปัญหาการเกิดอิมัลชันของสารทำให้การสกัดเป็นไปได้ยาก
- 3) ปัญหาการท่วม (Flooding) และข้อจำกัดด้านปริมาณการป้อนสารในการป้อนสารแบบต่อเนื่อง
- 4) ต้องรักษาให้ความหนาแน่นของทั้งสองเฟสมีความต่างกันอยู่เสมอ
- 5) ค่าใช้จ่ายที่สูง และ การบำรุงรักษาที่ลำบาก
- 6) การขยายขนาด เป็นไปได้ยากเนื่องจากต้องอาศัยพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อได้เปรียบของ SLM [5], [16] ได้แก่

- 1) ใช้พลังงานน้อย
- 2) ค่าบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่มาก การสึกหรอจึงต่ำ
- 3) สามารถใช้สารสกัดที่มีราคาแพงแต่คุณภาพสูงได้ เนื่องจากปริมาณของของเหลวที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นเหลวน้อยมาก ๆ ใช้เพียงเติมในรูปพูนให้เต็มเท่านั้น

แม้ SLM จะมีข้อได้เปรียบมากมาย แต่ก็มีข้อด้อยประการสำคัญ คือ ช่วงชีวิต (Lifetime) ที่สั้นของเยื่อแผ่นเหลว [5] เนื่องจากของเหลวที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะถูกชะออกจากรูปพูนด้วยความสามารถในการละลายในสารละลายป้อนและสารละลายสตริปทั้ง 2 เฟส และแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของของไหล ตามอุดมคติแล้วของเหลวที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะต้องไม่ละลายเลยในสารละลายทั้ง 2 เฟส แต่ถ้าของเหลวดังกล่าวสามารถละลายได้ในสารละลายทั้ง 2 เฟส จะสามารถลดการละลายได้โดยการทำให้สารละลายทั้ง 2 เฟสอิ่มตัวก่อน (Presaturated) ด้วยของเหลวดังกล่าว

สมบัติที่ดีของตัวแปรกระบวนการ (Process parameters) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวของ ได้แก่

- 1) เยื่อแผ่นเหลวต้องมีความหนืดต่ำ เพื่อให้มีความต้านทานต่อการแพร่ร้อยละ แต่ต้องไม่ต่ำมากจนเกินไป เพราะสารละลายเอเควียสจากระยะของเหลวเยื่อแผ่นเหลวด้วยแรงเฉือน
- 2) สารละลายป้อนและสารละลายสตริปควรมีอุณหภูมิสูง เพื่อเร่งปฏิกิริยาเคมีให้เกิดขึ้นเร็วขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นของสารละลายทั้งสองด้านยังเพิ่มความสามารถในการละลายของของเหลวเยื่อแผ่นเหลวด้วย

คุณสมบัติที่ดีสำหรับพอลิเมอร์เส้นใยที่นำมาเป็นตัวพองเยื่อแผ่นเหลว [4]

- 1) เส้นใยควรมีความพรุนสูง (High porosity) เพื่อให้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) รูพรุนจุลภาคควรมีขนาดเล็ก เพื่อป้องกันมิให้สารเจือปนขนาดใหญ่ผ่านไปได้และเพิ่มช่วงชีวิตของเยื่อแผ่นเหลว ในขณะที่เดียวกันถ้าขนาดของรูพรุนนั้นเล็กเกินไปก็จะขัดขวาง การแพร่ของไฮออน ทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทมวลลดลง โดยปกติในการสกัดไฮออนโลหะจะใช้ขนาดของรูพรุนจุลภาคในช่วง 0.1-1.0 ไมครอน

3) เส้นใยควรมีผนังบาง เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล แต่ถ้าผนังของเส้นใยบางเกินไปก็จะมีผลทำให้ช่วงชีวิตของเยื่อแผ่นเหลวล้นลง

4) วัสดุที่ใช้ควรเป็นชนิดไม่ชอบน้ำ

5) วัสดุที่ใช้ควรเป็นพอลิเมอร์ที่ทนต่อสารเคมี เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเส้นใย

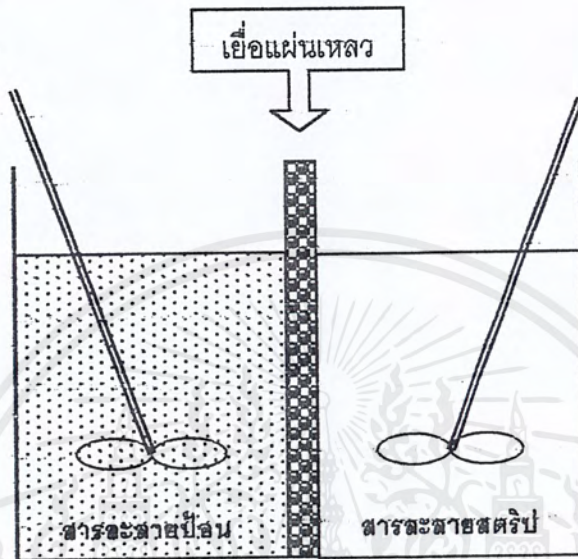
6) ราคาไม่แพง

การสกัดธาตุหายากด้วยเส้นใยแบบแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะมีลักษณะของรูพรุนจุลภาค (Microporous flat sheet) จำนวนมาก จะเริ่มต้นด้วยการละลายธาตุหายาก ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น และเจือจางด้วยกรดไนตริกเจือจางเป็นสารละลายป้อน ขณะเดียวกันก็ละลายสารสกัดซึ่งในที่นี้ คือ D2EHPA ในตัวทำละลายอินทรีย์ซึ่งในที่นี้ คือน้ำมันก๊าด จากนั้นเคลือบสารละลายอินทรีย์ที่ได้นี้ลงบนแผ่นเส้นใยดังกล่าวโดยการแช่แผ่นเส้นใยลงในสารละลายอินทรีย์ สารละลายอินทรีย์นี้จะซึม (Permeate) เข้าสู่รูพรุนจุลภาคด้วยสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน เกิดเป็นเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยแบบแผ่น [15] เมื่อเยื่อแผ่นเหลวที่ได้ถูกนำไปสัมผัสกับสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป ซึ่งได้แก่ สารละลายกรดไนตริกเจือจาง สารละลายทั้งสองจะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะเดียวกันโดยมีเยื่อแผ่นเหลวที่ถูกพองด้วยเส้นใยแบบแผ่นกั้นกลางกระบวนการสกัดและการดึงกลับจะเริ่มต้นขึ้น เพื่อแยกสารละลายทั้งสองชนิดออกจากกัน ทั้งนี้สารละลายป้อนและสารละลายสตรีปจะถูกทำให้อิ่มตัวก่อน (Presaturated) ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ เพื่อลดการละลายของสารละลายอินทรีย์ที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวออกมาในสารละลายทั้งสองนั้น [4] เป็นการเพิ่มช่วงชีวิตของเยื่อแผ่นเหลว

เมื่อสารละลายป้อนสัมผัสกับสารละลายอินทรีย์ ไฮออนธาตุหายากจะถูกเลือกสกัดเข้าสู่

สารละลายอินทรีย์ โดยการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารสกัดที่ผิวสัมผัส | จากนั้นสารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ไปยังผิวสัมผัส II ด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นและเกิดปฏิกิริยา
ย้อนกลับเป็นไอออนธาตุหายากกับสารสกัด ซึ่งไอออนธาตุหายากจะถูกดึงสู่สารละลายสตริป



รูปที่ 2.6 ระบบการสกัดแบบกะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงตัวด้วยเส้นใยแบบแผ่น

2.5 กระบวนการถ่ายโอนมวลแบบคู่ควบ (Coupled transport process)

การถ่ายโอนมวลแบบคู่ควบ คือ กระบวนการถ่ายโอนมวลชนิดหนึ่งผ่านเยื่อแผ่นเหลว เพื่อ
การเพิ่มความเข้มข้นและแยกไอออนโลหะจากสารละลายป้อน เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในกระบวนการ
ประกอบด้วยของเหลวที่ไม่ละลายน้ำถูกละลายด้วยสารสกัดชนิดที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน
(Complexing agent) กับไอออนโลหะและแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งที่อยู่
ตรงกันข้ามและจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ไอออนโลหะและสารสกัด โดยสารสกัดจะแพร่กลับไ
ยังผิวสัมผัสแรกและไอออนโลหะจะแพร่เข้าไปในสารละลายด้านสตริป [1]

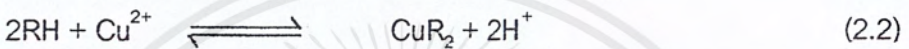
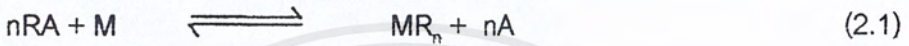
กระบวนการถ่ายโอนมวลแบบคู่ควบสามารถแบ่งได้สองลักษณะตามชนิดของปฏิกิริยาที่
เกิดขึ้นระหว่างสารที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวและสารสกัด ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การถ่ายโอนมวลแบบสวนทาง (Counter transport) มีลักษณะการถ่าย

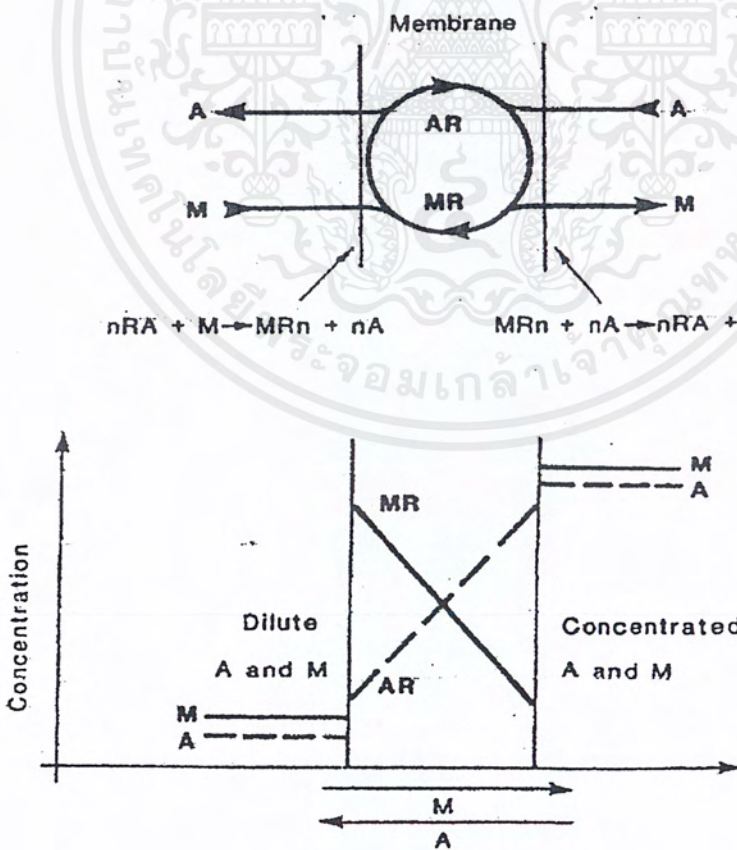
โอนมวลที่อัตราการถ่ายโอนมวลของไอออนที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวทั้งสองตัวมีการแพร่ในทิศทางตรงกันข้าม กรณีนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะดังนี้

สมการปฏิกิริยาในรูปทั่วไป [5], [16]



สมการ 2.2 เป็นตัวอย่างของปฏิกิริยาสำหรับการถ่ายโอนมวลของไอออนทองแดง

เมื่อ M คือ Cu^{2+} และ A คือ H^+



รูปที่ 2.7 การถ่ายโอนมวลแบบสวนทางกัน [1]

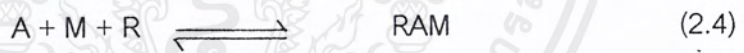
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายโอนมวลชนิดการถ่ายโอนแบบสวนทางไม่ได้จำกัดเฉพาะไอออนที่มีประจุบวกเท่านั้น สำหรับไอออนที่มีประจุลบก็สามารถเกิดการถ่ายโอนมวลเช่นกัน แต่ต้องเลือกสารสกัดให้เหมาะสม ตัวอย่างเช่น การถ่ายโอนมวลของยูเรนิลไอออน (Uranyl ion) โดยเกลือเทอเชียรีเอไมด์ $((R_3NH)_2SO_4)$

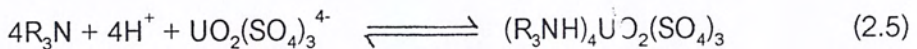


กรณีนี้ M คือ $UO_2(SO_4)^{2-}$ และ A คือ SO_4^{2-}

2.5.2 การถ่ายโอนมวลแบบตามกัน (Co-transport) มีลักษณะการถ่ายโอนมวลที่อัตราการถ่ายโอนมวลของไอออนที่แพร่ผ่านทั้งสองตัวมีการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวในทิศทางเดียวกัน สมการปฏิกิริยาในรูปทั่วไป [1]

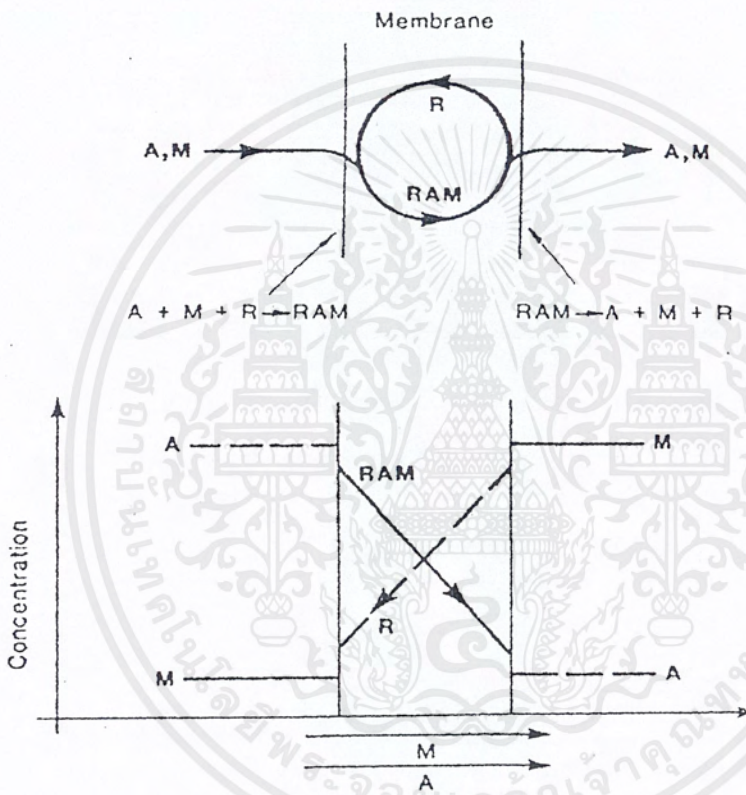


ตัวอย่างของชนิดการถ่ายโอนมวลนี้เป็นการถ่ายโอนมวลของยูเรนิลไอออน โดยสารสกัดประเภทสารประกอบเชิงซ้อนของเทอเชียรีมีน (Tertiary amine complexing agents) ดังสมการ



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

จากสมการ (2.3) และ (2.5) จะเห็นว่าเป็นการถ่ายโอนมวลของไอออนชนิดเดียวกัน ต่างกันที่ชนิดของการถ่ายโอนมวล ซึ่งในสมการ (2.3) เป็นการถ่ายโอนมวลชนิดสวนทางกัน แต่ในสมการ (2.5) เป็นชนิดไปด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารสกัด [5]



รูปที่ 2.8 การถ่ายโอนมวลแบบตามกัน [4]

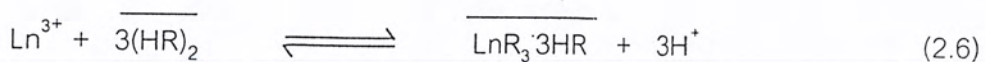
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กลไกการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบสวนทางกัน

ปกติกระบวนการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่

1. การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนผ่านชั้นฟิล์มในวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังผิวของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
2. การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
3. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลว จากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว ไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลว กับสารละลายสตริป
4. การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริป
5. การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวสัมผัสเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริปผ่านชั้นฟิล์มในวัฏภาคสารละลายสตริป

แสดงกลไกการถ่ายโอนมวลของธาตุหายากได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายน้ำกับสารละลายอินทรีย์ดังนี้ [6], [8], [11]



เมื่อ Ln^{3+} แทนไอออนของธาตุหายาก

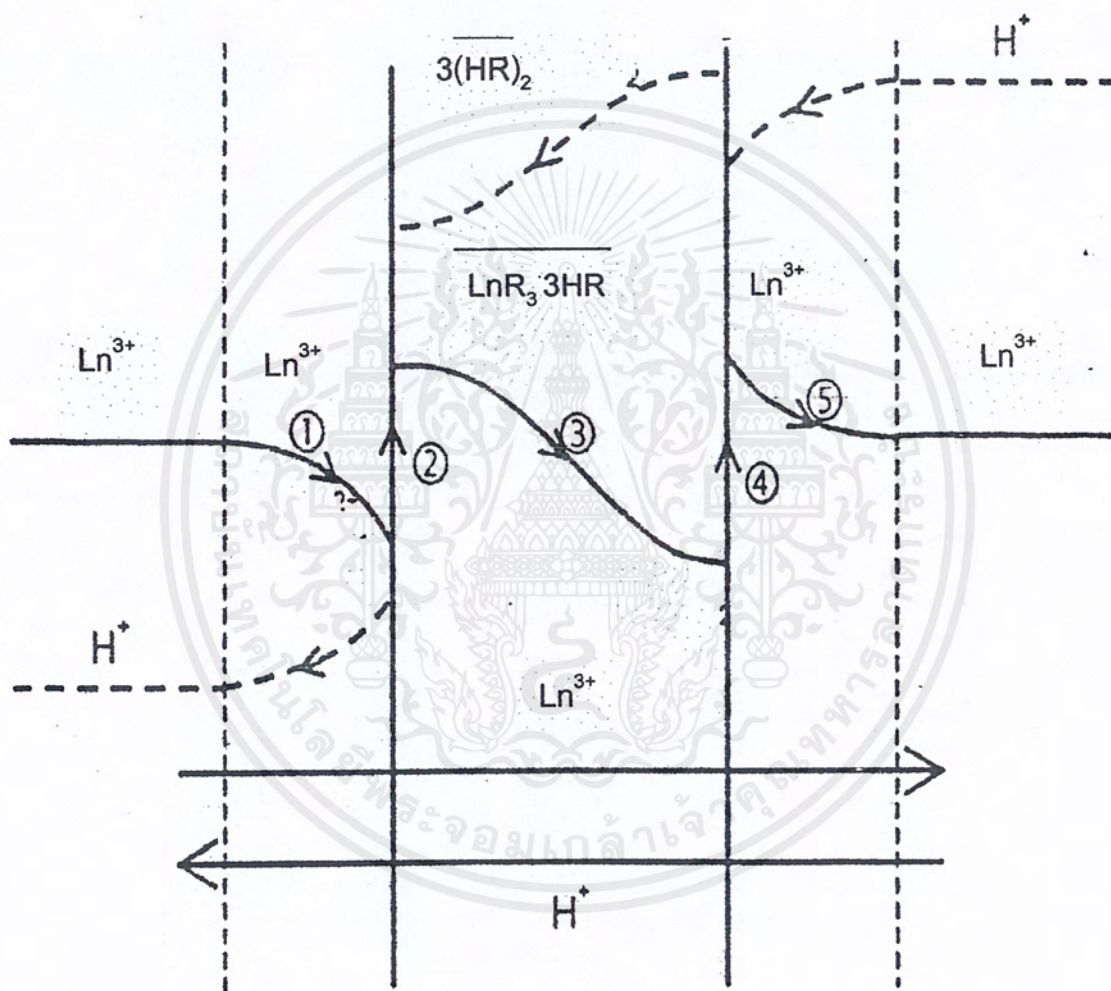
HR แทนสารสกัด D2EHPA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภูมิภาคสารละลายป้อน

ภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว

ภูมิภาคสารละลายสตรีป



รูปที่ 2.9 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในการถ่ายโอนมวลแบบสวนทางของไอออนธาตุหายาก [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 แบบจำลอง

ฟลักซ์ของสาร A ที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว (N_A) เมื่อมีความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาคสารละลายป้อน C_{A_f} จะแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [22]

$$N_A = k_C C_{A_f} \times 10^{-3} \quad (2.7)$$

เมื่อ k_C คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

อัตราการลดลงของมวลของสาร A ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะเท่ากับฟลักซ์ของ A คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของเยื่อแผ่นเหลวที่มีการถ่ายโอนมวล (A_C) คือ

$$\frac{-dm_{A_f}}{dt} = N_A A_C \quad (2.8)$$

เนื่องจากความเข้มข้นของสาร A เท่ากับมวลของสาร A หารด้วยปริมาตรของสารละลาย จากสมการ 2.8 จะได้ว่า

$$N_A \frac{-1 d(V C_{A_f})}{A_C dt} \times 10^{-3} = \frac{-V dC_{A_f}}{A_C dt} \times 10^{-3} \quad (2.9)$$

และ $\frac{V}{A_C}$ จะมีค่าคงที่ตลอดเวลา จากสมการที่ 2.7 และ 2.9 จะได้

$$\frac{-V dC_{A_f}}{A_C dt} = k_C C_{A_f} \quad (2.10)$$

$$\int_{C_{A_f0}}^{C_{A_f}} \frac{1}{C_{A_f}} dC_{A_f} = \frac{-A_C}{V} k_C \int_0^t dt \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln \frac{C_{A_f}}{C_{A_{f0}}} = \frac{-A_c}{V} k_c t \quad (2.12)$$

$$C_{A_f} = C_{A_{f0}} \exp\left(-\frac{A_c}{V} k_c t\right) \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 เมื่อสร้างกราฟระหว่าง C_{A_f} และ t จะได้กราฟเส้นโค้งในรูป exponential ที่มีจุดตัดแกน y ที่ $C_{A_{f0}}$ และมีความชันเท่ากับ $-\frac{A_c}{V} k_c$ ซึ่งสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลได้

การซึมผ่าน (P_A) คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสาร A ที่ข้ามไปด้านสารละลาย สตรีปต่อความเข้มข้นของสาร A ในสารละลายป้อนเริ่มต้น ($C_{A_{f0}}$) ดังสมการ [7]

$$P_A \equiv \frac{C_{A_{f0}} - C_{A_f}}{C_{A_{f0}}} \quad (2.14)$$

การแยก (S_A) คือ ผลหารระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปจากเวลาเริ่มต้น ต่อความเข้มข้น ณ เวลานั้นของสาร A กับสารอ้างอิง ในที่นี้คือซีเรียม [6]

$$S_A \equiv \frac{(C_{A_{f0}} - C_{A_f})/C_{A_f}}{(C_{C_{e_{f0}}} - C_{C_{e_f}})/C_{C_{e_f}}} \quad (2.15)$$

จากทฤษฎีฟิล์ม (Film theory) แบบจำลองการถ่ายโอนมวลของของไหลผ่านชั้นฟิล์มของไหลอีกชนิดหนึ่งที่อยู่หนึ่งที่มีความหนาของชั้นฟิล์มคงที่เท่ากับ δ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (k_c) จะเป็นฟังก์ชันกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร A (D_A) ดังสมการ [22]

$$k_c = \frac{D_A}{\delta} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้เราพิจารณาชั้นฟิล์มคือเยื่อแผ่นเหลวที่มีความหนาเป็น 0.0212 เซนติเมตร ถ้าเราทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจากการทดลองก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้

