

การศึกษาการสกัดธาตุหายากจากแรมโนนาไซต์ ด้วยหอสกัด
แบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่มีการป้อนกลับ




นางสาวนันทิดา ชรรมานวัตร
นางสาวพรนิภา สุนทรเวชพงษ์
นายอาทิตย์ อรัญสมาน

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42389
วัน, เดือน, ปี 20 พ.ค. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

**A STUDY OF RARE EARTHS EXTRACTION FROM MONAZITE
USING PULSED PERFORATED PLATE COLUMN WITH REFLUX**



**MISS NANTIDA THAMANAVAT
MISS PORNNIPA SOONTORNWECHAPONG
MR. AHSIT ARANSAMARN**

**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่ให้การสนับสนุนปริญญาบัตรนี้

คุณอารีรักษ์ คำน้อย และคุณศุภชัย แซ่เซี่ยง ข้าราชการสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่ให้คำปรึกษาในการทำโครงการพิเศษนี้มาตลอด

เจ้าหน้าที่และข้าราชการทุกท่านของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ที่อำนวยความสะดวกในระหว่างการทำโครงการพิเศษนี้

ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรม – ศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในระหว่างการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์ และอาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา คุณสุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขโครงการ ทำให้โครงการฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาการสัปดาห์ธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ ด้วยหอสกัด
แบบหอสกัดแบบฟลัสเซอร์ฟอเรนเพลทที่มีการป้อนกลับ
โดย นางสาวนันทิศา ธรรมานวัตร
นางสาวพรนิกา สุนทรเวชพงษ์
นายอาศิษฐ์ อรัญสมาน
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คุณสุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข¹

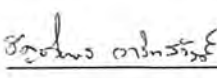
1. นักนิเวศเคมี 7 วช. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์


ประธานกรรมการ
(อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)


กรรมการ
(คุณสุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข)


กรรมการ
(ผศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)


กรรมการ
(ผศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาการสัปดาห์ธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ด้วยหอสกัด
แบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่มีการป้อนกลับ

โดย นางสาวนันทิศา ชรรมานวัตร
นางสาวพรนิภา สุนทรเวชพงษ์
นายอาศิษฐ์ อรัญสมาน

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คุณสุรศักดิ์ พงษ์พันธุ์สุข¹

1. นักนิเวศเคมี 7 วช. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในโครงงานนี้ได้ศึกษาการสัปดาห์ธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลวที่มีการป้อนกลับ โดยสารป้อนและสารป้อนกลับที่ใช้ คือ สารละลายแเรเอิร์ทในกรดซึ่งเป็นเฟสน้ำ สารสกัดที่ใช้ คือ 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดที่อิ่มตัวด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 5 โมลาร์ซึ่งเป็นเฟสน้ำมัน จากผลการทดลองเมื่อใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะพบว่า การสกัดแบบมีการป้อนกลับจะทำให้ธาตุหายากกลุ่มเบาแยกออกจากธาตุหายากกลุ่มหนักได้ดีกว่าการสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ โดยสภาวะที่ทำให้เกิดการแยกกลุ่มได้ดี คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของส่วนสกัดต่อส่วนคงเหลือเท่ากับ 2:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารป้อนกลับต่อสารป้อนเท่ากับ 0.33:1 นอกจากนี้ยังศึกษาการสกัดในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.3 เซนติเมตร สูง 343 เซนติเมตร โดยใช้เฟสน้ำเป็นเฟสต่อเนื่องและเฟสน้ำมันเป็นเฟสกระจาย พบว่าเมื่ออัตราการไหลของส่วนสกัดต่อส่วนคงเหลือเท่ากับ 14.4:7.2 ลิตรต่อชั่วโมง และสารป้อนกลับต่อสารป้อนเท่ากับ 1.8:5.4 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้เกิดการแยก

ของธาตุหายากกลุ่มหนักออกจากธาตุหายากกลุ่มเบาได้ดีกว่าการสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับเมื่อใช้
อัตราการใช้ของส่วนสกัดต่อส่วนผงเหลือเท่ากับ 8:8 ลิตรต่อชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title A Study of Rare Earths Extraction from Monazite
 Using Pulsed Perforated Plate Column with Reflux

By Miss Nantida Thamanavat
 Miss Pornnipa Soontornwechapong
 Mr. Arsit Aransamarn

Advisor Mr. Kriangsak Kraiwattanawong

Co-Advisor Mr. Surasak Pongpansook¹

1. Office of Atomic Energy for Peace

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

Abstract

This project studies the extraction of rare earths from monazite by liquid-liquid extraction with reflux. The feed and reflux were prepared as aqueous phase in the form of rare earth nitrate solution. The extractant was 50% tributyl phosphate in kerosene saturated with 5 M nitric acid as the organic phase. From the batch simulation results, the extraction of heavy rare earths from light rare earths with reflux is better than that without reflux. The ratios by volume of extract to raffinate and reflux to feed which provided good separation of rare earths are 2:1 and 0.33:1, respectively. Further experiments with aqueous continuous phase and organic dispersed phase were carried out in the pulsed perforated plate column with 3.3 cm inside diameter and 343 cm height. It was found that the extraction with the flow rates of extract to raffinate and reflux to feed of about 14.4:7.2 l/h and 1.8:5.4 l/h, respectively had better separation of heavy

rare earths from light rare earths than that without reflux with the flow rate of extract to raffinate of about 8:8 L/h.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ฉ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ช |
| สารบัญ | ฌ |
| สารบัญตาราง | ฎ |
| สารบัญภาพ | ฒ |
| สัญลักษณ์ | ถ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์..... | 2 |
| 1.2 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ | 2 |
| 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ธาตุหายาก | 3 |
| 2.1 นิยามของธาตุหายาก..... | 3 |
| 2.2 แหล่งที่พบ | 5 |
| 2.3 แร่โมนาไซต์ในประเทศไทย..... | 5 |
| 2.4 การใช้ประโยชน์จากธาตุหายาก..... | 7 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีการสกัด | 11 |
| 3.1 การสกัดของเหลวด้วยของเหลว | 11 |
| 3.2 การเลือกตัวทำละลาย..... | 13 |
| 3.3 การป้อนกลับ | 16 |
| 3.4 ประสิทธิภาพการสกัด | 18 |
| 3.5 ประโยชน์ของกระบวนการสกัด..... | 18 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 4 เครื่องสกัดของเหลวด้วยของเหลว | 20 |
| 4.1 การเลือกเครื่องมือในการสกัด | 20 |
| 4.2 ประเภทของเครื่องสกัด..... | 22 |
| 4.3 ตัวอย่างบางส่วนของเครื่องสกัดที่ใช้ในอุตสาหกรรม | 24 |
| 4.4 ชุดหอสกัดแบบพัลส์สำหรับสกัดเรเออร์ท์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์ | 35 |
| บทที่ 5 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแบบจำลองการสกัดแบบกะ | 37 |
| 5.1 ความรู้พื้นฐานของแบบจำลองการสกัดแบบกะ..... | 37 |
| 5.2 แบบจำลองการสกัดแบบกะสำหรับกระบวนการสกัด แบบต่อเนื่องและไหลสวนทางกัน | 38 |
| 5.3 การสกัดแบบแบ่งส่วน | 41 |
| บทที่ 6 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการสกัด | 43 |
| 6.1 สภาวะการทำงานของหอสกัดแบบพัลส์..... | 43 |
| 6.2 การเปียกตัว | 45 |
| 6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดสารละลายเรเออร์ท์ในเทรตด้วย สารละลายไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าด | 46 |
| บทที่ 7 การดำเนินการทดลอง | 52 |
| 7.1 การสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ..... | 52 |
| 7.2 การสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท..... | 58 |
| บทที่ 8 ผลการทดลอง | 61 |
| 8.1 ผลการทดลองการสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ | 61 |
| 8.2 ข้อมูลสมมูลของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลอง การสกัดแบบกะ | 76 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----|
| 8.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายาก | |
| ในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท | 87 |
| บทที่ 9 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 93 |
| 9.1 สรุปผลการทดลอง..... | 93 |
| 9.2 ข้อเสนอแนะ | 93 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 95 |
| ภาคผนวก | 97 |
| ภาคผนวก ก ตารางธาตุ | 98 |
| ภาคผนวก ข ไตรบิวทิลฟอสเฟต (Tri-n-butylphosphate หรือ TBP)..... | 99 |
| ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลองการสกัดธาตุหายาก | |
| โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ..... | 102 |
| ภาคผนวก ง ข้อมูลสมมูลของธาตุหายากที่ได้จากการทดลองการสกัดธาตุหายาก | |
| โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ..... | 113 |
| ภาคผนวก จ ข้อมูลสถานะที่ใช้ในการทดลองการสกัดธาตุหายากใน | |
| หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท..... | 133 |
| ภาคผนวก ฉ ข้อมูลผลการทดลองการสกัดธาตุหายากโดยใช้ | |
| หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท..... | 137 |
| ภาคผนวก ช การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือก | |
| ของธาตุหายาก | 139 |
| ภาคผนวก ซ การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัด | |
| เมื่อเทียบกับธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมดสำหรับการสกัด | |
| โดยใช้หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท..... | 145 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