2.8 สารละลายเยื่อแผ่นเหลว [1]

สำหรับการทดลองนี้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารละลายอินทรีย์ซึ่งมีสารสกัดเป็นตัวถูกละลาย โดยสารละลายเยื่อแผ่นเหลวถูกเติมลงในรูปของพอลิเมอร์ที่เป็นตัวรองรับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย

2.8.1 ตัวทำละลาย (Solvents)

ใช้ในการเจือจางสารสกัด เนื่องจากสารสกัดบริสุทธิ์มีความหนืดสูงมาก มีผลให้การถ่ายเทโลหะในชั้นน้ำมันลดลง แต่ที่ความเข้มข้นสารสกัดสูง ๆ จะช่วยให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า ดังนั้นจึงใช้การเจือจางที่ประมาณ 10 – 40 % โดยปริมาตร ของสารละลายอินทรีย์ คุณสมบัติของตัวทำละลาย ได้แก่ [18]

1. ไม่ละลายในสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป
2. ความสามารถในการละลายทั้ง Complex และ Uncomplex extraction
3. จุดวาบไฟ (Flash – point) สูง และอัตราการระเหยต่ำ
4. ความคงตัวทางเคมีในช่วงที่ดำเนินการ

2.8.2 สารปรับปรุงสภาพ (Modifier)

ในบางครั้งมีการเติมสารเคมีลงในส่วนสารละลายอินทรีย์ เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนเกลือหรือเกิดวัฏภาคที่สาม โดยมากเป็นพวก แอลกอฮอล์ หรือ ไตรบิวทิลฟอสเฟต

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของตัวทำละลาย [18]

"High" aromatics	Sp.gr., 20 °C	Boiling point °F	Flash point °F	Aromatic content, Approximate %
Solvesso 100	0.876	315	112	99
Solvesso 150	0.985	370	151	97
HAN	0.933	357	105	89
Chevron 3	0.888	360	145	98
Chevron 25	0.875	316	115	99
Chevron 40 L	0.886	360	141	78
Chevron 44 L	0.893	366	154	70
"Medium to low" Aromatics	Sp.gr., 20 °C	Boiling point °F	Flash point °F	Aromatic content, Approximate %
Escaid 100	0.790	376	168	20
Napoleum	0.811	410	175	12
"Low" Aramatics	Sp.gr., 20 °F	Boiling point °F	Flash point °F	Aromatic content, Approximate %
Isopar L	0.767	373	144	93
Isopar E	0.723	240	< 45	99.9
Isopar M	0.782	405	172	80
Norpar 12	0.751	384	156	98
Shell 140	0.785	364	141	45
Shell MSB210	0.783		165	
DX 3641	0.793	361	135	45
Escald 200	0.796	383	152	52

* Contains appreciable quantities (ca. 50%) of naphthenes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการใช้งานสารปรับปรุงสภาพ [18]

Modifiers	Inventory	Comments
LIX 63	Mixed 5 - 85% v/v with other extractants	Used with D2EHPA, DNNSA to enhance cobalt extraction and reduce extraction of iron
TBP	Typically 2 - 5% v/v in total organic	Modifier to reduce third phase and also has synergistic extra for cobalt

2.8.3 สารสกัด (Extractant) [18]

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด ดังนี้

2.8.3.1 สารสกัดชนิดสารเฉื่อย (Inert extractant)

โลหะบางชนิดสามารถจับกับสารไม่มีขั้ว เช่น เจอร์เมเนียมเตตระคลอไรด์ โดยปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาคือ ความเป็นขั้ว พันธะไฮโดรเจน และความสามารถในการเกิดโฟลราไรส์ แต่อย่างไรก็ตามสารสกัดชนิดนี้ยังไม่มีการพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรม

2.8.3.2 สารสกัดชนิดไอออนิก (Ionic extractant)

สารสกัดซึ่งอาศัยพันธะไอออนิก ไม่ว่าจะเป็นส่วนประจุบวกหรือลบในการแลกเปลี่ยน หรือเรียกว่า Liquid ion exchange เช่น

- สารพวกเอมีน ในการสกัดโครเมต วาเนเดต โมลิบดีต และทังสเตน เป็นต้น
- สารแอนไอออนิกคลอไรด์ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ในการสกัดโลหะทรานซิชันในสารประกอบซัลโฟเนียม

2.8.3.3 สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อย คือ สารสกัดประเภทกรด และสารสกัดประเภทคีเลท (Chelate extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-\text{COOH}$, $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ ส่วนประเภทหลังสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลางและสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ดังสมการ [6]



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ นอกจากนั้นสมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเจนไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับพีเอชของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนั้นยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้น

สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามียุทธประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก ซึ่งสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะกรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได - 2 เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานพบว่า กรดฟอสฟอริก > กรดฟอสฟอนิก > กรดฟอสฟินิก > กรดคาร์บอกซิล

สารสกัดประเภทคีเลทได้แก่ สารสกัดที่ประกอบด้วยดอนเนอร์กรุป (Donor groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลทเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียงสองประเภทคือ (n) ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-Hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mill Inc.USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ช) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8- Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

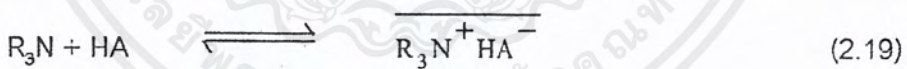
สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic leach liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ [18]

2.8.3.4 สารสกัดชนิดต่าง (Basic extractant)

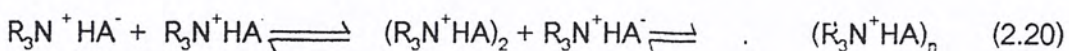
เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีน และแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary; R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary; R_3N) และชนิดจตุภูมิ (Quaternary; R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีชื่อ $R_3N^+HA^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายป้อนที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ MY^n จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการ (2.18) ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้เอมีนเป็นสารสกัด คือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังปฏิกิริยา (2.20)

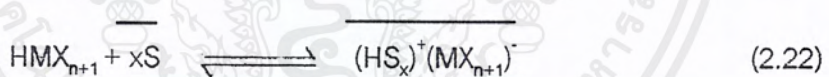
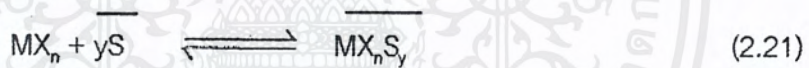


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดวิฤภาคที่สามทำให้วิฤภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้แต่สามารถแก้ไขโดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ เช่นพวกอะลิฟาติกแอลกอฮอล์สายโซ่ยาว

2.8.3.5 สารสกัดชนิดขอลเวท (Solvating extractant)

สารสกัดประเภทขอลเวท หรือสารสกัดประเภทกลาง (Neutral) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะดอนเนอร์กรุปจึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไฮออนที่มีประจุบวกหรือไฮออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไฮออนโลหะในสารละลายป้อนจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่กลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นกับความสามารถของไฮออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในสารละลายป้อนเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลางของ สารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดขอลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวิฤภาคของสารละลายอนินทรีย์เพิ่มขึ้นได้ โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดขอลเวทดังสมการ (2.21) และ (2.22)

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขั้นตอนและวิธีการทดลองที่ทำการศึกษาค่าการสกัดซีเรียมเออร์ช ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยแบบแผ่น

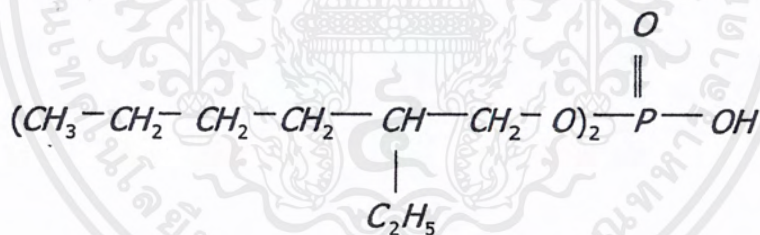
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อทางเคมี	สูตรเคมี	ความเข้มข้น (%โดยมวล)	แหล่งที่มา
ซีเรียมเออร์ช			ความชื้น 70 % อิตเทรียม 3 % แลนทานัม 7 % ซีเรียม 65 % เพรซิโอดีเมียม 4 % นีโอดีเมียม 14 % ซามาเรียม 5 % แกโดลิเนียม 2 %	สำนักงาน ปริมาณเพื่อ สันติ
ตัวทำละลาย ของสารละลายสตริป	กรดไนตริก	HNO_3	96 %	Carlo erba reagent
ตัวทำละลาย ของสารละลายป้อน	กรดไนตริก	HNO_3	96 %	Carlo erba reagent
สารสกัด	D2EHPA	$\text{C}_{16}\text{H}_{35}\text{O}_4\text{P}$	95 %	Sigma chemical
ตัวทำละลายอินทรีย์ ของสารสกัด	น้ำมันก๊าด (Kerosene)			

ชนิด	ชื่อทางเคมี	สูตรเคมี	ความเข้มข้น (%โดยมวล)	แหล่งที่มา
ตัวปรับพีเอช	โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	100 %	MERCK
ตัวทำละลายสารสกัด	อะซิโตน	CH ₃ COCH ₃	99.5 %	Lab scan
สารออกซิไดส์	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	H ₂ O ₂	35 %	Lab scan
คีเลทิกแกนด์ (Chelating ligand)	Ethylene diamine tetraacetic acid disodium salt	EDTA	100 %	BDH

สูตรโครงสร้างของสารสกัด D2EHPA



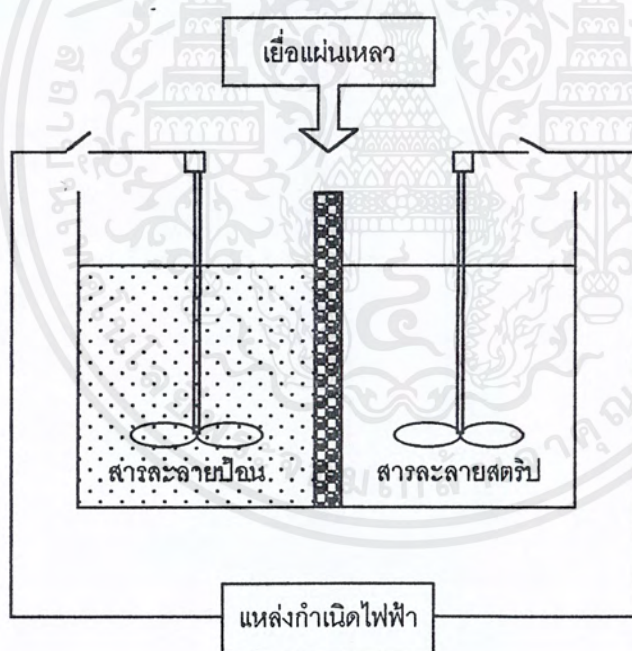
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ชุดเครื่องปั่นกววน ประกอบด้วย ถังกววน มอเตอร์ขนาดเล็ก 2 ตัว และใบพัด
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- พีเอชมิเตอร์ที่สามารถถอดอิเล็กโทรดได้
- บีกเกอร์ขนาด 50, 250 และ 550 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- ขวดวัดปริมาตรขนาด 50, 100, 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- ปิเปตขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร
- กระบอกตวงขนาด 10 และ 100 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ขวดเก็บสารตัวอย่าง
9. หลอดหยด
10. กระจบอบน้ำกลั่น
11. Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) spectroframe รุ่น M, Spectroanalytical Instruments, Germany
12. เส้นใยแบบแผ่น Spectra/Mesh ของ Spectrum Laboratories, Inc. ซึ่งมีลักษณะดังนี้
 - ชนิดของเส้นใย คือ พอลิพรพิลีน
 - ขนาดช่องเปิด 105 ไมโครเมตร พื้นที่ช่องเปิด ร้อยละ 26
 - ขนาดกว้าง 9.75 เซนติเมตร สูง 6.15 เซนติเมตร ความหนา 212 ไมโครเมตร

รูปแบบชุดเครื่องปั่นกรอง



จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ พบว่ากรดไนตริกที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ วัสดุที่ใช้จึงต้องมีความเหมาะสมสามารถทนสารเคมีและสภาวะการทดลองที่เป็นกรดได้ เมื่อทำการทดสอบด้วยกรดไนตริกก่อนการทดลองจึงพบว่าพลาสติกที่ทำจากพอลิพรพิลีนสามารถนำมาใช้เป็นเยื่อแผ่นและถังอุปกรณ์ได้ ขนาดของถังไม่ควรใหญ่เกินไปเพื่อประหยัดสารละลายป้อนซึ่งเป็นธาตุหายากรวมทั้งลดขนาดเยื่อแผ่นที่จะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง

1. ละลายซีเรียมเฮกซะฟลูออไรด์ 5 กรัมด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร หยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เล็กน้อย เพื่อเปลี่ยนรูปซีเรียมจาก Ce^{4+} ให้เป็น Ce^{3+} จากนั้นปรับให้มีปริมาตร 500 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
2. เตรียมสารละลายป้อนให้มีความเข้มข้น 100 ppm ด้วยการนำสารละลายจากข้อ 1 มา 5 มิลลิลิตร ปรับให้มีปริมาตรเป็น 130 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 2 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร
3. เตรียมสารละลายอินทรีย์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ด้วยการละลาย D2EHPA 16.97 กรัม ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
4. เตรียมสารละลายสตริปเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ด้วยการละลายกรดไนตริกเข้มข้น ปริมาตร 66.7 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร
5. นำเส้นใยแบบแผ่นแขวนในสารละลายอินทรีย์ที่เตรียมไว้จนอิ่มตัว (ประมาณ 30 นาที) จากนั้นนำไปบรรจุตรงกลางระหว่างถังกวน ดังรูปที่ ค.2 ในภาคผนวก ค
6. นำสารละลายป้อนและสารละลายสตริปอย่างละ 130 มิลลิลิตร ใส่ลงในชุดการทดลองทั้งสองด้านพร้อมกัน ซึ่งสารละลายทั้งสองจะแยกกันด้วยเส้นใยแบบแผ่นที่เคลือบสารละลายอินทรีย์แล้ว จากนั้นปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวน โดยใช้ความเร็วรอบที่เท่ากันทั้งสองด้าน จับเวลาและเก็บสารตัวอย่างจากสารละลายป้อนและสารละลายสตริปที่เวลา 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 และ 20 นาที วัดพีเอชของ สารละลายป้อนตัวอย่าง
7. นำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายากด้วย ICP-AES และบันทึกผล

3.4 การทดลอง

3.4.1 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm

ในกระบวนการสกัดแยก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน หรือค่าพีเอชที่แตกต่างกันในสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการสกัด จึงต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกที่ดีที่สุด เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

โดยใช้สภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm และพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2.0 ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3 และปรับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 2.5 และ 3.0 ตามลำดับ

3.4.2 การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เพื่อเติมลงในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.1

การทดลองนี้เพื่อศึกษาผลของคีเลทลิแกนด์ชนิดกรดพอลิเอมีนคาร์บอนิกออกซิลิก [19] ซึ่งในที่นี้เลือกใช้ EDTA จึงทำการทดลองโดยเติมสาร EDTA ลงในสารละลายป้อนเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งมีความแข็งแรงแตกต่างกันไปสำหรับธาตุหายากแต่ละชนิด โดยเติม EDTA ในอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเท่ากับ 1, 3, 5 และ 10 ซึ่งเตรียมโดยเติมสารละลาย EDTA เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตรลงในสารละลายป้อนเป็นปริมาตร 0.5, 1.5, 2.5 และ 10 มิลลิลิตรตามลำดับ โดยใช้สภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm และพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.1 ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3

3.4.3 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm

ในการทดลองนี้ได้ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมเมื่อมี EDTA ในสารละลายป้อนที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดในสารละลายป้อนที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2 โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm และพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.1 ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3

เอ็กส์เพอริเม้นต์และการทดลองอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธาตุหายาก 100 ppm และปรับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5 และ 5.0 ตามลำดับ ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3

3.4.4 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2

เพื่อแสดงถึงผลกระทบจากการเพิ่มความเข้มข้นที่ชัดเจน จึงทำการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm โดยทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.2 และปรับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 2.0, 3.0, 3.5 และ 5.0 ตามลำดับ ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3

3.4.5 การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.4.4

เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm เปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm จึงทำการปรับอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1, 3 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งเตรียมโดยเติมสารละลาย EDTA 0.2 โมลต่อลิตรลงในสารละลายป้อนเป็นปริมาตร 5, 15 และ 25 มิลลิลิตรตามลำดับ และพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่ได้จากหัวข้อ 3.4.4 ดำเนินการตามขั้นตอนที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3

บทที่ 4

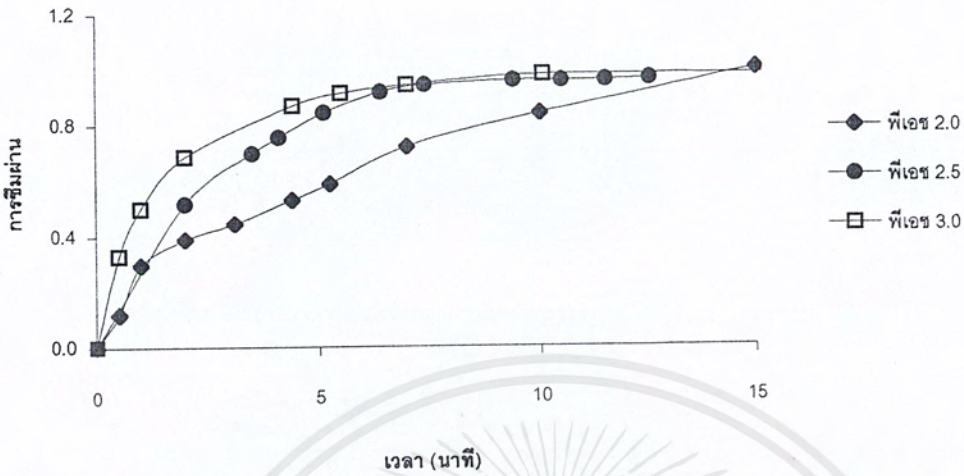
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm

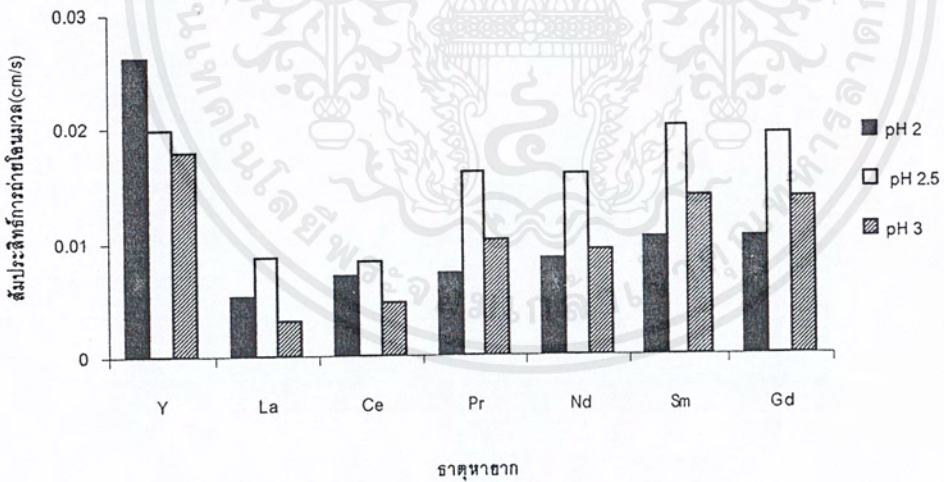
จากผลการทดลองแสดงการซึมผ่านของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับพีเอชดังรูปที่ 4.1 พบว่าที่พีเอช 2.0 การซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ที่พีเอช 2.5 และ 3.0 พบว่าค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นรวดเร็วและมีค่าเข้าใกล้ 1.0 เมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที ดังนั้นอัตราการซึมผ่านของธาตุหายากที่พีเอช 2.0 จะต่ำกว่า 2.5 และ 3.0 ซึ่งทำให้สามารถควบคุมปริมาณธาตุหายากที่ข้ามจากด้านสารละลายป้อนไปสารละลายสตรีปได้ง่าย พิจารณาได้จากความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่ลดลงดังตารางที่ ก.1 ถึง ก.3 สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากแต่ละชนิด (รูปที่ 4.2) พบว่า โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่พีเอช 2.0 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพีเอช 2.5 และ 3.0 ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณธาตุหายากที่แพร่ไปด้านสารละลายสตรีปได้ดีเช่นเดียวกับการซึมผ่าน

สำหรับค่าการแยกแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อน 2.5 และ 3.0 ช่วงแรกการแยกจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งและมีค่าคงที่ที่เวลาประมาณ 7 นาที ซึ่งถ้าพิจารณาพร้อมกับค่าพีเอชของสารละลายป้อน (รูปที่ 4.4) การแยกจะเกิดได้ดีเมื่อค่าพีเอชลดลงมาใกล้ 2.0 ที่เวลาประมาณ 7 นาทีนั่นเอง นอกจากนี้จากนิยามการแยก (สมการ 2.15) สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าค่าการแยกมากกว่า 1 แสดงว่าสัดส่วนของซีเรียมที่แพร่จากด้านสารละลายป้อนไปสารละลายสตรีปน้อยกว่าธาตุหายากชนิดอื่น แต่จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือ ต้องการให้ซีเรียมซึ่งเป็นธาตุที่มีปริมาณมากข้ามไปด้านสารละลายสตรีปได้ดี จึงเห็นว่าแนวโน้มของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดแยกเท่ากับ 2.0

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการซึมผ่านของธาตุหายากแต่ละชนิดดังรูปที่ ข.1.1 พบว่าการซึมผ่านของธาตุหายากเกิดได้ดีทุกตัว คือ มีค่าใกล้เคียงกัน หากสามารถจำกัดการซึมผ่านของธาตุหายากบางตัวได้ก็จะทำให้ประสิทธิภาพ การแยกดีขึ้น จึงเติม EDTA ที่เป็นสารคีเลทลิแกนด์ซึ่งมีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับธาตุหายากได้ และมีความแข็งแรงของสารประกอบเชิงซ้อนกับธาตุหายากแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปลงในสารละลายป้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

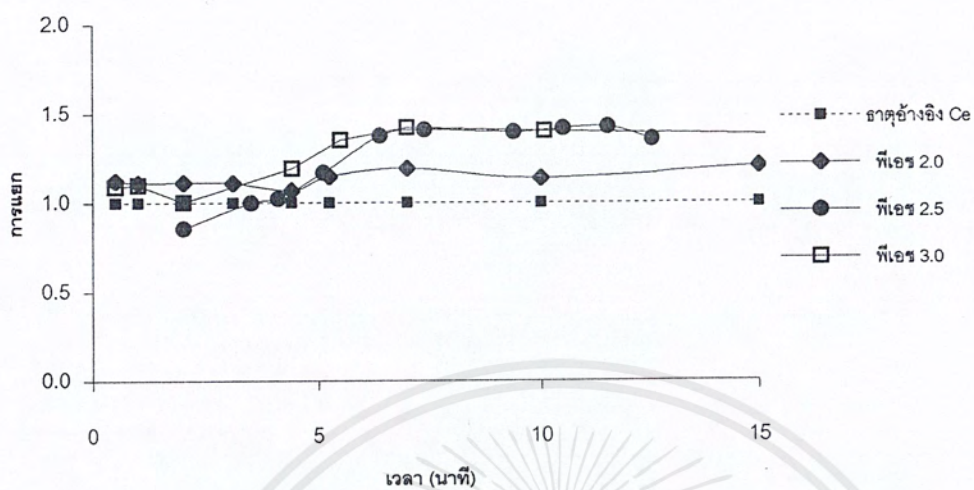


รูปที่ 4.1 การซึมผ่านของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับพีเอช ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm

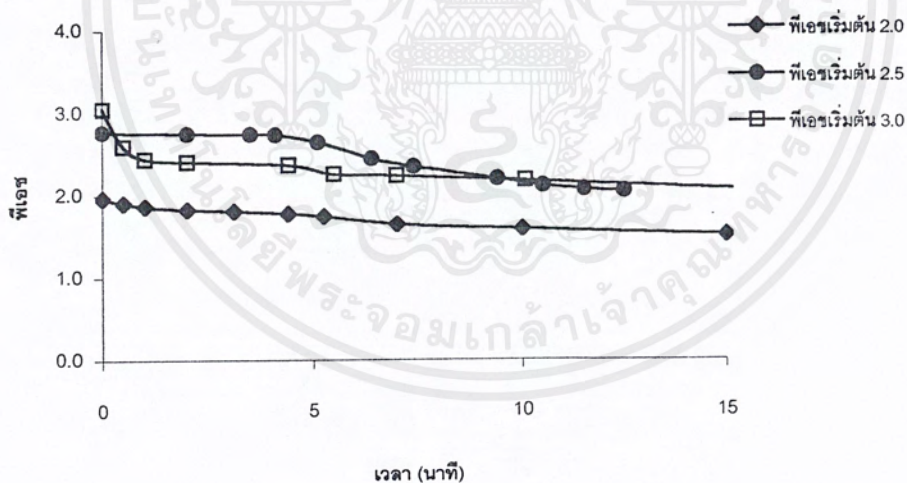


รูปที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับพีเอช ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

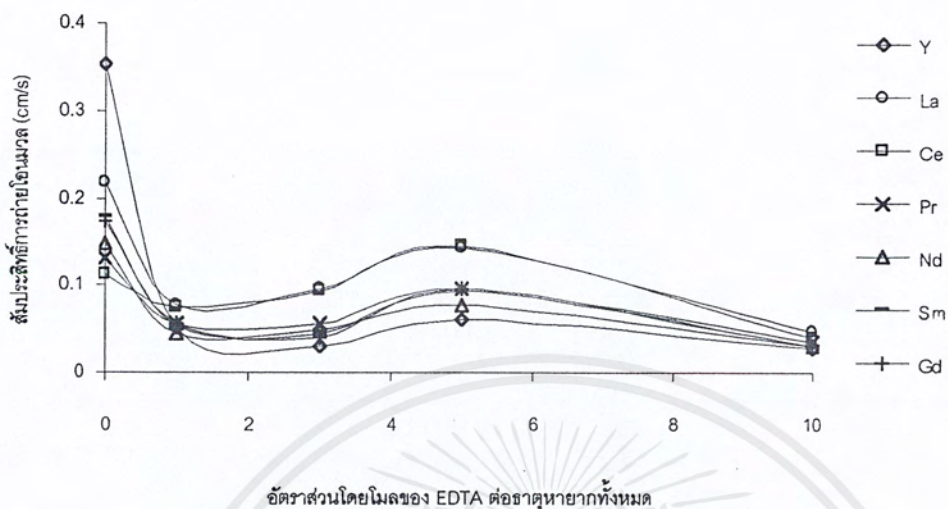


รูปที่ 4.3 การแยกของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับพีเอช ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm

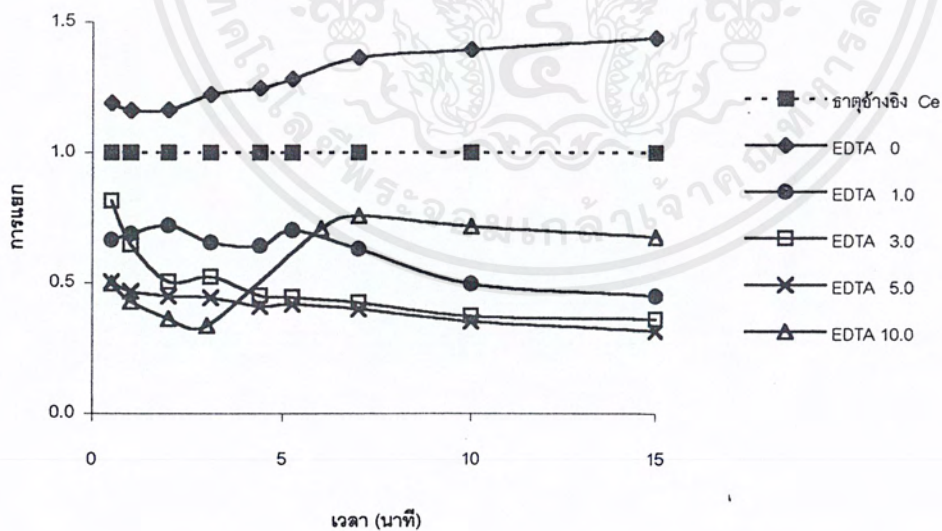


รูปที่ 4.4 พีเอชของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0



รูปที่ 4.6 การแยกของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เมื่อเติมลงในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 2.0

จากผลการทดลองอธิบายได้ว่า การเติม EDTA ในสารละลายป้อนจะเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของธาตุหายากกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ยังผลให้เหลือธาตุหายากในรูปอิสระ (Free rare earths) ในด้านสารละลายป้อนที่สามารถซึมผ่านเยื่อแผ่นเหลวและเข้า ทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA แล้วข้ามไปสารละลายสตริปได้ลดลงจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลน้อยลง [8] และพบว่า EDTA จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับธาตุหายากที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับกลุ่มธาตุหายากนี้ [19] ทำให้การซึมผ่านของธาตุหายากขนาดเล็กน้อยกว่าธาตุหายากขนาดใหญ่ ทำให้สามารถแยกกลุ่มธาตุหายากได้ดีขึ้นดังรูปที่ ข.6.1 คือ อิตเทรียม กลุ่มแลนทานัมและซีเรียม กลุ่มเพรซีโอดีเมียม นีโอดีเมียม ซาแมเรียมและแกโดลิเนียม แสดงขนาดไอออนธาตุหายากดังตารางที่ ง.1 ในภาคผนวก ง

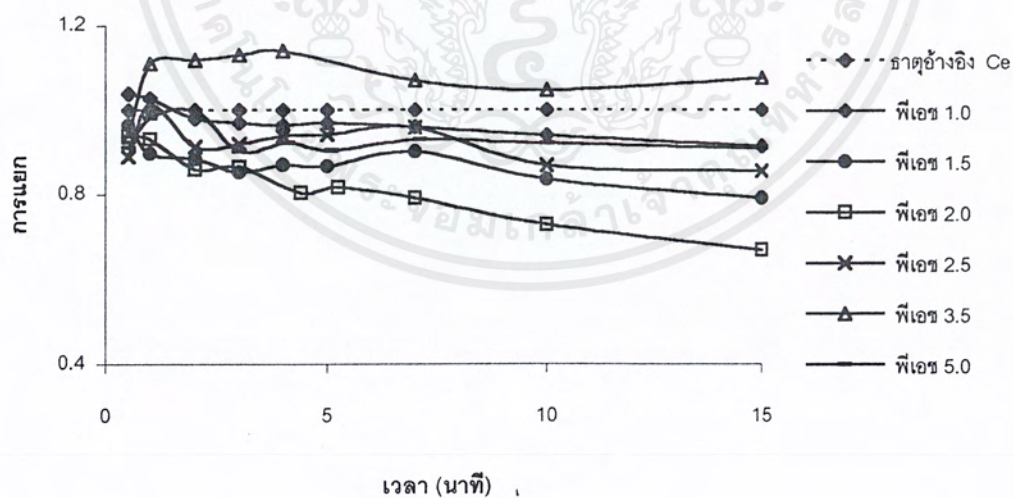
จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดในช่วง 1 ถึง 5 จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EDTA ที่เพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสูงสุด คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 แต่ยังมีค่าต่ำกว่าเมื่อไม่เติม EDTA (รูปที่ 4.2) ทำให้สามารถคุมการแพร่ของธาตุหายากได้ดี และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 10 พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลมีค่าน้อยที่สุด

สำหรับการแยกของธาตุหายากโดยรวมแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการเฉลี่ยค่าการแยกของธาตุหายากทั้ง 7 ชนิดที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1, 3, 5 และ 10 จากรูปที่ ข.4.2 ข.5.2 ข.6.2 และ ข.7.2 พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากในช่วง 1 ถึง 5 จะทำให้ค่าการแยกสูงขึ้นและมีค่าดีที่สุดที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากเป็น 5 เมื่อเทียบกับธาตุอ้างอิงซีเรียม

อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากจนถึง 10 ซึ่งเป็นปริมาณมากเกินไป คาดว่าเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง EDTA กับธาตุหายากแทบทุกชนิด ยังผลให้เหลือธาตุหายากในรูปอิสระในด้านสารละลายป้อนที่สามารถซึมผ่านเยื่อแผ่นเหลวได้น้อยมากจนค่าการแยกลดต่ำลง พิจารณาได้จากความเข้มข้นของธาตุหายากรวมในด้านสารละลายสตริปที่เวลาสุดท้าย (ตารางที่ ก.4 ถึง ก.7) ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 และ 10 ความเข้มข้นของธาตุหายากประมาณ 107 และ 31 ppm ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm



รูปที่ 4.8 การแยกของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดในสารละลายป้อนเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอชเริ่มต้นของ สารละลายป้อนเป็น 2.0

การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชของสารละลายป้อนที่เติม EDTA จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากแต่ละชนิดมีการกระจายตัวเป็นกลุ่มชัดเจนขึ้น นั่นคือสามารถแยกกลุ่มธาตุหายากออกจากกันได้มากขึ้น โดยในช่วงพีเอช 1.0 ถึง 2.0 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากสูงขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่พีเอช 2.0 แต่ยังมีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อไม่เติม EDTA (รูปที่ 4.2) ทำให้สามารถคุมปริมาณธาตุหายากที่แพร่ไปด้านสารละลายสตริปได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับที่พีเอช 2.0 ไม่เติม EDTA ขณะที่พีเอชมากกว่า 2.0 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากจะมีค่าลดลง

สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ ในช่วงพีเอชต่ำ จาก 1.0 ถึง 2.0 การเพิ่มค่าพีเอชจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1] เนื่องจากมีความแตกต่างของไฮโดรเจนไอออนระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปมากขึ้น ก่อให้เกิดความต่างศักย์เคมี (Chemical potential gradient) ระหว่างธาตุหายากในสารละลายทั้งสองด้าน ทำให้เกิดการถ่ายเทและแลกเปลี่ยนกับไอออนของธาตุหายากมากขึ้น

ขณะที่ช่วงพีเอช 2.0 ถึง 5.0 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะลดลงอธิบายได้ว่า เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง EDTA กับธาตุหายากมีความเสถียรมากขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น [8] ทำให้ไอออนของธาตุหายากในรูปอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA เข้าไปอยู่ในชั้นสารละลายอินทรีย์ลดลง

สำหรับการแยก (รูปที่ 4.8) พบว่า ที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อน 2.0 จะได้ค่าการแยกมากที่สุดเมื่อเทียบกับธาตุอ้างอิงซีเรียม ดังนั้นจากการทดลองนี้จะเห็นว่า พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่ทำให้ทั้งสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากและการแยกมากที่สุด คือ 2.0

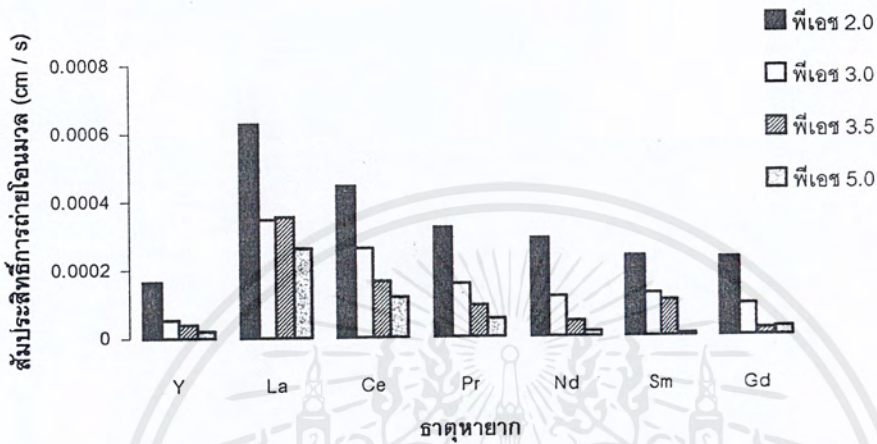
4.4 การหาค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากจาก 100 ppm เป็น 1000 ppm (รูปที่ 4.9) พบว่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นจาก 2.0 ถึง 5.0 มีผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากแต่ละชนิดลดลง และมีค่าให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสูงสุดที่พีเอช 2.0 โดยที่พีเอช 3.0, 3.5 และ 5.0 มีค่าให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากต่ำเกินไปที่จะเกิดการแยก จึงเลือกพีเอช 2.0 เป็นพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm (รูปที่ 4.7) พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจะมีค่าลดลงประมาณ 10 เท่า พิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของซีเรียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm เท่ากับ 0.008 cm/s ขณะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของซีเรียมเท่ากับ 0.0004 cm/s สำหรับการแยก (รูปที่ 4.10) พบว่าที่พีเอช 2.0 การแยกมีค่าสูงสุด

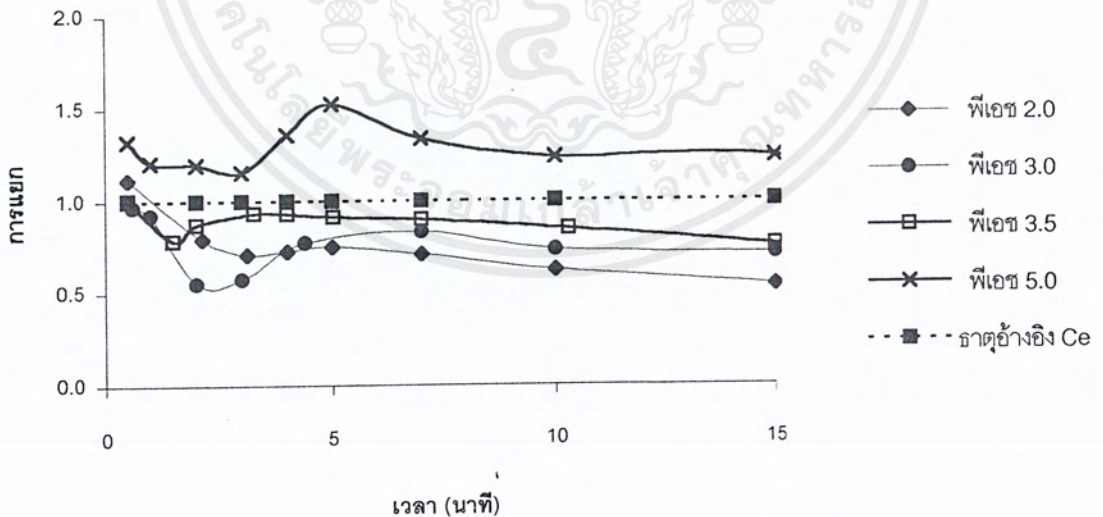
นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm ทำให้ต้องใช้ EDTA 0.036 โมลต่อลิตรเพื่อให้ได้ตามอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ของธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ซึ่งมีมากเกินไปความสามารถในการละลายได้ของ EDTA สังเกตได้จาก EDTA ที่ไม่ละลายในสารละลายป้อนแม้ว่าจะให้ความร้อนจนถึงจุดเดือดของสารละลายป้อน โดยจากการทดลองพบว่า ค่าการละลายได้ของ EDTA คือ 0.033 โมลต่อลิตร จึงส่งผลให้เกิดการตกตะกอนและอุดตันของ EDTA ในรูของเส้นใยที่พวยเยื่อแผ่นเหลว ทดสอบได้โดยหลังจากการทดลองแล้วล้างเส้นใยแบบแผ่นด้วยตัวทำละลายคืออะซิโตน พบว่ามีตะกอนสีขาวขุ่นของ EDTA

นอกจากนี้ขั้นตอนการปรับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนจะต่างไปจากการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm กล่าวคือจำเป็นต้องปรับพีเอชขึ้นไปทีพีเอชประมาณ 4 ก่อนแล้วจึงปรับลงมาที่พีเอช 2.0 ซึ่งจะทำให้ EDTA เปลี่ยนเป็นรูปที่สามารถละลายได้มากขึ้น เพราะความสามารถในการละลายได้ของ EDTA ขึ้นกับพีเอช [21] เป็นผลให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับธาตุหายากเพิ่มขึ้น ดังนั้นในสารละลายป้อนจึงมีไอออนของธาตุหายากในรูปอิสระน้อยลง ยังผลให้การแพร่ของธาตุหายากจากด้านสารละลายป้อนไปสารละลายสตรีปได้น้อยลง เมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm อัตราส่วนโดยโมล

ของ EDTA ต่อธาตุหายากเป็น 5 พีเอช 2.0 พิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากที่ลดลง 10 เท่าดังกล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm



รูปที่ 4.10 การแยกของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับพีเอช ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อน 2.0

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 10 เป็นผลให้ทั้งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลและการแยกของธาตุหายากมีค่าต่ำมาก การทดลองนี้จึงทำการเติม EDTA ในอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดคือ 1, 3 และ 5

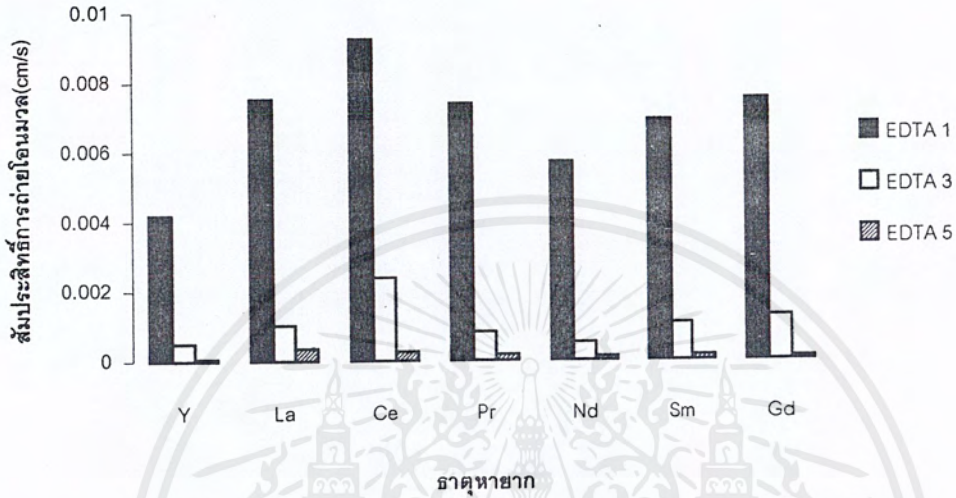
ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากลดลงดังรูปที่ 4.11 โดยมีค่าให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากสูงสุดที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1 ขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 3 และ 5 ให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากต่ำเกินไปที่จะเกิดการแยก ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเท่ากับ 100 ppm (รูปที่ 4.5) คือ การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1, 3 และ 5 จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของธาตุหายากมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5

สำหรับการแยกของธาตุหายากโดยรวม(รูปที่ 4.12) พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากจะทำให้ค่าการแยกเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1

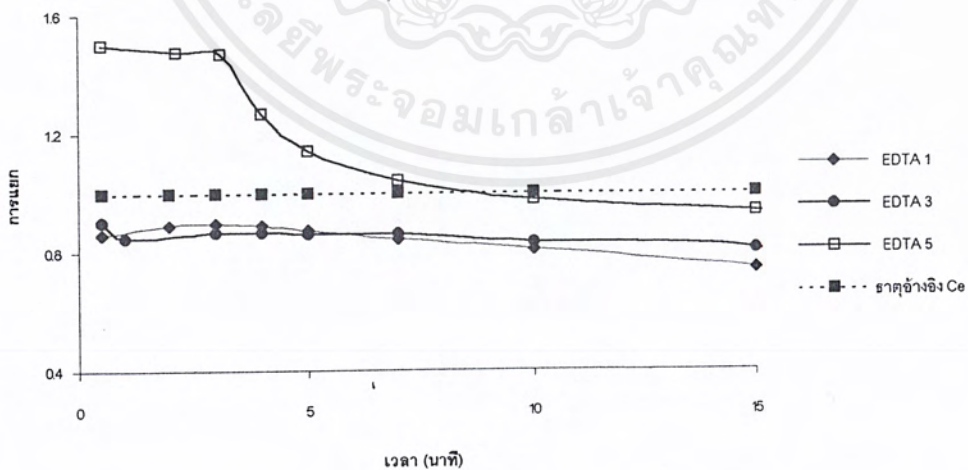
สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดมีค่ามากกว่า 1 มีปริมาณมากจนเกินความสามารถในการละลายของ EDTA คือ 0.0033 โมลต่อลิตร เมื่อมีการปรับพีเอชขึ้นทำให้ EDTA เปลี่ยนรูปและเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง EDTA กับธาตุหายากเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EDTA ที่มากขึ้น โดย EDTA จะทำปฏิกิริยากับธาตุหายากได้ทุกตัว ค่าการแยกเมื่อเทียบกับธาตุอ้างอิงที่เริ่มจึงลดลงมากและใกล้เคียงกันสำหรับธาตุหายากแต่ละตัวแสดงดังรูปที่ ข.18.2, ข.19.2 และ ข.20.2

จากการทดลองนี้จะเห็นว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลและค่าการแยกของธาตุหายากดีที่สุดที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเท่ากับ 1 และปริมาณ EDTA ที่เติมในสารละลายป้อนจะขึ้นกับความ

เข้มข้นของธาตุหายากในสารละลายป้อนเริ่มต้นในสัดส่วนที่ต่างกันออกไป เนื่องจากขีดจำกัดในด้านการละลายของ EDTA



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0



รูปที่ 4.12 การแยกของธาตุหายากโดยรวมเมื่อเทียบกับอัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 สมมติฐานของข้อจำกัดอัตราการถ่ายโอนมวลในงานวิจัยนี้

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลจากการทดลองที่สภาวะที่ดีที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 2 และ อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 แสดงดังรูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของ Y เท่ากับ 0.00188 cm/s เมื่อแทนในสมการที่ 2.16 จะได้สัมประสิทธิ์การแพร่ดังนี้

$$\begin{aligned}
 D_A &= k_c \cdot \delta \\
 &= \left(1.88 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right) \left(2.12 \times 10^{-2} \text{cm} \right) \\
 &= 3.99 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

ซึ่งจะให้ผลใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สำหรับของเหลวที่มีค่าอยู่ในอันดับของค่า 10^{-6} ถึง $10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$ [22] จึงอาจประมาณได้ว่ากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหล่านี้ อัตราการซึมผ่านถูกจำกัดด้วยการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างธาตุหายากและ D2EHPA ผ่านรูของเยื่อแผ่นเหลว (Diffusion limit in the membrane pores)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและการทดลอง สามารถอธิบายได้ดังนี้

5.1.1 การเติม EDTA ในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm ทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุหายากเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุหายาก โดยไอออนของธาตุหายากขนาดเล็กเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA ที่มีความแข็งแรงมากกว่าไอออนขนาดใหญ่ ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลของธาตุหายากขนาดเล็กมีค่าลดลง ในขณะที่ธาตุหายากที่มีขนาดใหญ่จะมีค่ามากขึ้น ทำให้ค่าการแยกของแต่ละธาตุ เมื่อเทียบกับซีเรียม สูงกว่าการไม่เติม EDTA

5.1.2 สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากในสารละลายป้อนเท่ากับ 5 ค่า pH ที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ทั้งสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าการแยกสูงสุดในกระบวนการสกัดนี้เท่ากับ 2.0 โดยในช่วง pH ต่ำกว่านี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลและค่าการแยกจะเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่พีเอชของสารละลายสตริบคิงที่ ในขณะที่พีเอชของสารละลายป้อนสูงขึ้นทำให้ความแตกต่างของไฮโดรเจนไอออน (Chemical potential gradient) ระหว่างสารละลายป้อน และสารละลายสตริบเพิ่มมากขึ้นเกิดการถ่ายโอนและแลกเปลี่ยนกับไอออนของธาตุหายากมากกว่าที่พีเอชต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1] และที่ pH มากกว่า 2.0 การซึมผ่านและการแยกจะลดลง เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง EDTA กับธาตุหายากมีความเสถียรมากขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น [8] ทำให้มีไอออนของธาตุหายากในรูปอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA เข้าไปอยู่ในชั้นสารละลายอินทรีย์ได้ลดลง

5.1.3 สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการสกัดแยกธาตุหายากคือ พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อน 2.0 และอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1 แต่อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และค่าการแยกจะมีค่าต่ำกว่าที่ความเข้มข้น 100 ppm เนื่องจากความสามารถในการละลายของ EDTA ที่มีขีดจำกัด สังเกตจากเกิดตะกอนขณะปรับพีเอชให้ได้ตามสภาวะที่กำหนด จึงจำเป็นต้องปรับพีเอชขึ้น เพื่อให้ EDTA เปลี่ยนรูป และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับธาตุหายากที่มีความเสถียรมากขึ้นเหลือธาตุหายากในรูปอิสระลดลง

5.1.4 สำหรับงานวิจัยนี้กระบวนการสกัดแยกธาตุหายากจากซีเรียมเฮนริชแบบกะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยแบบแผ่น อัตราการซึมผ่านถูกจำกัดด้วยอัตราการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างธาตุหายากและ D2EHPA ผ่านรูของเยื่อแผ่นเหลว

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรศึกษาผลของสารสกัดชนิดอื่น เช่น ไตรบิวทิลฟอสฟอริก กรดโมโนคาร์บอกซิลิกและคีเลทลิแกนด์ เช่น กรดซิตริก เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถสกัดแยกธาตุหายากออกจากกันได้มากที่สุด และมีความยืดหยุ่นในการเลือกใช้สารที่สามารถหาได้ง่ายมากขึ้น
- 5.2.2 ควรศึกษาผลของความเร็วยอบในการปั่นกวนที่มีต่อการแพร่ของธาตุหายากในด้านสารละลายป้อน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ เนื่องจากค่าการแพร่จะสูงขึ้นเมื่อความเร็วยอบในการปั่นกวน หรืออุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อนำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ทำให้ง่ายต่อการพิจารณาผลกระทบจากตัวแปรที่เปลี่ยนไปที่ต่อระบบการผลิต
- 5.2.3 ควรพัฒนาระบบการสกัดนี้ให้เป็นรูปแบบของระบบกึ่งต่อเนื่องและต่อเนื่อง แล้วพิจารณาผลที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบและเลือกระบบที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการสกัดแยกธาตุหายากออกจากกันได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

รายการอ้างอิง

1. วิทยา นามสว่าง. 2542. การสกัดแลนทานัมไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองตัวด้วยเส้นใย
กลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. เอกสารเผยแพร่, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ.
3. Kolarik, Z.; and Pankova, H. 1996. Extraction of Lanthanides by Means of Dialkyl
Phosphoric Acids-Effect of Structure and Size of Alkyl Group. Journal of
Inorganic and Nuclear Chemistry 28: 2325-2333.
4. Kataoka, T.; Nishiki, T.; and Muto, A. 1995. Permeation of Lanthanum Through
Supported Liquid Membranes. Separation Science and Technology 30(4): 621-
636.
5. รัตนา จิระรัตนานนท์, รศ.ดร. 2541. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์.
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ.
6. Ceccaroli, B.; and Alstad, J. 1981. Trends in Separation Factors for the
Lanthanum Series as Obtained in Solvent Extraction from an Aqueous
Thiocyanate Solution. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry 43: 1881-1886.
7. Huang, T. C.; and Juang, R. S. 1987. Transport of Zinc Through a Supported
Liquid Membranes Using Di(2-ethylhexyl) Phosphoric Acid as a Mobile Carrier.
Journal of Membrane Science 31: 209-226.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Matsuyama, H.; Komori, K.; and Teramoto, M. 1989. Selectivity Enhancement in the Permeation of Rare Earth Metals Through Supported Liquid Membranes by Adding of Diethylenetri-aminepentaacetic Acid to the Aqueous Phase. Journal of Membrane Science 47: 217-228.
9. Kutota, S.; Goto, M.; and Nakashio, S. 1995. Extraction Kinetics of Rare Earth Metals with 2-Ethyhexyl Phosphoric Acid Mono-2-Ethylhexyl Ester Using Hollow-fiber Liquid Membrane Extractor. Separation Science and Technology 30 (5): 777-792
10. Geist, A.; Nitsch, W.; and Kim, J. 1999. On the Kinetics Rare Earth Extraction into D2EHPA. Chemical Engineering Science 54: 1903-1909.
11. Moreno, C.; and Valiente, M. 1999. Studies on the Mechanism of Transport of Lanthanide Ions Through Supported Liquid Membranes Containing Di-(2-ethylhexyl) Phosphoric Acid (D2EHPA) as a Carrier. Journal of Membrane Science 155: 155-162.
12. ไวยวิทย์ อัครเรศวิมาน, สมนึก ศรีเสริมสิน, และเอกสิทธิ์ เรืองรัตน์. 2542. การศึกษาเบื้องต้นสำหรับการสกัดแบบกะของไอออนโคบอลต์ในสารละลายกรดเกลือด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยแบบแผ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
13. Biswas, R. K.; Habib, M. A.; and Islam, M.N. 2000. Some Physicochemical Properties of (D2EHPA).1.Distribution, Dimerization, and Acid Dissociation Constant of D2EHPA in a Kerosene / 0.10 kmol m⁻³ (Na⁺,H⁺)Cl⁻ System and the Extraction of Mn(II). Industrial and Engineering Chemistry Research 39: 155-160.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. Cotton, F. A.; Wilkinson, G.; and Wiley, J. 1988. *Advanced Inorganic Chemistry*. 5th ed. Singapore.
15. มาลี ตั้งสถิตย์กุลชัย, ผศ.ดร. 2530. *เคมีอนินทรีย์*. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. กรุงเทพฯ.
16. นกกร ชัมมพิพิธ. 2542. เอกสารประกอบการเรียนการสอน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
17. Scott, K. 1995. *Handbook of Industrial Membranes*. Oxford : Elsevier Science Publishers Ltd.
18. Bailes, P. I.; and Hanson, C. 1976. *Liquid-Liquid Extraction*. Originally Published August 30 : 238-246.
19. HesPop, R.S; and Robinson. P.L. 1963. *Inorganic Chemistry a Guide to Advanced Study*. Elsevier Publishing Company.
20. King, R.B. 1994. *Encyclopedia of Inorganic Chemistry*. Vol.7. John Wiley & Sons Ltd. England
21. Skoog, D.F.; West, D.M.; and Holler, P.I. 1994. *Analytical Chemistry, An Introduction*. 6th ed. Sanders College Publishing.
22. Welty, J.R.; Wicks, C.E. ;and Wilson, R.E. 1984. *Fundamental of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายสตรีป (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม				
0.0	1.97	2.362	7.800	65.500	5.230	16.180	5.670	3.248	105.990	0.212	0.002	0.053	0.006	0.007	0.003	0.002	0.284				
0.5	1.91	2.081	6.160	57.500	4.445	13.880	4.825	2.764	91.655	0.003	0.002	0.239	0.006	0.007	0.017	0.009	0.282				
1.0	1.87	1.658	5.650	45.990	3.850	12.040	4.027	2.305	75.520	0.045	0.002	0.511	0.045	0.212	0.080	0.048	0.941				
2.0	1.83	1.310	5.210	42.860	3.351	10.520	3.437	1.949	68.637	0.393	0.015	9.700	0.057	2.158	0.938	0.532	13.793				
3.1	1.81	1.297	4.616	42.750	3.172	9.800	3.287	1.897	66.819	0.002	0.015	0.032	0.056	0.069	0.025	0.019	0.218				
4.4	1.78	1.211	4.380	39.510	3.095	9.390	3.091	1.782	62.459	0.221	0.062	13.170	0.224	1.395	0.951	0.526	16.548				
5.3	1.75	0.971	2.878	35.390	2.581	7.740	2.593	1.498	53.651	0.840	1.275	19.810	1.468	5.060	1.907	1.069	31.429				
7.0	1.65	0.459	2.384	27.120	1.877	5.520	1.644	0.936	39.940	1.349	2.488	26.570	2.232	7.720	2.802	1.600	44.761				
10.0	1.59	0.275	2.784	22.440	1.545	4.400	1.079	0.639	33.162	2.110	3.696	33.860	3.100	12.980	4.784	2.546	63.076				
15.0	1.51	0.002	2.097	13.000	0.754	1.654	0.348	0.213	18.068	2.082	4.852	43.710	4.333	13.340	4.728	2.741	75.786				
20.0	1.50	0.002	1.315	6.120	0.592	1.286	0.278	0.155	9.748	2.361	5.730	58.68	48.68	13.94	4.997	2.913	137.301				

ตารางที่ ก.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm ที่พีเอช 2.5

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายสกัด (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	ทม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	ทม				
0.0	2.77	3.683	14.470	76.500	6.380	23.200	7.170	4.008	135.411	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
2.0	2.76	3.576	13.590	76.600	5.990	21.830	6.710	3.760	132.056	0.189	0.690	3.501	0.335	1.021	0.420	0.262	6.417				
3.5	2.51	1.409	8.340	32.680	2.453	9.380	2.385	1.368	58.015	0.167	0.915	5.170	0.400	1.596	0.537	0.285	9.070				
4.1	2.55	1.597	8.900	40.500	2.930	11.060	2.993	1.695	69.675	0.235	1.371	7.500	0.675	2.344	0.775	0.410	13.310				
4.4	2.63	1.803	9.860	49.160	3.589	13.410	3.760	2.130	83.712	0.382	1.932	12.410	1.026	3.622	1.195	0.628	21.195				
5.1	2.60	0.673	4.614	34.140	1.725	6.430	1.858	0.987	50.427	0.494	2.316	13.510	1.220	4.374	1.439	0.763	24.116				
5.4	2.53	0.396	4.062	25.610	1.103	4.157	1.048	0.548	36.924	0.576	2.562	15.000	1.373	4.843	1.596	0.847	26.797				
6.4	2.45	0.301	3.562	20.790	0.703	2.647	0.592	0.317	28.912	0.678	2.829	17.390	1.545	5.570	1.826	0.965	30.803				
7.4	2.39	0.138	3.961	17.930	0.513	1.956	0.282	0.150	24.930	0.966	3.469	23.440	1.925	6.870	2.298	1.251	40.219				
8.4	2.26	0.346	4.170	25.200	0.568	2.106	0.467	0.315	33.172	0.961	3.765	23.610	2.051	7.470	2.531	1.327	41.715				
9.4	2.20	0.155	3.656	18.260	0.466	1.702	0.320	0.183	24.741	1.232	4.144	30.690	2.535	9.040	3.050	1.636	52.327				
10.5	2.12	0.258	5.280	21.910	0.801	3.023	0.533	0.318	32.123	1.476	5.380	35.940	3.131	11.110	3.767	2.054	62.858				
11.5	2.07	0.144	2.488	15.560	0.397	1.529	0.284	0.173	20.575	1.909	6.230	42.810	3.715	13.060	4.558	2.528	74.810				
12.5	2.05	0.120	3.123	17.800	0.449	1.756	0.238	0.153	23.639	2.057	6.880	49.080	4.168	14.930	5.130	2.782	85.027				

ตารางที่ ก.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 3.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm								ความเข้มข้นของธาตุหายากละลาย (ppm)							
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม
0.0	3.05	5.130	13.910	97.500	7.590	26.840	9.190	5.250	165.410	0.024	0.311	0.866	0.000	0.266	0.065	0.037	1.570
0.5	2.60	3.436	11.770	82.300	5.840	21.180	6.840	3.843	135.209	0.017	0.278	1.097	0.040	0.278	0.105	0.477	2.291
1.0	2.44	2.564	10.600	74.400	4.914	18.020	5.590	3.095	119.183	0.095	0.533	1.783	0.111	0.845	0.289	0.147	3.804
2.0	2.41	1.605	9.710	66.200	4.077	15.060	4.137	2.368	103.157	0.385	1.167	2.500	0.479	0.259	0.697	0.412	5.898
4.4	2.37	0.669	8.780	58.800	3.038	11.740	2.934	1.535	87.496	0.590	1.532	8.030	0.792	3.212	1.197	0.658	16.011
5.5	2.26	0.440	8.780	58.500	2.725	10.610	2.464	1.290	84.809	0.696	1.508	8.640	0.925	3.639	1.406	0.767	17.581
7.0	2.24	0.289	7.810	51.600	2.135	8.520	1.820	0.933	73.107	1.069	1.973	11.930	1.383	5.070	2.013	1.109	24.547
10.1	2.18	0.107	7.300	42.910	1.476	6.170	1.006	0.461	59.430	1.919	3.186	21.980	2.474	8.810	3.488	1.953	43.810
15.3	2.07	0.100	5.930	28.400	0.572	2.510	0.277	0.188	37.977	2.787	4.698	32.840	3.646	12.840	4.957	2.800	64.568

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายสกัด (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม				
0.0	2.07	3.867	11.710	93.100	6.120	21.910	7.260	4.181	148.148	0.017	0.227	0.788	0.416	0.704	0.234	0.144	2.530				
0.5	2.05	3.545	10.030	86.600	5.360	18.870	6.400	3.669	134.474	0.131	0.384	1.971	0.485	0.849	0.280	0.180	4.280				
1.0	2.04	3.453	10.270	83.700	5.560	20.040	6.660	3.824	133.507	0.016	0.574	3.659	0.551	1.053	0.344	0.212	6.409				
2.0	2.02	2.737	9.450	79.400	5.260	19.490	6.330	3.570	126.237	0.040	1.212	9.000	0.751	1.645	0.542	0.313	13.503				
3.0	2.01	2.835	8.750	72.200	4.932	18.420	5.890	3.321	116.348	0.055	1.692	13.470	0.974	2.183	0.751	0.412	19.537				
4.0	2.01	2.026	8.390	69.300	4.728	17.950	5.560	3.008	110.962	0.113	2.387	20.700	1.303	3.088	1.125	0.632	29.348				
5.0	2.01	2.682	7.890	66.800	4.473	17.170	5.330	3.002	107.347	0.109	2.903	25.570	1.545	3.712	1.397	0.789	36.025				
7.1	1.99	1.738	5.860	48.740	3.519	13.920	4.221	2.184	80.182	0.186	3.906	34.450	1.970	4.959	1.917	1.098	48.486				
10.0	1.99	2.492	5.330	42.900	3.442	13.860	4.251	2.380	74.655	0.353	5.480	47.240	2.605	6.800	2.665	1.573	66.716				
15.0	1.98	2.654	4.123	33.320	2.927	12.140	3.764	2.181	61.109	0.463	7.050	61.300	3.268	8.860	3.398	1.981	86.320				

ตารางที่ ก.5 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายสกัด (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม				
0.3	2.03	3.441	11.650	100.600	6.360	22.600	7.610	4.357	156.618	0.000	0.258	1.024	0.471	0.766	0.265	0.166	2.950				
0.6	2.02	3.400	10.710	93.700	6.000	21.320	7.240	4.168	146.538	0.024	0.450	2.553	0.507	0.928	0.296	0.186	4.944				
1.0	2.02	3.300	10.580	91.400	6.010	21.620	7.300	4.225	144.435	0.021	0.662	3.339	0.577	1.062	0.323	0.216	6.199				
2.0	2.01	3.200	9.970	87.500	5.930	21.110	7.290	4.238	139.238	0.015	1.188	6.810	0.714	1.410	0.415	0.254	10.806				
3.0	2.00	3.100	8.860	77.800	5.430	19.570	6.760	3.926	125.446	0.026	1.937	11.080	0.883	1.895	0.539	0.314	16.674				
4.0	2.00	2.998	8.360	74.900	5.360	19.570	6.750	3.925	121.863	0.057	3.066	19.350	1.185	2.782	0.763	0.425	27.627				
5.0	1.99	2.751	7.850	68.500	5.130	18.700	6.510	3.800	113.241	0.044	3.291	22.960	1.292	3.076	0.871	0.482	32.017				
7.0	1.93	2.251	5.210	46.870	3.870	14.500	4.986	2.935	80.622	0.086	5.200	37.950	1.913	4.766	1.414	0.758	52.087				
10.0	1.86	2.579	4.431	38.720	3.662	14.140	4.888	2.925	71.345	0.159	7.450	58.000	2.786	7.370	2.309	1.230	79.304				
15.0	1.82	2.330	2.846	25.240	2.737	10.860	3.828	2.345	50.186	0.366	10.170	79.200	3.935	10.940	3.567	1.944	110.122				

ตารางที่ ก.6 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายสกัด (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม				
0.0	2.03	4.508	12.850	108.600	6.770	23.230	4.759	168.787	0.012	0.386	1.664	0.684	1.172	0.384	0.258	4.560					
0.5	2.01	3.341	10.990	95.800	6.210	21.760	4.345	149.946	0.015	0.417	1.493	0.682	1.156	0.364	0.240	4.367					
1.0	1.99	2.756	8.930	78.200	5.320	18.660	3.622	123.898	0.026	0.654	3.106	0.770	1.310	0.416	0.271	6.552					
2.0	1.99	3.002	8.510	73.000	5.250	19.050	3.610	118.872	0.020	1.304	7.780	0.923	1.709	0.505	0.317	12.558					
3.0	1.97	2.842	7.260	60.600	4.492	17.200	2.559	100.123	0.050	2.533	15.590	1.265	2.710	0.778	0.463	23.388					
4.4	1.96	3.185	6.400	52.300	4.233	16.110	2.952	90.450	0.095	4.214	26.480	1.761	4.067	1.192	0.666	38.475					
5.3	1.95	2.750	5.420	43.810	3.613	14.360	2.224	76.402	0.063	4.447	35.030	1.985	4.684	1.440	0.774	48.423					
7.0	1.94	2.614	4.307	34.940	3.101	12.590	1.957	63.195	0.149	6.330	48.170	2.613	6.710	2.128	1.122	67.222					
10.0	1.94	2.420	2.873	23.440	2.495	10.190	1.765	46.275	0.216	7.730	63.800	3.378	8.880	3.032	1.616	88.652					
15.0	1.93	2.379	1.878	15.690	1.953	8.080	1.546	33.988	0.240	9.160	76.100	4.069	11.180	3.896	2.110	106.755					

ตารางที่ ก.7 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายสกัด (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม				
0.0	1.99	6.520	18.820	162.000	10.150	37.250	12.360	6.910	254.010	0.001	0.005	0.047	0.040	0.037	0.023	0.016	0.169				
0.5	1.96	5.990	17.720	153.000	9.690	36.190	11.830	6.540	240.960	0.001	0.005	0.047	0.040	0.037	0.023	0.016	0.169				
1.0	1.97	5.880	17.270	149.300	9.590	35.940	11.720	6.470	236.170	0.001	0.063	0.343	0.040	0.037	0.023	0.016	0.523				
2.0	1.97	5.980	16.800	146.600	9.530	35.780	11.730	6.470	232.890	0.001	0.197	1.524	0.040	0.037	0.023	0.016	1.838				
3.0	1.97	6.040	16.400	145.000	9.510	35.840	11.730	6.510	231.030	0.001	0.328	1.706	0.040	0.037	0.023	0.016	2.152				
6.0	1.96	4.745	12.220	109.400	7.050	27.020	8.990	4.999	174.424	0.001	1.848	9.080	0.040	0.328	0.023	0.016	11.336				
7.0	1.96	4.830	12.050	108.900	7.110	27.210	9.000	5.050	174.150	0.001	1.941	12.080	0.040	0.374	0.023	0.016	14.475				
10.0	1.94	5.030	11.520	106.000	7.040	27.030	9.010	5.060	170.690	0.001	2.928	17.510	0.040	0.645	0.095	0.016	21.235				
15.0	1.94	4.836	10.670	100.600	6.790	26.380	8.810	4.938	163.024	0.001	3.821	25.560	0.040	1.235	0.291	0.083	31.031				

ตารางที่ ก.8 ความเข้มข้นของธาตุหายากที่ อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายยอน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายตรีป (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม				
0.0	1.01	2.726	10.490	63.700	3.977	15.010	4.863	2.718	103.484	0.218	0.375	0.077	0.343	0.756	0.244	0.174	2.186				
0.5	0.99	2.055	10.290	61.000	3.782	14.690	4.612	2.503	98.932	0.225	4.058	1.361	0.418	1.993	0.268	0.189	8.513				
1.0	0.97	1.534	10.030	58.300	3.637	14.340	4.347	2.298	94.486	0.262	4.103	2.940	0.521	2.387	0.434	0.253	10.899				
2.0	0.97	1.909	11.460	57.500	3.730	14.540	4.385	2.338	95.862	0.262	4.308	6.420	0.679	2.762	0.563	0.353	15.347				
3.0	0.96	1.892	10.380	53.900	3.463	13.760	4.135	2.225	89.755	0.301	4.388	9.100	0.814	3.123	0.774	0.466	18.966				
4.0	0.95	1.919	9.690	52.900	3.409	13.550	4.100	2.185	87.753	0.358	4.731	11.970	0.972	3.662	0.995	0.571	23.259				
5.0	0.93	1.780	6.760	50.500	3.000	12.050	3.795	1.995	79.880	0.409	4.939	14.330	1.085	4.038	1.104	0.686	26.591				
7.0	0.92	1.222	4.687	42.370	2.354	10.010	3.198	1.568	65.409	0.538	5.340	19.400	1.395	4.972	1.521	0.906	34.072				
10.0	0.90	1.143	4.969	36.910	2.171	9.370	2.837	1.392	58.792	0.712	5.920	27.130	1.755	6.150	1.995	1.208	44.874				
15.0	0.90	0.878	5.950	29.070	1.866	8.360	2.344	1.062	49.530	1.057	6.690	36.390	2.296	7.840	2.662	1.602	58.537				
20.0	0.89	0.900	3.229	26.140	1.394	6.710	1.961	0.931	41.265	1.287	7.180	42.860	2.688	9.020	3.107	1.855	67.997				

ตารางที่ ก.9 ความเข้มข้นของธาตุหายากที่ อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.5

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)							ความเข้มข้นของสารละลายสกัด (ppm)								
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม
0.0	1.50	4.985	14.710	126.400	7.790	28.570	9.540	5.360	197.355	0.001	0.107	0.495	0.040	0.085	0.023	0.016	0.767
0.5	1.49	4.469	13.730	120.300	7.430	27.830	9.230	5.160	188.149	0.001	0.180	1.185	0.040	0.133	0.023	0.016	1.578
1.0	1.48	4.125	13.270	116.200	7.230	27.410	9.660	5.040	182.935	0.001	0.282	1.888	0.040	0.191	0.023	0.016	2.440
2.0	1.47	4.421	12.670	112.300	7.130	27.120	8.990	4.992	177.623	0.001	0.775	5.220	0.124	0.515	0.110	0.044	6.788
3.0	1.46	3.684	11.670	104.600	6.710	25.890	8.460	4.695	165.709	0.001	1.497	10.440	0.298	1.013	0.228	0.092	13.569
4.0	1.46	3.348	10.610	94.100	6.150	24.130	7.810	4.303	150.451	0.001	2.418	15.660	0.499	1.650	0.409	0.187	20.822
5.0	1.46	3.686	10.650	94.700	6.320	24.970	8.120	4.502	152.948	0.001	2.674	19.230	0.600	1.963	0.505	0.229	25.202
7.0	1.46	2.171	9.320	82.700	5.570	23.280	7.130	3.517	133.688	0.001	3.735	28.280	1.048	3.080	0.893	0.422	37.458
10.0	1.44	2.168	9.230	86.000	5.650	23.580	7.150	3.492	137.270	0.068	6.230	47.420	1.922	5.660	1.714	0.818	63.832
15.0	1.42	1.694	4.361	41.730	3.423	16.430	5.220	2.822	75.680	0.167	8.620	69.200	3.088	9.130	2.865	1.409	94.479

ตารางที่ ก.10 ความเข้มข้นของธาตุหายากที่ อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.5

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายตรีป (ppm)					
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม
0.0	2.43	5.050	14.650	126.000	7.640	28.450	9.480	5.340	196.610	0.001	0.067	0.067	0.040	0.037	0.023	0.016	0.251
0.5	2.39	4.758	13.620	117.600	7.300	27.500	9.040	5.030	184.848	0.001	0.036	0.292	0.040	0.037	0.023	0.016	0.446
1.0	2.38	4.669	13.220	118.100	7.200	27.000	8.950	4.981	184.120	0.001	0.078	0.636	0.040	0.037	0.023	0.016	0.831
2.0	2.37	4.634	13.220	116.100	7.220	27.250	8.980	5.000	182.404	0.001	0.886	1.753	0.040	0.037	0.023	0.016	2.756
3.0	2.36	4.906	13.430	120.800	7.560	28.340	9.390	5.240	189.716	0.001	0.774	3.047	0.040	0.037	0.023	0.016	3.938
4.0	2.35	4.661	12.470	114.200	7.100	26.900	8.910	4.991	179.232	0.001	0.852	4.226	0.040	0.037	0.023	0.016	5.195
5.0	2.35	4.640	12.580	114.300	7.040	26.840	8.930	4.994	179.324	0.001	0.903	4.907	0.040	0.037	0.023	0.016	5.927
7.0	2.33	4.375	11.620	106.100	6.560	24.990	8.330	4.671	166.646	0.001	1.207	6.690	0.040	0.037	0.023	0.016	8.014
10.0	2.35	4.795	12.520	114.400	7.240	27.430	9.170	5.130	180.685	0.001	1.619	8.530	0.040	0.037	0.023	0.016	10.266
15.0	2.31	4.605	11.470	108.300	6.880	26.300	8.840	4.961	171.356	0.001	2.218	11.620	0.040	0.037	0.023	0.016	13.955

ตารางที่ ก.11 ความเข้มข้นของธาตุหายากที่ อัตราส่วนโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 3.5

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายสกัด (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม				
0.0	3.58	6.250	17.910	155.100	9.610	35.340	11.790	6.620	242.620	0.001	0.005	0.047	0.040	0.037	0.023	0.016	0.169				
0.5	2.96	4.877	14.480	117.900	7.370	28.200	9.210	5.210	187.247	0.001	0.005	0.047	0.040	0.037	0.023	0.016	0.169				
1.0	3.04	5.040	14.480	125.400	7.700	28.780	9.560	5.360	196.320	0.001	0.005	0.047	0.040	0.037	0.023	0.016	0.169				
2.0	2.97	5.040	14.070	119.900	7.430	28.170	9.250	5.190	189.050	0.001	0.005	0.047	0.040	0.037	0.023	0.016	0.169				
3.0	2.92	4.725	13.550	115.700	7.190	27.500	8.970	5.020	182.655	0.001	0.005	0.128	0.040	0.037	0.023	0.016	0.251				
4.0	3.15	5.610	15.460	130.300	8.270	31.610	10.230	5.740	207.220	0.001	0.005	0.128	0.040	0.037	0.023	0.016	0.251				
5.0	3.45	5.920	17.010	145.500	9.330	35.320	11.390	6.390	230.860	0.001	0.035	0.415	0.040	0.037	0.023	0.016	0.567				
7.0	3.41	5.830	16.600	142.700	9.120	34.620	11.200	6.200	226.270	0.001	0.247	1.370	0.040	0.037	0.023	0.016	1.734				
10.0	3.33	5.670	16.420	139.700	9.060	34.550	10.920	6.050	222.370	0.001	0.610	3.878	0.040	0.037	0.023	0.016	4.605				
15.0	2.99	5.420	15.430	131.300	9.600	33.450	10.450	5.740	211.390	0.001	1.397	6.430	0.040	0.037	0.023	0.016	7.944				

ตารางที่ ก.12 ความเข้มข้นของธาตุหายากที่ อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 5.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายตรีป (ppm)					
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม
0.0	5.17	5.480	15.470	133.900	8.280	29.260	9.990	5.720	208.100	0.012	0.364	0.290	0.107	0.370	0.100	0.066	1.310
0.5	5.01	5.220	15.310	130.900	8.150	28.790	9.800	5.630	203.700	0.015	0.166	0.380	0.040	0.141	0.065	0.048	0.856
1.0	4.45	4.168	12.470	106.100	6.650	23.510	8.020	4.578	165.496	0.045	0.232	0.348	0.059	0.244	0.101	0.068	1.097
2.0	4.43	5.030	15.070	130.200	8.070	28.690	9.740	5.550	202.350	0.001	0.136	0.286	0.040	0.057	0.047	0.022	0.589
3.0	4.41	5.030	15.060	129.000	8.160	29.030	9.860	5.570	201.710	0.013	0.160	0.478	0.047	0.757	0.054	0.022	1.531
4.1	4.34	4.899	15.020	129.300	8.090	28.840	9.800	5.530	201.479	0.066	0.290	0.543	0.221	0.750	0.209	0.115	2.194
5.1	4.32	4.962	15.020	127.900	8.020	28.570	9.670	5.480	199.622	0.035	0.411	0.501	0.075	0.286	0.109	0.071	1.487
7.1	4.30	4.705	14.730	124.800	7.840	27.980	9.460	5.360	194.875	0.017	0.176	0.667	0.061	0.148	0.089	0.057	1.214
10.0	4.30	4.828	15.120	129.500	8.090	28.920	9.780	5.540	201.778	0.045	0.377	0.996	0.095	0.288	0.112	0.066	1.978
15.0	4.28	4.998	14.690	125.700	7.880	28.130	9.570	5.460	196.428	0.045	0.329	0.917	0.099	0.391	0.136	0.093	2.010

ตารางที่ ก.13 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายไอออน (ppm)								ความเข้มข้นของสารละลายสตรีป (ppm)							
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม
0.0	2.00	27.540	71.200	679.000	39.610	142.700	49.640	28.290	1037.980	0.002	0.280	0.240	0.056	0.176	0.025	0.019	0.798
0.5	1.99	27.170	67.200	673.000	39.380	140.200	49.360	28.000	1024.310	0.002	0.305	0.926	0.056	0.237	0.026	0.019	1.571
1.0	2.00	27.440	69.000	678.000	39.730	143.400	49.960	28.360	1035.890	0.002	0.736	1.302	0.056	0.390	0.039	0.019	2.544
2.1	2.00	27.430	67.500	676.000	39.410	142.200	49.750	28.260	1030.550	0.048	1.669	7.260	0.241	1.249	0.261	0.112	10.841
3.1	1.99	26.790	66.500	667.000	38.850	140.900	49.210	27.980	1017.230	0.038	0.808	5.040	0.056	0.541	0.107	0.034	6.624
4.0	1.99	26.750	67.400	666.000	39.090	140.700	49.130	28.220	1017.290	0.002	1.250	6.930	0.109	0.728	0.140	0.049	9.208
5.0	2.00	27.000	67.000	671.000	39.270	142.100	49.550	28.170	1024.090	0.002	1.487	10.460	0.229	0.992	0.260	0.105	13.534
7.0	1.99	26.970	65.900	660.000	38.650	139.600	48.710	28.010	1007.840	0.002	1.989	14.850	0.388	1.415	0.409	0.183	19.236
10.0	1.97	26.420	63.900	640.000	37.730	136.800	47.620	27.410	979.880	0.029	3.104	22.480	0.657	2.183	0.680	0.333	29.466
15.0	1.97	26.890	62.800	637.000	37.820	137.800	48.120	27.570	978.000	0.095	5.010	36.010	1.194	3.624	1.177	0.596	47.706
20.0	1.97	27.080	62.700	630.000	38.120	138.300	48.240	27.660	972.100	0.107	6.190	47.830	1.553	4.533	1.532	0.785	62.530

ตารางที่ ก.14 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.0

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายยอน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายตรีป (ppm)									
	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม				
0.0	28.190	81.600	707.000	43.980	160.200	53.500	29.750	1104.220	0.002	0.408	0.473	0.073	0.334	0.035	0.019	1.344				
0.6	24.660	70.500	611.000	38.250	139.100	46.130	25.890	955.530	0.002	0.238	0.793	0.203	0.768	0.149	0.060	2.213				
1.0	24.820	70.700	612.500	38.240	140.100	46.680	26.110	958.650	0.002	0.279	1.192	0.056	0.168	0.025	0.019	1.741				
2.0	27.450	71.500	626.000	38.070	149.500	48.850	27.730	989.100	0.002	0.959	3.828	0.145	0.502	0.104	0.048	5.588				
3.0	26.470	76.200	623.000	40.680	148.600	48.800	27.280	991.030	0.002	1.491	5.480	0.056	0.069	0.025	0.019	7.142				
4.4	26.700	74.000	640.000	40.460	148.200	49.460	27.710	1006.530	0.002	1.767	9.530	0.056	0.069	0.025	0.019	11.468				
7.0	24.860	67.400	593.000	37.410	138.100	46.130	25.860	932.760	0.002	3.845	17.670	0.251	1.958	0.382	0.125	24.233				
10.0	25.190	65.800	589.000	37.080	139.700	46.730	26.050	929.550	0.002	4.656	24.040	0.283	1.649	0.266	0.070	30.966				
15.0	24.920	63.400	567.000	36.610	136.200	45.940	25.540	899.610	0.002	6.370	33.190	0.538	2.514	0.438	0.148	43.200				
20.0	25.590	63.800	577.000	37.370	138.300	46.410	26.190	914.660	0.002	8.780	44.680	1.084	4.042	0.782	0.274	59.644				

ตารางที่ ก.15 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.5

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายตรีป (ppm)					
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม
0.0	3.36	47.360	133.9	1148.0	71.400	252.80	86.500	49.000	1788.960	0.002	0.305	0.385	0.056	0.235	0.025	0.019	1.028
0.5	3.38	47.940	135.9	1159.0	72.400	256.60	87.700	49.520	1808.060	0.214	0.675	0.784	0.196	1.197	0.155	0.006	3.227
1.5	3.44	48.830	136.0	1177.0	73.400	261.60	89.400	50.800	1837.030	0.153	0.304	6.470	0.539	2.520	0.453	0.201	10.640
2.0	3.46	49.570	137.8	1193.0	74.500	264.40	90.900	51.300	1861.470	0.002	0.073	2.681	0.056	0.313	0.025	0.019	3.169
3.3	3.43	49.150	135.9	1178.0	73.700	261.30	89.000	50.800	1837.850	0.002	1.045	4.709	0.056	0.520	0.068	0.028	6.428
4.0	2.87	47.400	130.7	1136.0	71.300	252.00	86.800	49.390	1773.590	0.242	1.245	5.670	0.225	0.466	0.628	0.275	8.751
5.0	3.47	50.300	140.2	1194.0	75.400	267.00	91.400	52.000	1870.300	0.074	3.028	7.560	0.828	0.997	1.081	0.274	13.843
7.0	3.41	49.040	133.5	1165.0	73.400	260.40	89.600	50.800	1821.740	0.002	3.686	11.480	0.296	1.353	1.841	0.069	18.727
10.3	3.40	50.300	135.2	1183.0	74.600	265.50	91.400	52.000	1852.000	0.002	4.449	17.290	0.558	1.715	0.309	0.127	24.450
15.0	3.28	47.310	121.9	1097.0	70.400	253.50	87.000	49.330	1726.440	0.002	4.810	25.880	1.038	4.183	0.458	0.122	36.493
20.0	3.30	48.960	128.8	1143.0	72.200	257.50	88.900	50.700	1790.060	0.002	8.410	42.800	1.709	6.020	0.839	0.284	60.064

ตารางที่ ก.16 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของEDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm
พีเอช 5.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายสกัด (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	ทาม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	ทาม				
0.0	4.81	28.400	74.900	670.00	40.360	145.20	50.900	29.290	1039.1	0.002	0.593	0.453	0.132	0.325	0.046	0.025	1.576				
0.5	4.55	26.540	65.900	652.00	37.460	135.50	47.780	27.330	992.5	0.002	0.818	0.591	0.185	0.536	0.099	0.033	2.264				
1.0	4.58	27.520	69.500	684.00	40.110	143.80	50.700	29.030	1044.7	0.002	0.794	0.988	0.397	0.912	0.199	0.110	3.402				
2.0	4.58	28.970	72.400	689.00	41.060	143.60	52.400	30.750	1058.2	0.002	0.359	0.774	0.056	0.190	0.025	0.019	1.425				
3.0	4.56	28.490	74.300	686.00	42.860	151.30	53.000	30.690	1066.6	0.002	0.405	1.238	0.056	0.199	0.025	0.019	1.944				
4.0	4.53	27.010	69.900	686.00	41.210	149.10	51.400	29.160	1053.8	0.002	0.407	1.125	0.056	0.173	0.025	0.019	1.807				
5.0	4.55	27.050	70.400	682.00	44.300	160.40	52.200	29.060	1065.4	0.002	0.429	0.793	0.056	0.083	0.025	0.019	1.407				
7.0	4.46	26.020	72.300	664.00	40.530	147.30	50.100	28.190	1028.4	0.002	0.576	1.323	0.056	0.095	0.025	0.019	2.096				
10.0	4.37	25.620	66.400	661.00	39.360	144.90	49.840	27.870	1015.0	0.002	0.536	2.389	0.056	0.202	0.025	0.019	3.229				
15.0	4.21	26.280	68.600	673.00	40.480	148.40	50.700	28.530	1036.0	0.002	1.209	5.840	0.176	0.481	0.093	0.035	7.836				
20.0	4.10	24.870	62.700	632.00	38.760	144.10	48.650	27.280	978.4	0.002	6.250	11.080	0.764	2.267	0.031	0.113	20.507				

ตารางที่ ก.17 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm ที่พีเอช 2.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายยอน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายตรีป (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	ทวม	Y	La	Ce	Pr	Nd'	Sm	Gd	ทวม				
0.0	2.02	17.810	52.600	447.900	28.720	96.200	34.220	19.270	696.720	0.176	0.989	0.370	0.210	0.453	0.234	0.195	2.626				
0.5	1.92	12.480	45.090	361.290	25.080	86.800	30.210	16.710	577.570	0.019	1.801	9.030	0.394	1.386	0.369	0.177	13.176				
1.0	1.89	3.737	37.800	293.300	19.630	72.800	22.870	11.590	461.727	0.069	3.602	26.380	1.093	3.379	0.891	0.400	35.814				
2.0	1.86	9.740	32.840	250.900	17.900	66.200	21.350	11.820	410.750	0.077	7.070	63.100	2.877	8.460	2.725	1.225	85.534				
3.0	1.96	12.090	40.930	323.900	22.300	78.300	26.740	14.960	519.220	0.169	10.060	100.200	4.560	12.980	4.320	1.960	134.249				
4.0	1.87	6.890	31.360	223.800	15.910	61.700	18.650	9.990	368.300	0.368	13.010	130.000	6.490	18.320	6.950	3.430	178.568				
5.0	1.83	7.880	29.780	209.600	15.510	59.500	17.860	9.470	349.600	0.883	17.170	179.300	9.330	25.920	10.410	5.420	248.433				
7.0	1.80	10.130	26.850	187.300	14.410	56.800	16.720	8.930	321.140	1.714	23.040	235.500	12.700	35.270	14.780	8.170	331.174				
10.0	1.78	11.820	21.020	147.800	12.170	49.430	14.660	7.860	264.760	3.469	60.100	367.500	22.670	68.000	24.470	13.350	559.559				
15.0	1.70	3.260	9.170	51.900	5.170	25.330	6.550	3.313	104.693	5.890	78.300	413.900	28.010	87.300	30.170	16.570	660.140				
20.0	1.67	2.709	4.202	19.300	2.269	13.660	3.211	1.410	46.761	6.927	85.540	420.200	29.990	89.100	31.920	16.670	680.347				

ตารางที่ ก.18 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm
พีเอช 2.0

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (ppm)										ความเข้มข้นของสารละลายสกัด (ppm)									
		Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	รวม				
0.0	2.07	21.610	61.700	543.000	34.700	115.600	40.940	23.590	841.140	0.002	0.621	0.888	0.099	0.422	0.096	0.043	2.169				
0.5	2.01	20.690	56.900	500.000	32.510	109.400	39.050	22.150	780.700	0.014	1.932	15.860	0.511	1.596	0.396	0.193	20.502				
1.0	2.03	20.370	58.200	512.000	33.590	113.400	40.140	22.470	800.170	0.062	3.111	23.020	0.893	2.684	0.738	0.341	30.850				
2.0	1.99	16.920	52.000	506.000	28.860	98.000	38.200	19.400	759.380	0.074	5.010	40.090	1.618	4.571	1.383	0.641	53.387				
3.0	1.98	19.290	54.700	476.200	31.560	108.900	38.150	21.230	750.030	0.140	6.990	55.800	2.326	6.460	2.063	1.014	74.793				
4.0	1.96	19.110	52.000	449.600	30.210	104.700	36.660	20.370	712.650	0.201	9.280	69.800	2.998	8.280	2.690	1.401	94.650				
5.0	1.93	18.990	50.100	438.100	29.920	104.100	36.390	20.150	697.750	0.271	9.010	68.800	2.986	8.210	2.770	1.529	93.576				
7.0	1.92	19.240	45.760	410.260	28.430	99.700	35.010	19.260	657.660	0.489	14.130	113.100	4.937	13.210	4.260	2.710	152.836				
10.0	1.92	18.050	81.600	368.900	30.690	107.500	34.370	18.480	659.590	0.863	18.760	152.900	6.770	18.130	6.610	3.947	207.980				
15.0	1.87	17.900	82.300	307.900	28.170	102.100	31.800	16.740	586.910	1.604	27.220	221.300	10.200	27.380	10.100	6.110	303.914				
20.0	1.21	17.430	64.800	252.900	24.460	90.600	28.570	15.140	493.900	1.883	37.090	278.100	13.400	37.290	13.490	7.920	389.173				

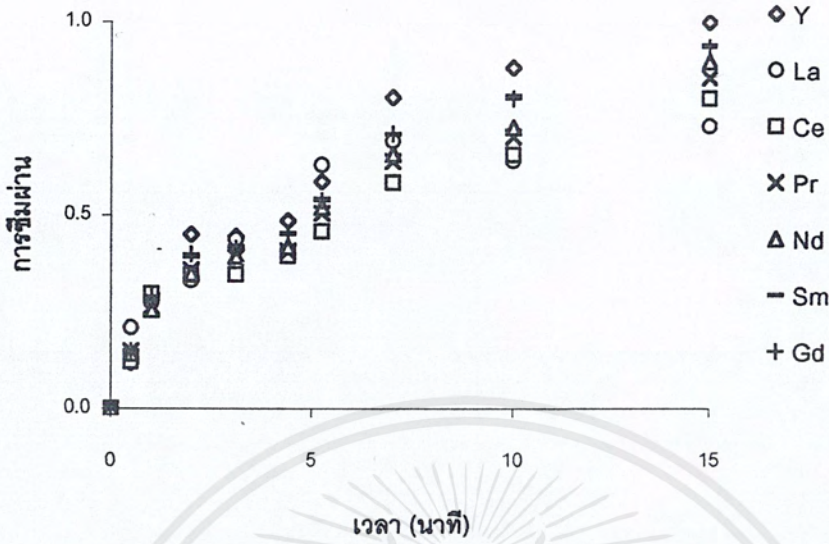
ภาคผนวก ข

กราฟแสดงการซึมผ่านและการแยก

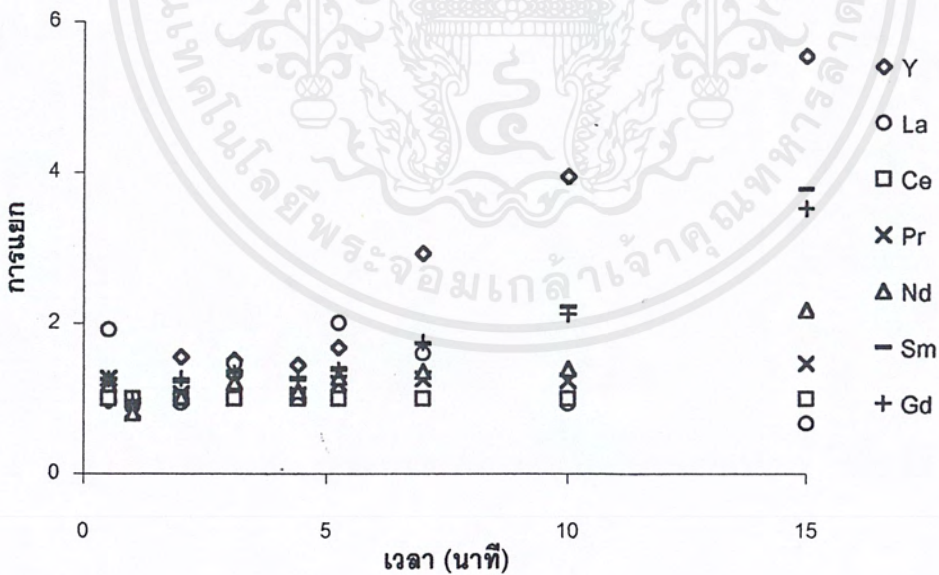
ค่าการซึมผ่านของธาตุหายากแต่ละธาตุ และค่าการแยกเมื่อเทียบกับซีเรียม ในแต่ละสภาวะ จากสมการ 2.16 และ 2.17

- ◆ การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm การซึมผ่านและการแยกแสดงดังรูป ข.1.1 ถึง ข.3.2
- ◆ การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เมื่อเติมลงในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 2.0 การซึมผ่านและการแยกแสดงดังรูปที่ ข.4.1 ถึง ข.7.2
- ◆ การหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm การซึมผ่านและการแยกแสดงดังรูปที่ ข.8.1 ถึง ข.13.2
- ◆ การหาค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 การซึมผ่านและการแยกแสดงดังรูปที่ ข.14.1 ถึง ข.17.2
- ◆ การหาปริมาณ EDTA ที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายากเป็น 1000 ppm พีเอชเริ่มต้นของสารละลายป้อนเป็น 2.0 การซึมผ่านและการแยกแสดงดังรูปที่ ข.18.1 ถึง ข.20.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

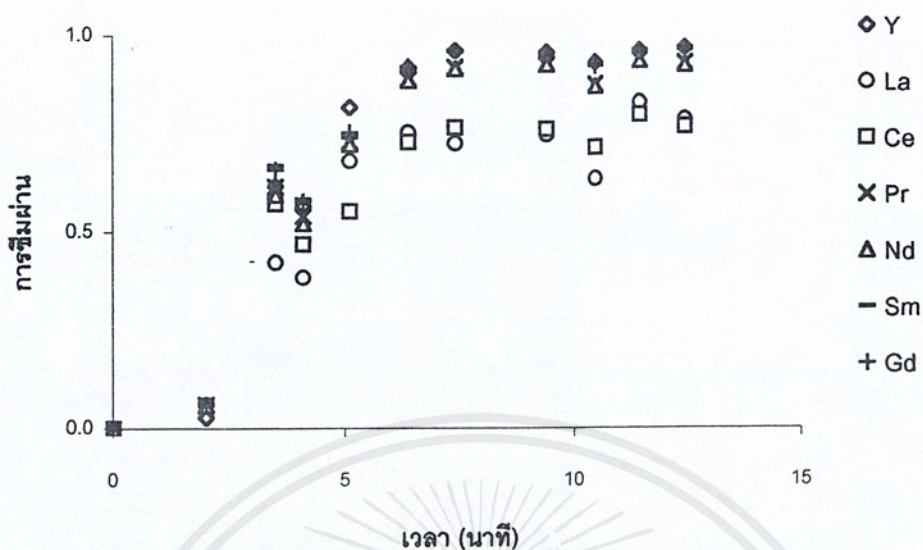


รูปที่ ข.1.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm
พีเอช 2.0

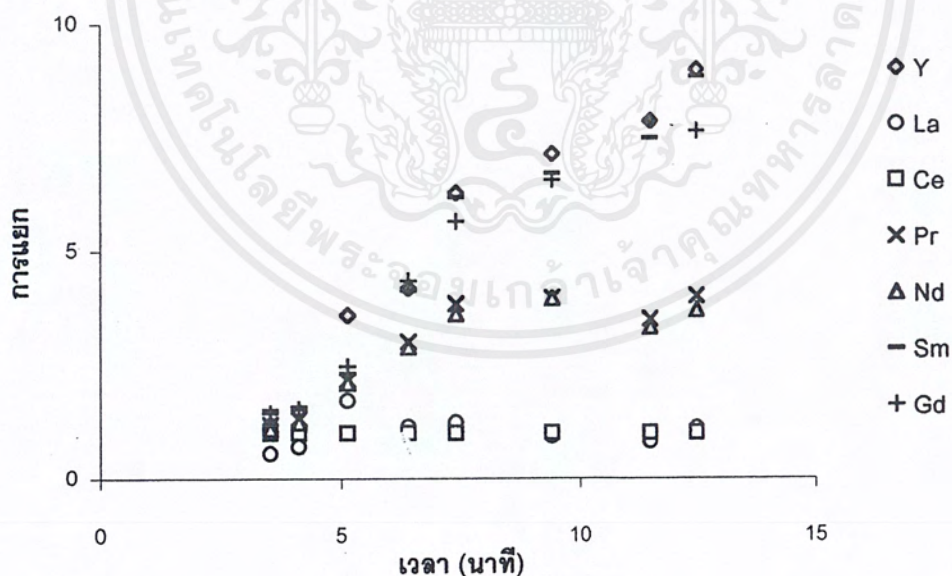


รูปที่ ข.1.2 การแยกของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm
พีเอช 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

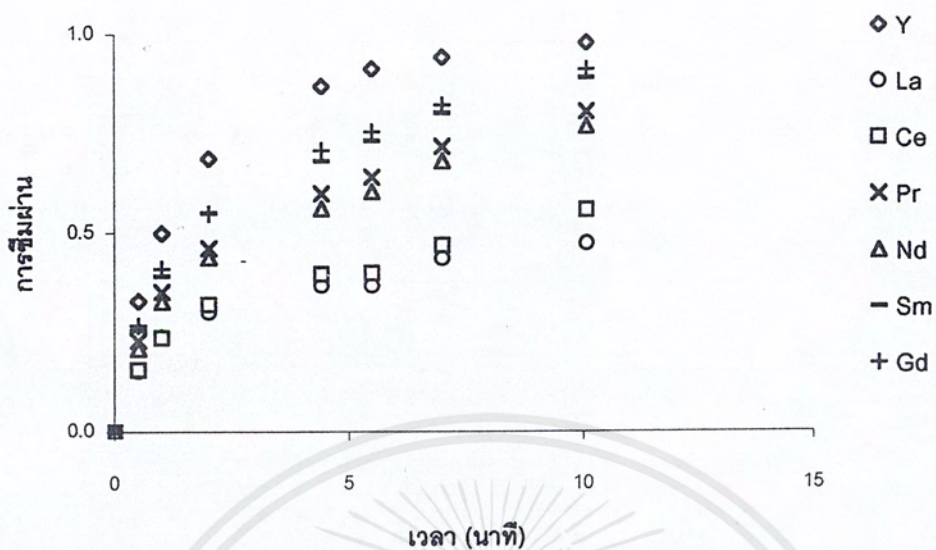


รูปที่ ข.2.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm
พีไอเอช 2.5

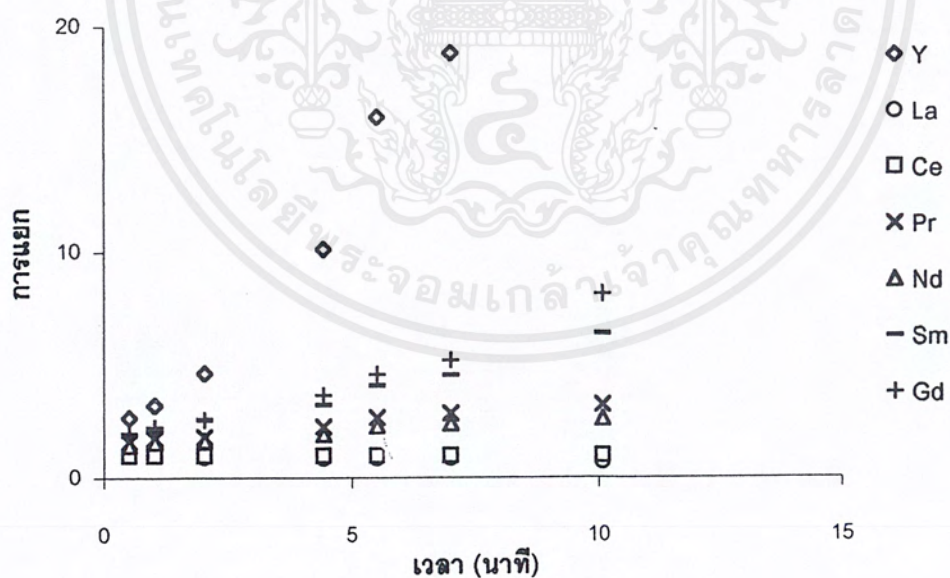


รูปที่ ข.2.2 การแยกของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm
พีไอเอช 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

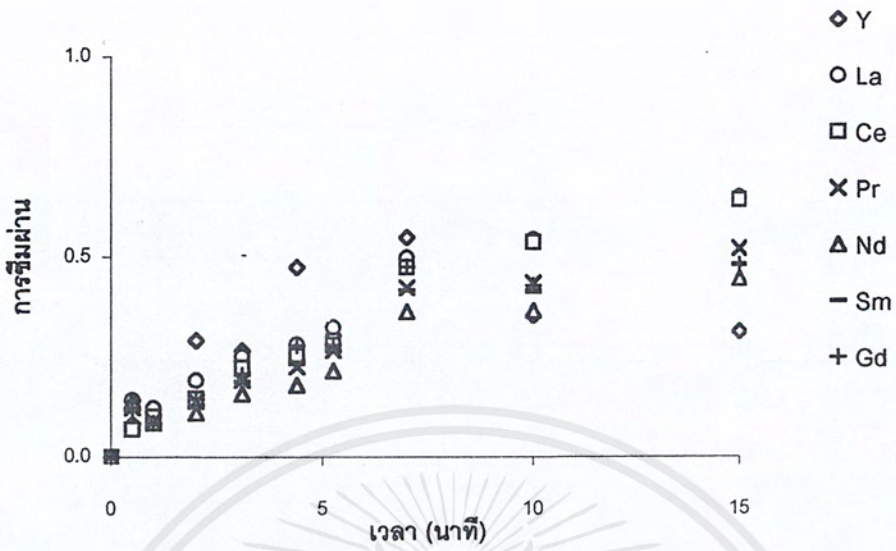


รูปที่ ข.3.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm
พีเอช 3.0

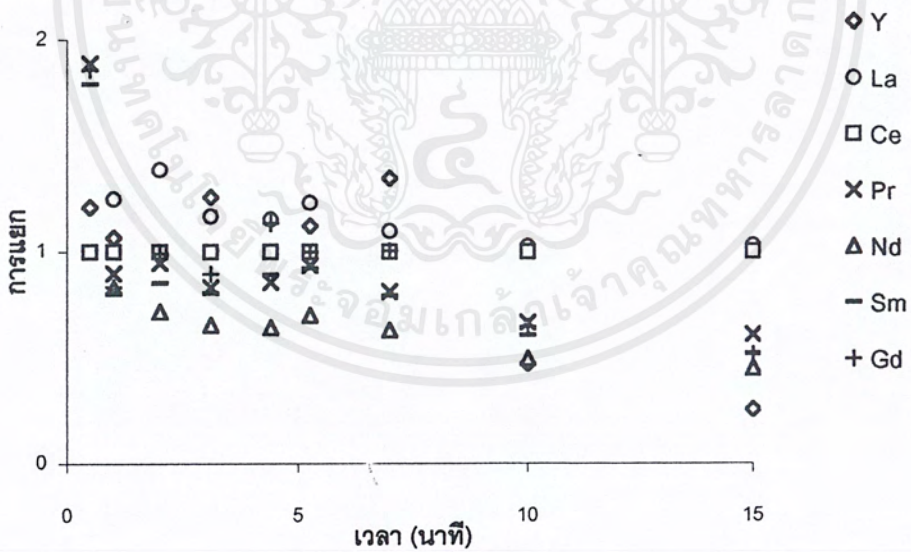


รูปที่ ข.3.2 การแยกของธาตุหายาก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm
พีเอช 3.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

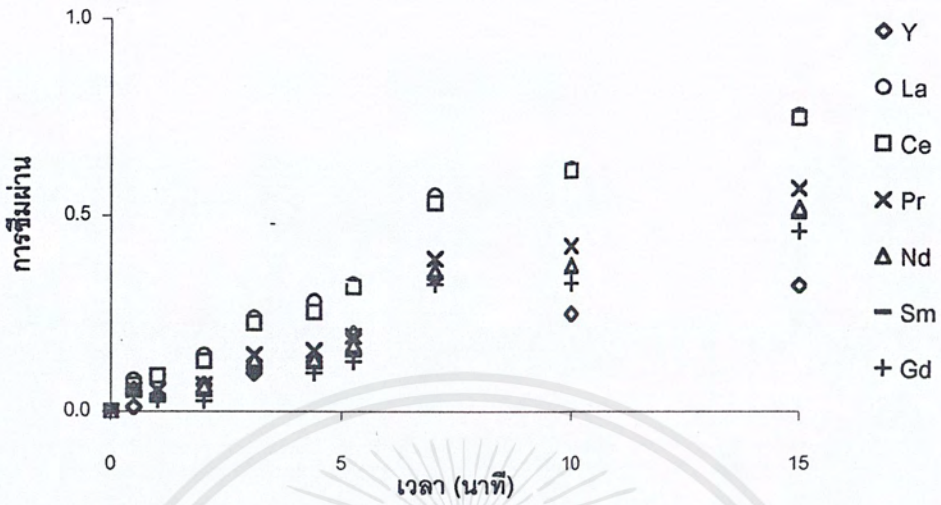


รูปที่ ข.4.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

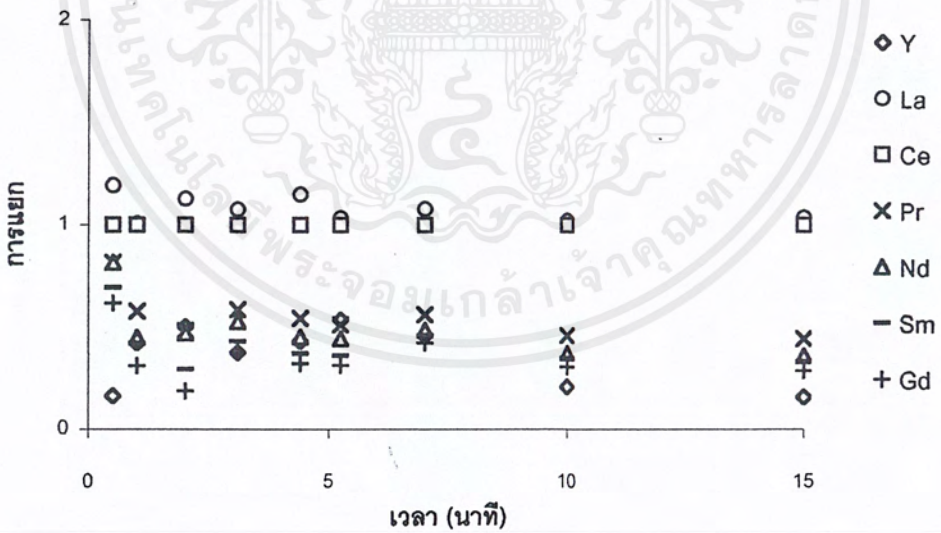


รูปที่ ข.4.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

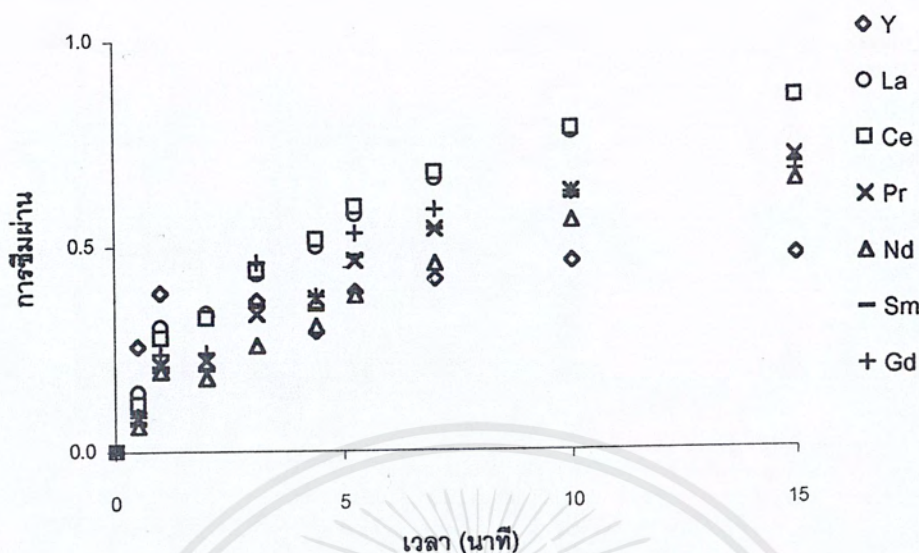
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



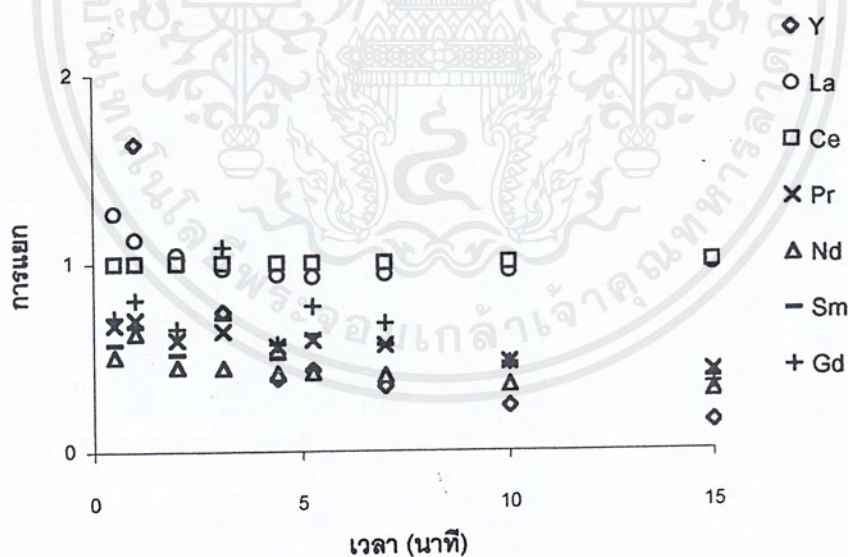
รูปที่ ข.5.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm - พีเอช 2.0



รูปที่ ข.5.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

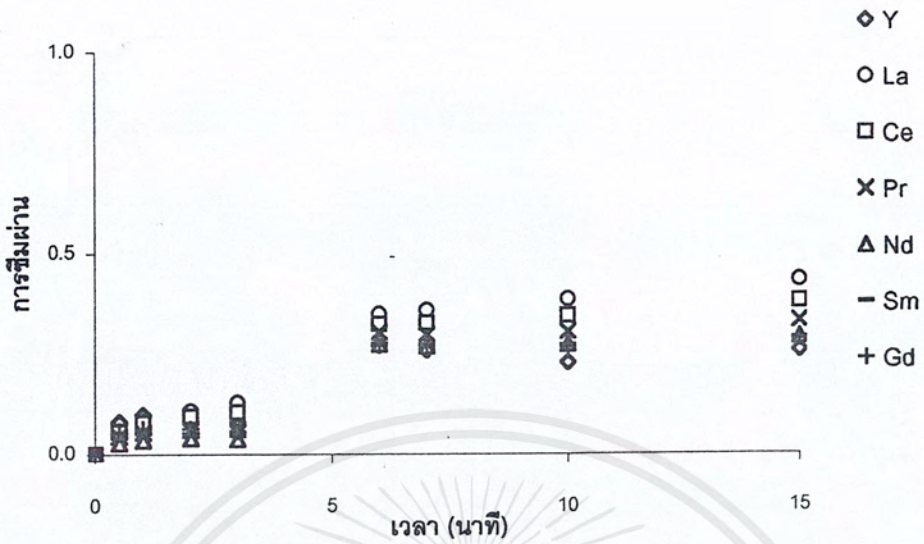


รูปที่ ข.6.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

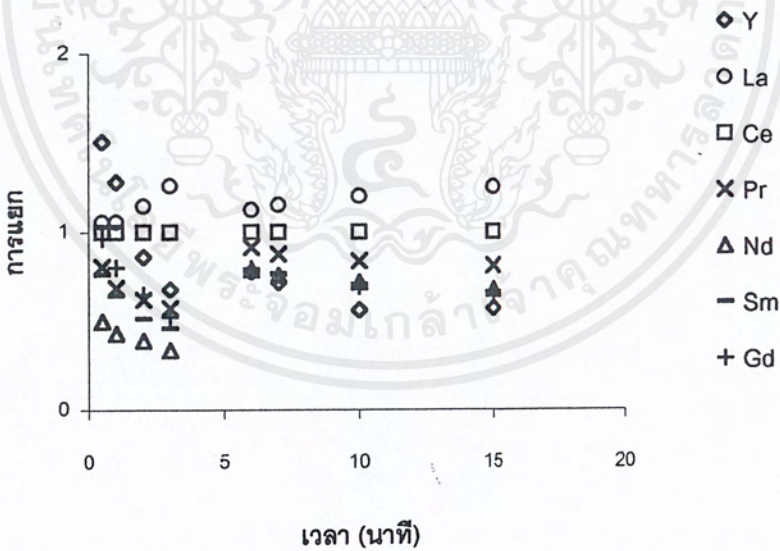


รูปที่ ข.6.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

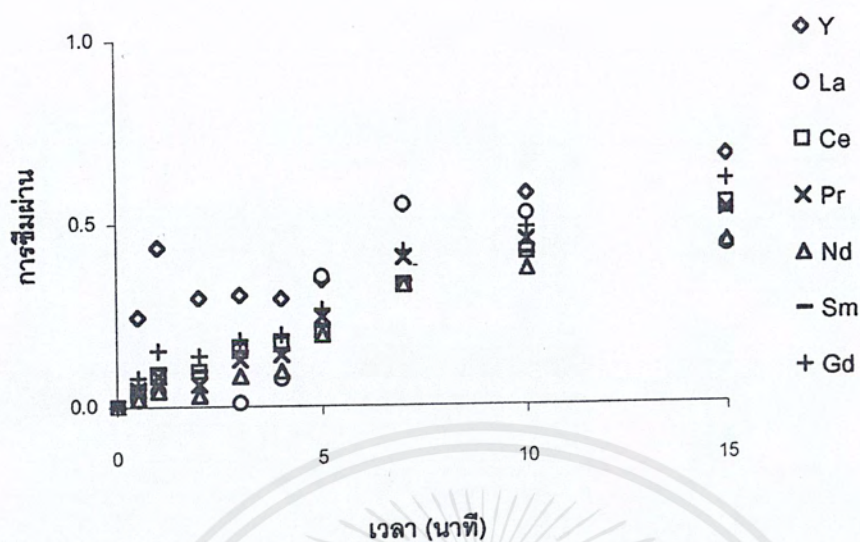


รูปที่ ข.7.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2:0

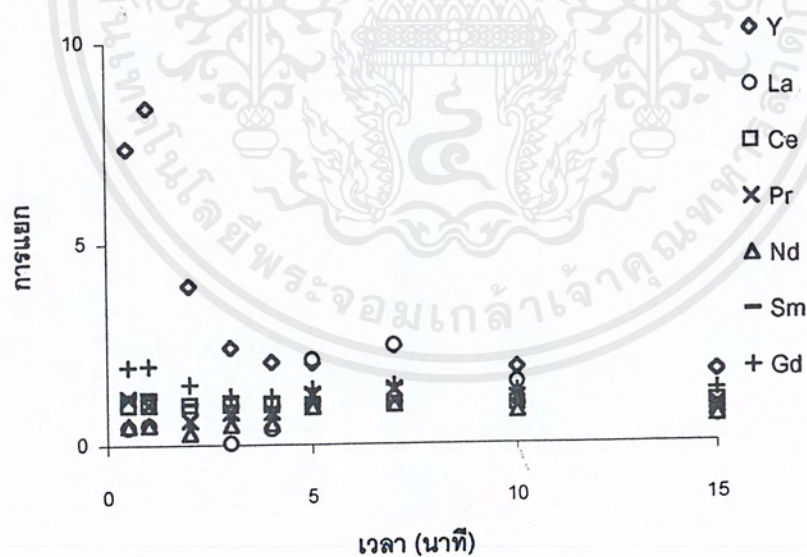


รูปที่ ข.7.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

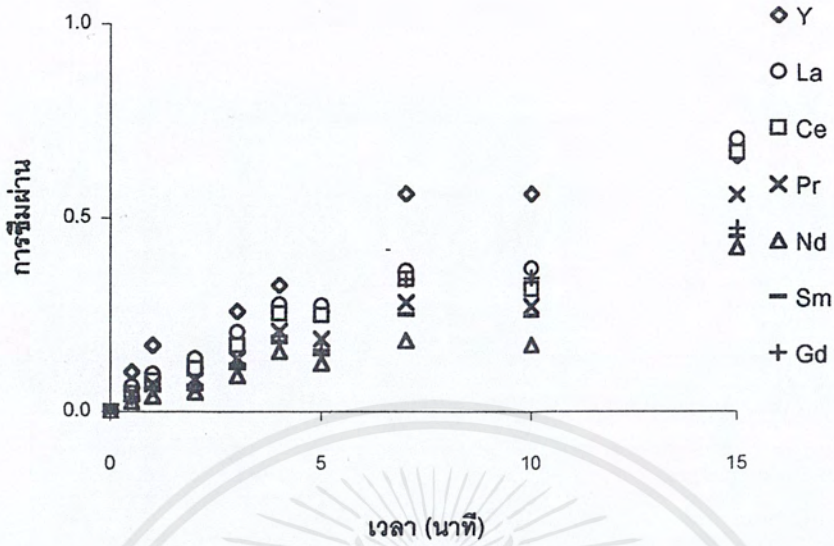
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



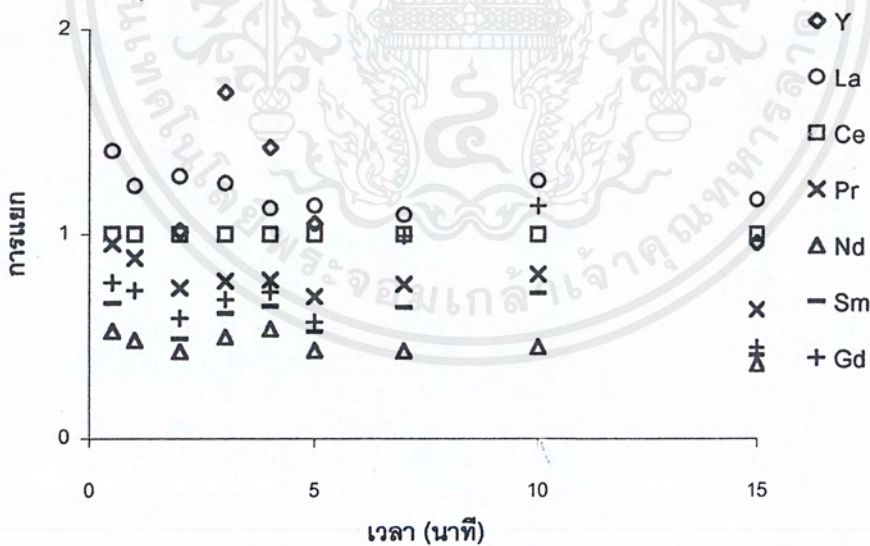
รูปที่ ข.8.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.0



รูปที่ ข.8.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.0

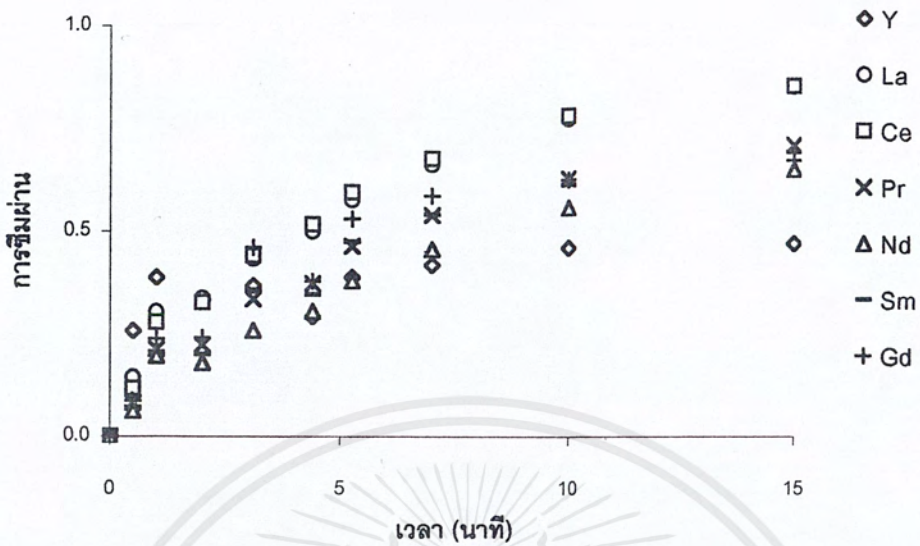


รูปที่ ข.9.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.5

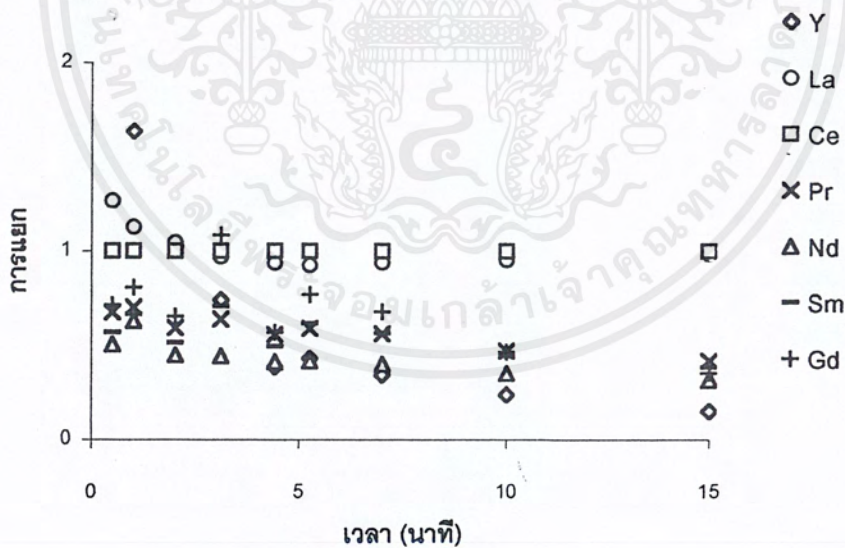


รูปที่ ข.9.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 1.5

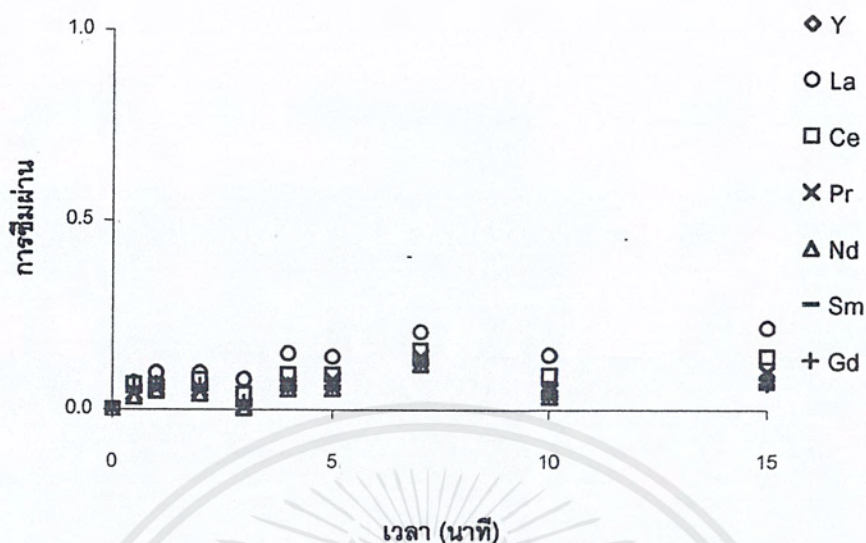
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



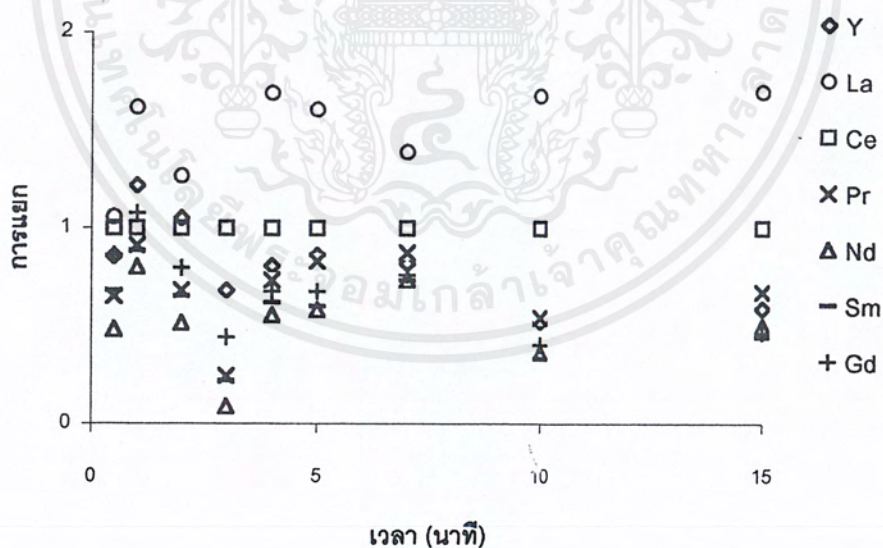
รูปที่ ข.10.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0



รูปที่ ข.10.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.0

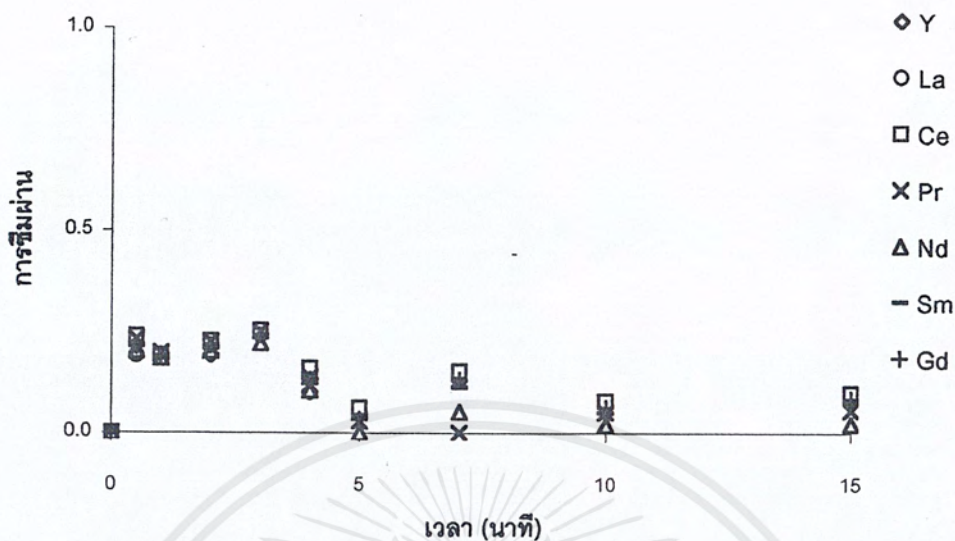


รูปที่ ข.11.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.5

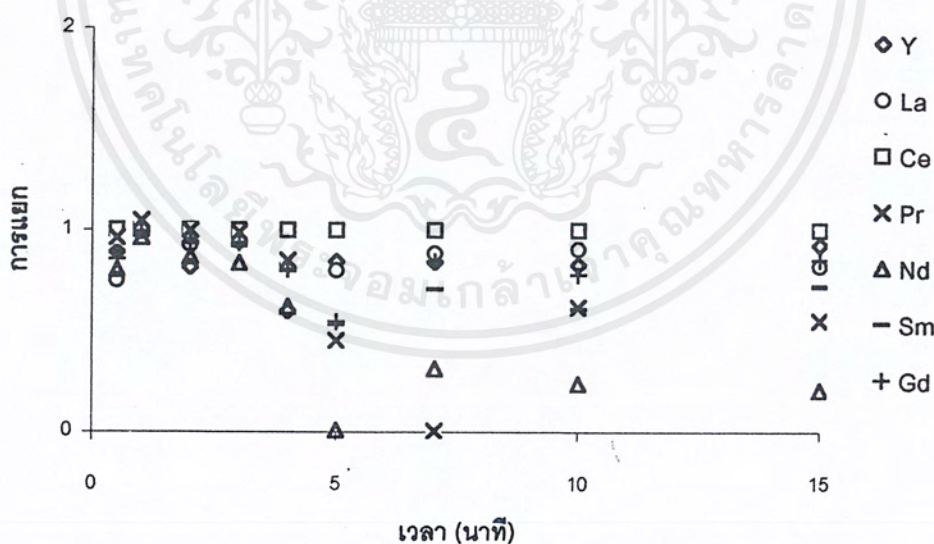


รูปที่ ข.11.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 2.5

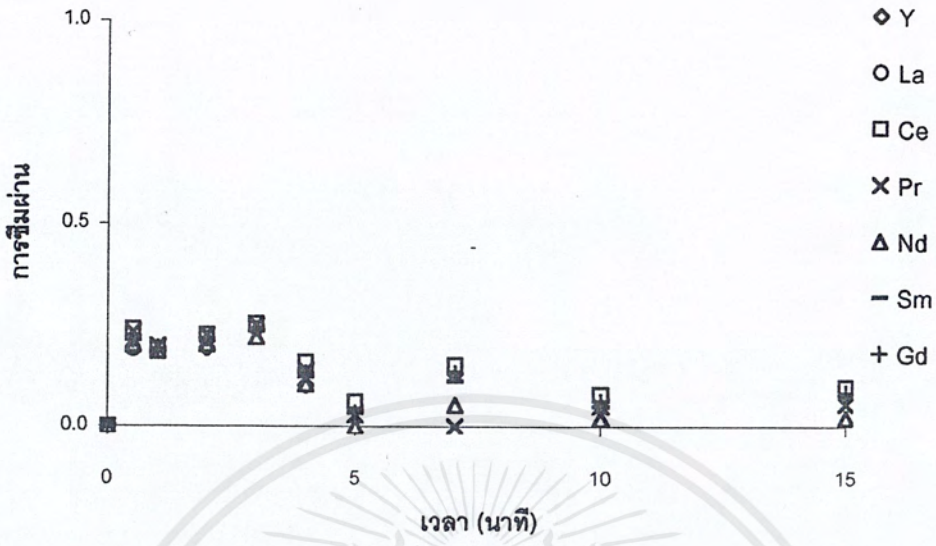
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



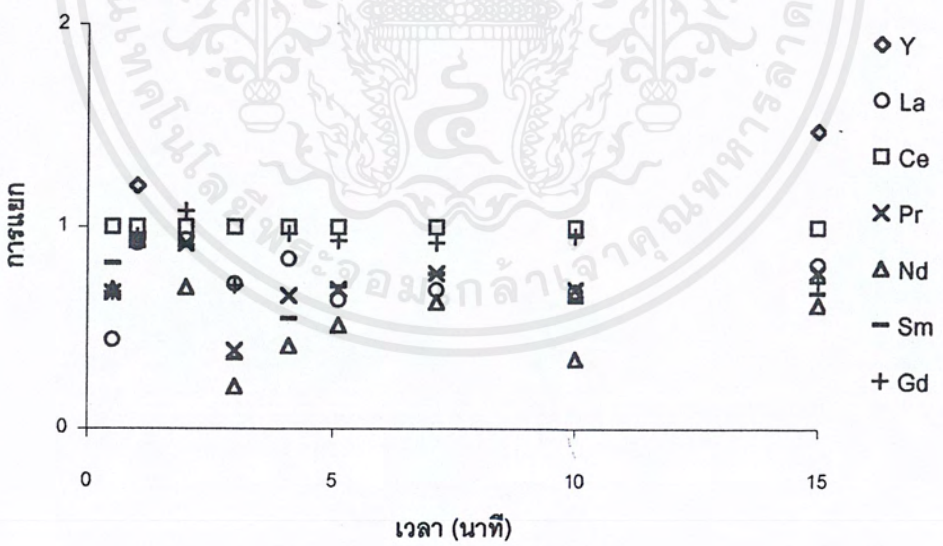
รูปที่ ข.12.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 3.5



รูปที่ ข.12.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 3.5

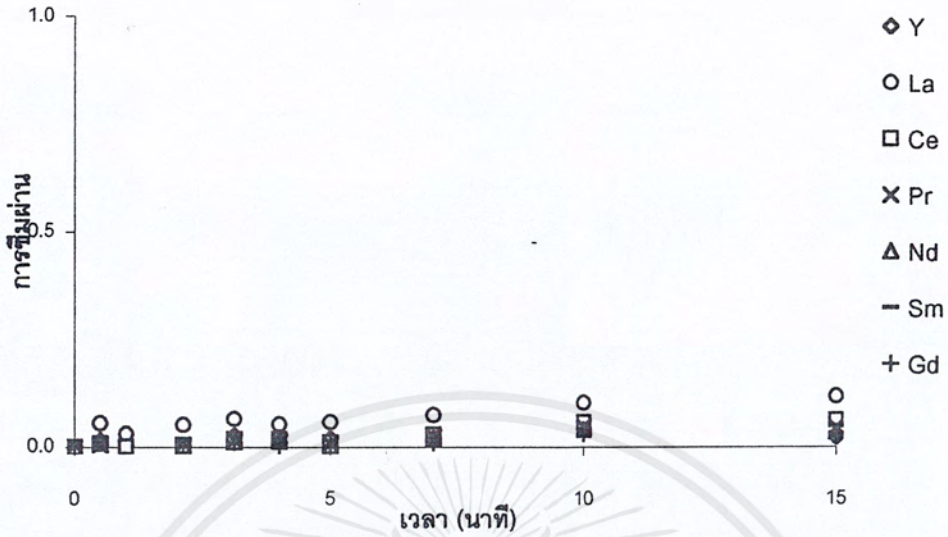


รูปที่ ข.13.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 5.0

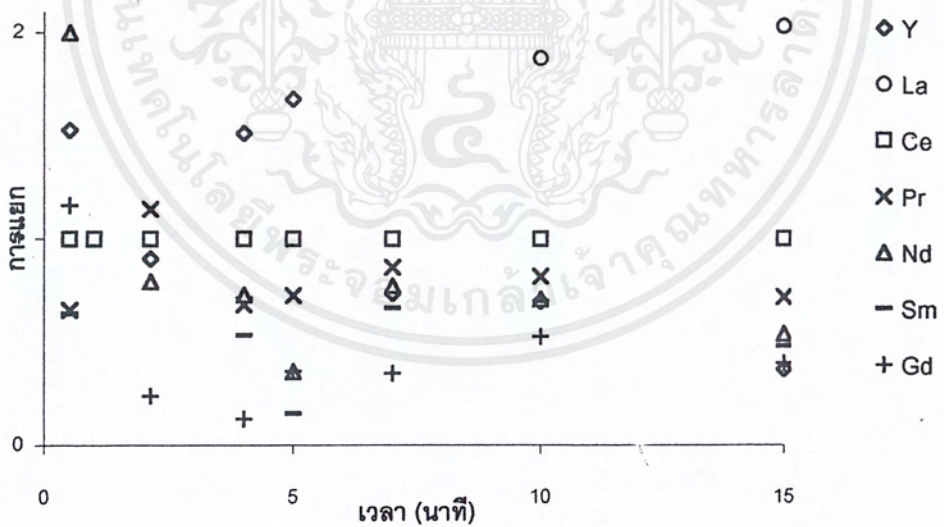


รูปที่ ข.13.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 100 ppm พีเอช 5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

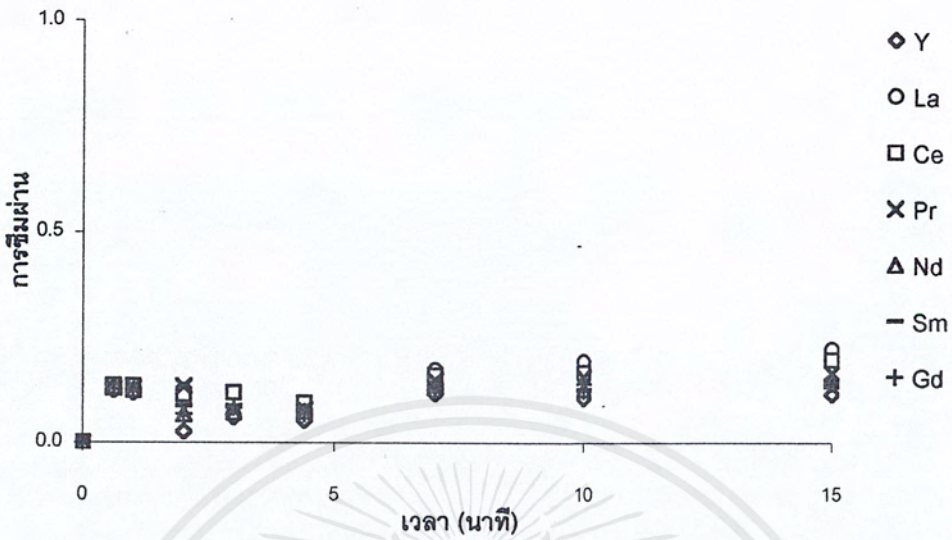


รูปที่ ข.14.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0

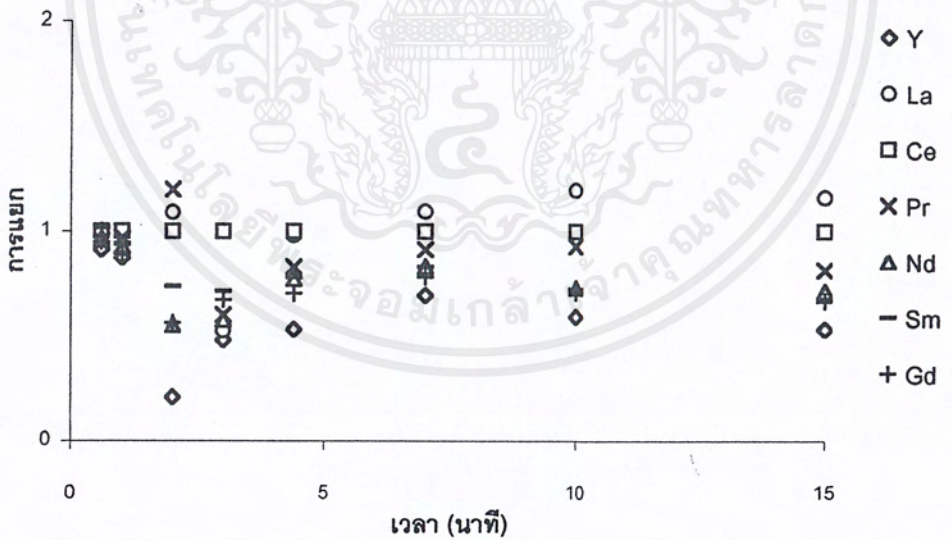


รูปที่ ข.14.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

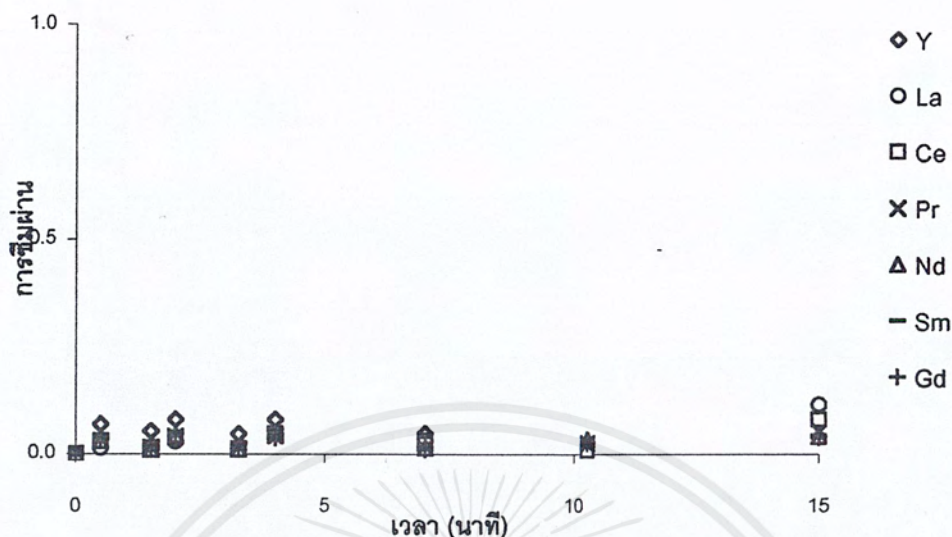


รูปที่ ข.15.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.0

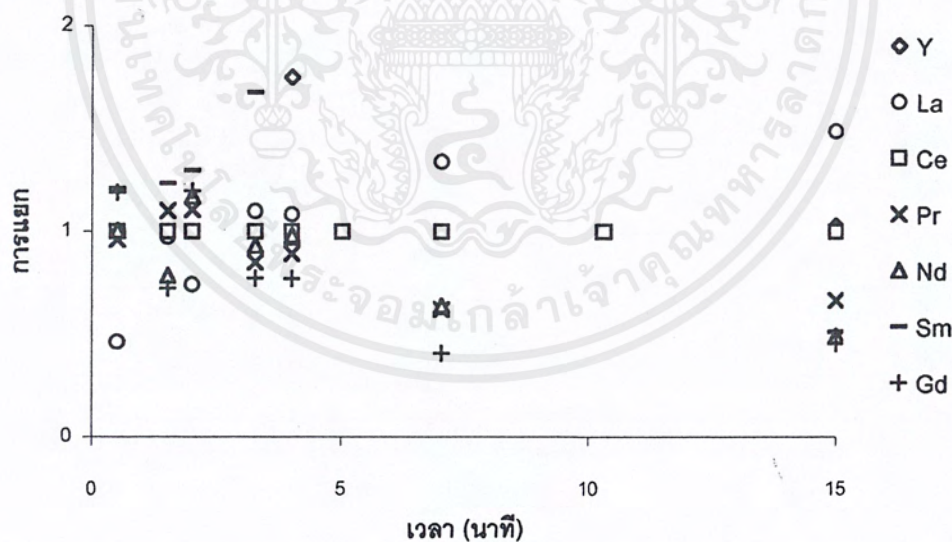


รูปที่ ข.15.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

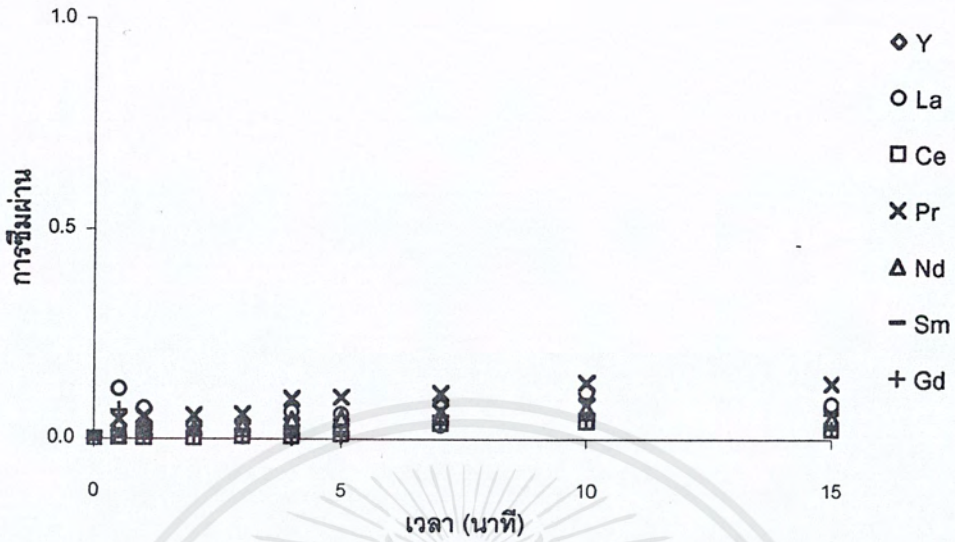


รูปที่ ข.16.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.5

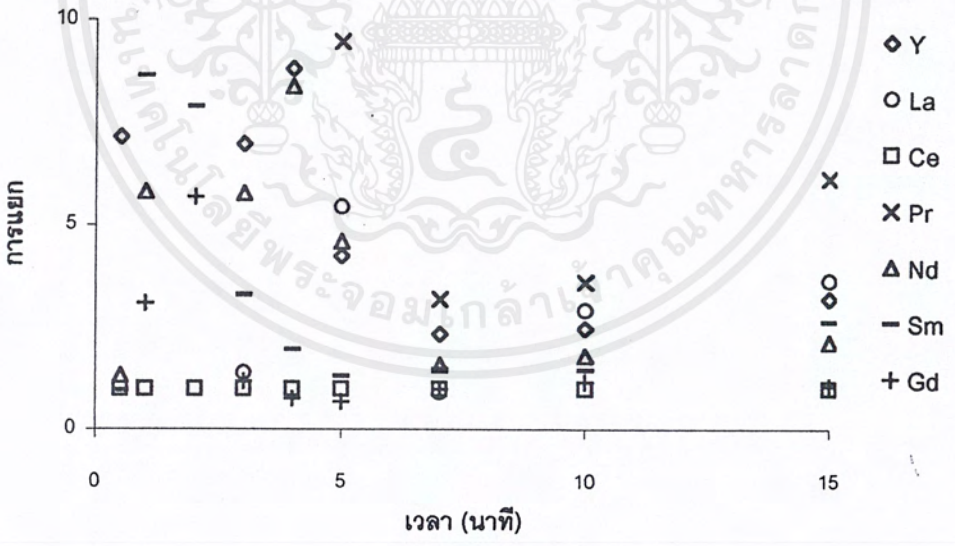


รูปที่ ข.16.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

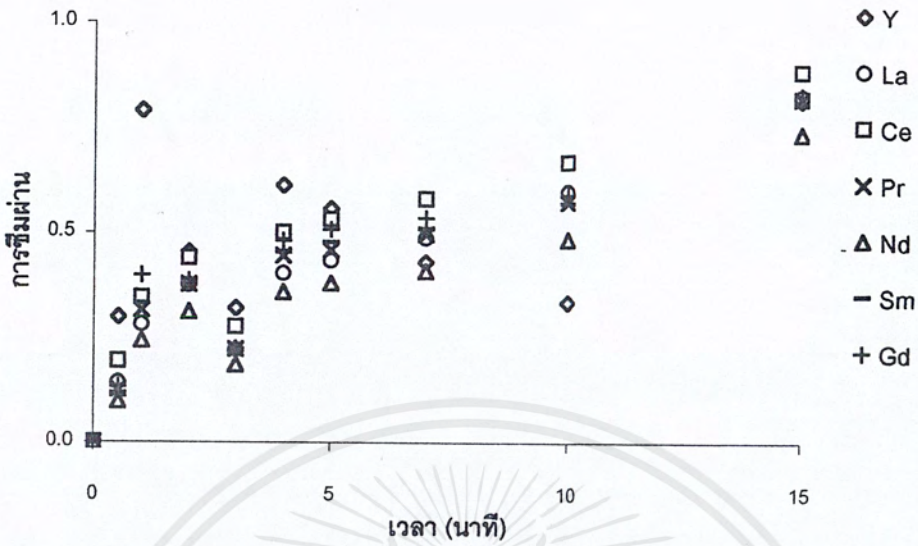


รูปที่ ข.17.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 5.0

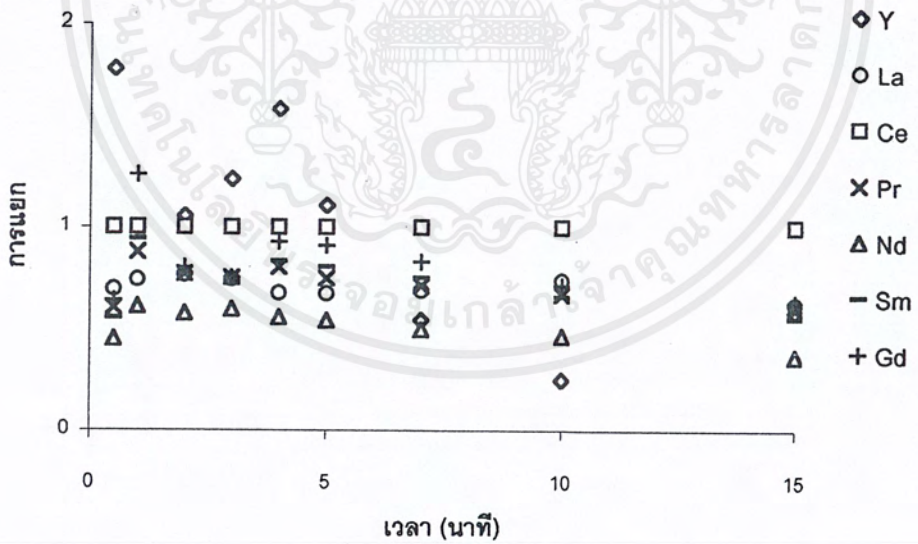


รูปที่ ข.17.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายากทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 5.0

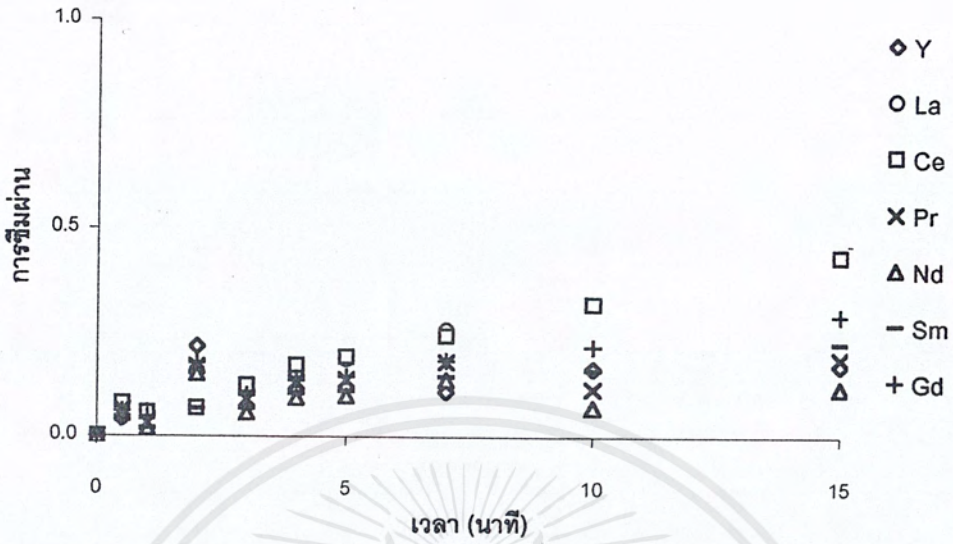
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



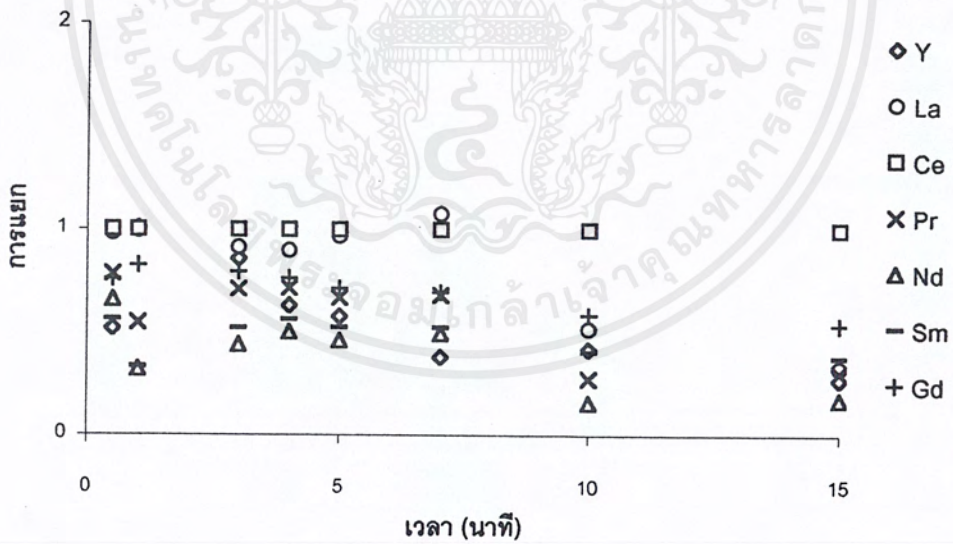
รูปที่ ข.18.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0



รูปที่ ข.18.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0

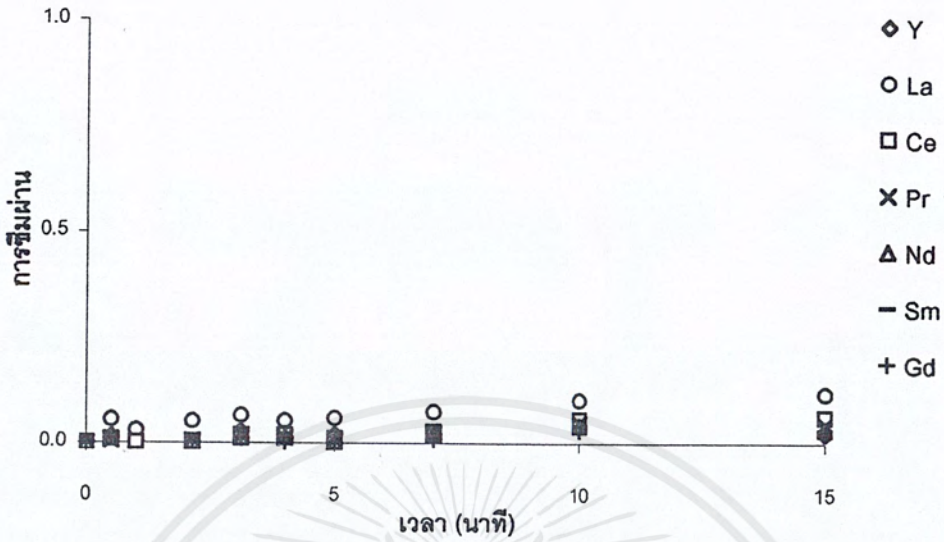


รูปที่ ข.19.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0

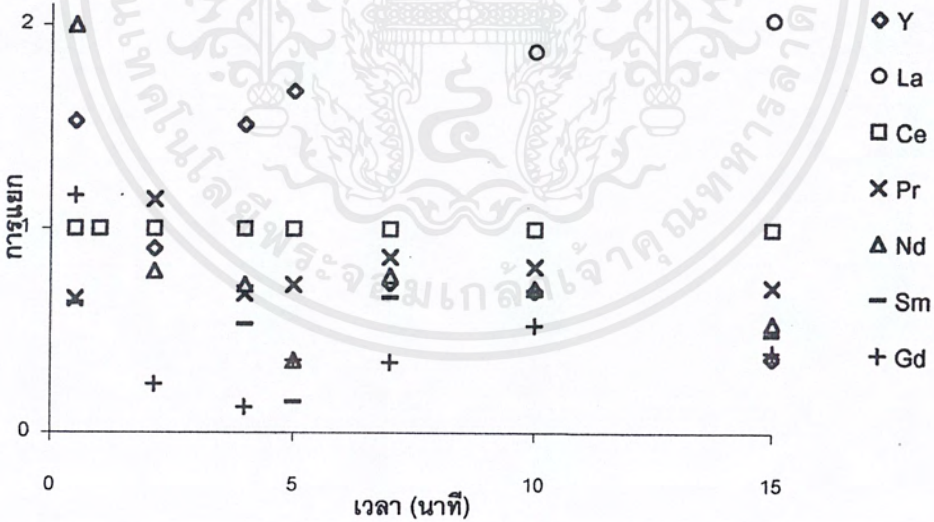


รูปที่ ข.19.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.20.1 การซึมผ่านของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0

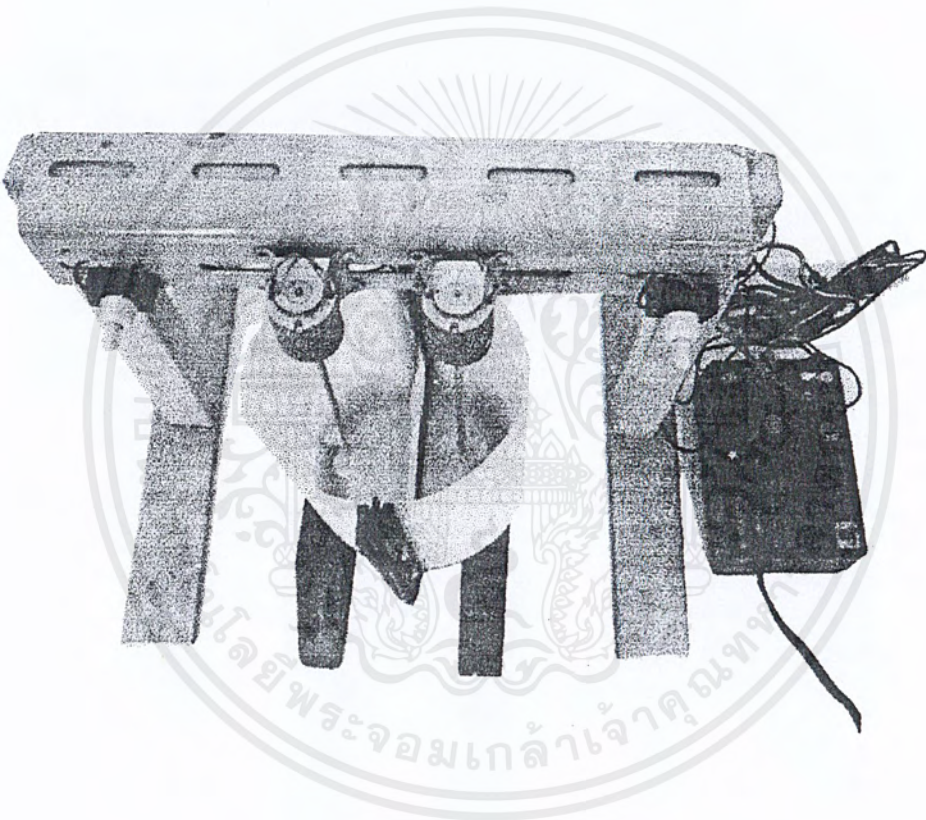


รูปที่ ข.20.2 การแยกของธาตุหายาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของ EDTA ต่อธาตุหายาก ทั้งหมดเป็น 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุหายาก 1000 ppm พีเอช 2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ชุดอุปกรณ์การทดลอง

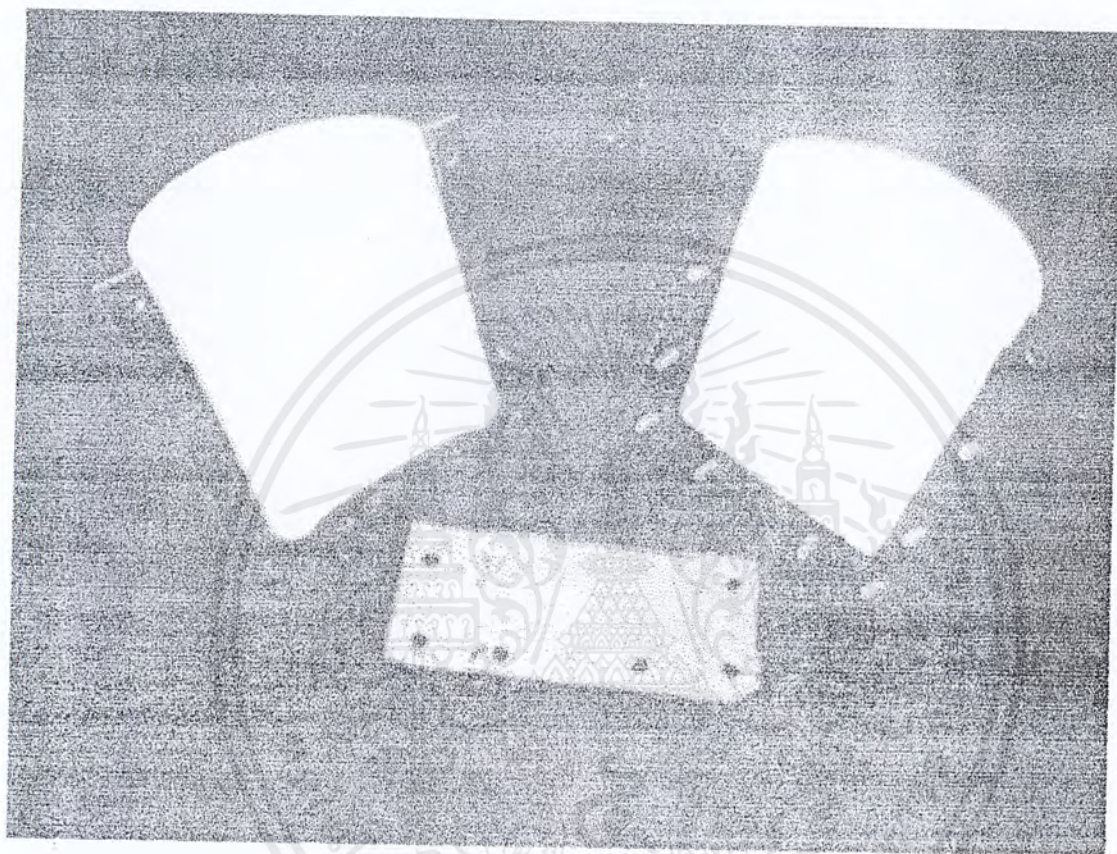


รูปที่ ค.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

แสดงภาพมุมบนของอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

- ถังกวน
- เส้นใยแบบแผ่น
- โบพัด 2 ใบ
- โครงยึด
- อุปกรณ์ต่อไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 ถังกวนและเส้นใยแบบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ขนาดไอออนของธาตุหายาก

ตารางที่ ง.1 ขนาดไอออนของธาตุหายาก

สัญลักษณ์ธาตุ	เลขอะตอม	ขนาดไอออน ($^{\circ}\text{A}$)
Y	39	0.901
La	57	1.032
Ce	58	1.010
Pr	59	0.990
Nd	60	0.983
Sm	62	0.958
Gd	64	0.938

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้