| | |
|---|-----|
| ตารางที่ 2.1 ธาตุหายากและคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ..... | 4 |
| ตารางที่ 7.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการทดลอง | 55 |
| ตารางที่ ค.1 ความถ่วงจำเพาะและความเข้มข้นของสารป้อนและสารป้อนกลับ ที่ใช้ในการทดลอง | 102 |
| ตารางที่ ค.2 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 1:1 สารป้อน:สารป้อนกลับ = 0:1..... | 103 |
| ตารางที่ ค.3 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 1:1 สารป้อน:สารป้อนกลับ = 0.33:1..... | 103 |
| ตารางที่ ค.4 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 1:1 สารป้อน:สารป้อนกลับ = 0.5:1..... | 104 |
| ตารางที่ ค.5 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 1:1 สารป้อน:สารป้อนกลับ = 1:1..... | 104 |
| ตารางที่ ค.6 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 สารป้อน:สารป้อนกลับ = 0:1..... | 105 |
| ตารางที่ ค.7 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 สารป้อน:สารป้อนกลับ = 0.33:1..... | 105 |
| ตารางที่ ค.8 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 สารป้อน:สารป้อนกลับ = 0.5:1..... | 106 |
| ตารางที่ ค.9 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 สารป้อน:สารป้อนกลับ = 1:1..... | 106 |
| ตารางที่ ง.1 ข้อมูลสมมูลของ La | 113 |
| ตารางที่ ง.2 ข้อมูลสมมูลของ Ce..... | 115 |
| ตารางที่ ง.3 ข้อมูลสมมูลของ Pr..... | 117 |
| ตารางที่ ง.4 ข้อมูลสมมูลของ Nd..... | 119 |
| ตารางที่ ง.5 ข้อมูลสมมูลของ Sm | 121 |
| ตารางที่ ง.6 ข้อมูลสมมูลของ Eu..... | 123 |
| ตารางที่ ง.7 ข้อมูลสมมูลของ Gd..... | 125 |
| ตารางที่ ง.8 ข้อมูลสมมูลของ Dy..... | 127 |
| ตารางที่ ง.9 ข้อมูลสมมูลของ Yb..... | 129 |
| ตารางที่ ง.10 ข้อมูลสมมูลของ Y..... | 131 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ จ.1 ข้อมูลสภาวะสำหรับการสกัดในหอสกัดที่ไม่มีการป้อนกลับ | 133 |
| ตารางที่ จ.2 ข้อมูลสภาวะสำหรับการสกัดในหอสกัดที่มีการป้อนกลับ | 135 |
| ตารางที่ ฉ.1 ความเข้มข้นของสารป้อนที่ใช้ในการทดลองในการสกัด แบบไม่มีการป้อนกลับ | 137 |
| ตารางที่ ฉ.2 ความเข้มข้นของธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัดใน การทดลองสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ ที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที | 137 |
| ตารางที่ ฉ.3 ความเข้มข้นของสารป้อนและสารป้อนกลับที่ใช้ในการทดลอง ในการสกัดแบบที่มีการป้อนกลับ | 138 |
| ตารางที่ ฉ.4 ความเข้มข้นของธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัดใน การทดลองสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบที่มีการป้อนกลับ ที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที | 138 |
| ตารางที่ ช.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากที่ได้จากการทดลอง การสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ | 140 |
| ตารางที่ ช.2 ค่าการเลือกของธาตุหายากที่ได้จากการทดลองการสกัดโดยใช้ แบบจำลองการสกัดแบบกะ | 141 |
| ตารางที่ ช.3 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากที่ได้จากการสกัด โดยใช้หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอร์เมตเพลท | 142 |
| ตารางที่ ช.4 ค่าการเลือกของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้หอสกัด แบบพัลส์เพอร์ฟอร์เมตเพลท | 142 |
| ตารางที่ ซ.1 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัด เมื่อเทียบกับธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมดสำหรับการสกัด ในหอสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ | 145 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----|
| ตารางที่ ๕.2 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัด เมื่อเทียบกับธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมดสำหรับการสกัด ในหอสกัดแบบที่มีการป้อนกลับ..... | 146 |
|--|-----|



สารบัญภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 ลักษณะผลึกของแร่โมนาไซต์ | 5 |
| รูปที่ 3.1 การสกัดของเหลวด้วยของเหลวหรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย..... | 12 |
| รูปที่ 3.2 การสกัดของเหลวด้วยของเหลวแบบมีการป้อนกลับ | 17 |
| รูปที่ 4.1 หลักการในการเลือกเครื่องมือสกัดของเหลวด้วยของเหลว..... | 21 |
| รูปที่ 4.2 เครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซทเทลอร์ | 25 |
| รูปที่ 4.3 เครื่องสกัดแบบแรงหนีศูนย์กลาง | 26 |
| รูปที่ 4.4 เครื่องสกัดโดยใช้ไฟฟ้าสถิตย์..... | 27 |
| รูปที่ 4.5 หอสกัดแบบแพค..... | 29 |
| รูปที่ 4.6 หอสกัดแบบแกนกลางหมุน | 30 |
| รูปที่ 4.7 หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท..... | 34 |
| รูปที่ 5.1 แบบจำลองการสกัดแบบกะสำหรับกระบวนการสกัด แบบต่อเนื่องและไหลสวนทางกัน | 40 |
| รูปที่ 5.2 แบบจำลองการสกัดแบบกะประเภทการสกัดแบ่งส่วน | 42 |
| รูปที่ 6.1 ลักษณะการทำงานในภาวะต่าง ๆ ของหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท | 43 |
| รูปที่ 6.2 ลักษณะของ Droplet pattern ในภาวะการทำงานต่าง ๆ..... | 45 |
| รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไนตริกในเฟสน้ำกับเฟสน้ำมัน | 48 |
| รูปที่ 7.1 แบบจำลองการสกัดแบบกะที่ไม่มีมีการป้อนกลับ | 54 |
| รูปที่ 7.2 แบบจำลองการสกัดแบบกะที่มีการป้อนกลับ..... | 57 |
| รูปที่ 8.1 แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากที่ได้จาก การสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ | 63 |
| รูปที่ 8.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ La ที่ได้จากการสกัด โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ..... | 64 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 8.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Pr ที่ได้จากการสกัด
โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ.....65

รูปที่ 8.4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Nd ที่ได้จากการสกัด
โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ.....66

รูปที่ 8.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Sm ที่ได้จากการสกัด
โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ.....67

รูปที่ 8.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Gd ที่ได้จากการสกัด
โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ.....68

รูปที่ 8.7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Y ที่ได้จากการสกัด
โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ.....69

รูปที่ 8.8 แนวโน้มของค่าการเลือกของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้
แบบจำลองการสกัดแบบกะ70

รูปที่ 8.9 เปรียบเทียบค่าการเลือกของ Pr ที่ได้จากการสกัดโดยใช้
แบบจำลองการสกัดแบบกะ71

รูปที่ 8.10 เปรียบเทียบค่าการเลือกของ Nd ที่ได้จากการสกัดโดยใช้
แบบจำลองการสกัดแบบกะ72

รูปที่ 8.11 เปรียบเทียบค่าการเลือกของ Sm ที่ได้จากการสกัดโดยใช้
แบบจำลองการสกัดแบบกะ73

รูปที่ 8.12 เปรียบเทียบค่าการเลือกของ Gd ที่ได้จากการสกัดโดยใช้
แบบจำลองการสกัดแบบกะ74

รูปที่ 8.13 เปรียบเทียบค่าการเลือกของ Y ที่ได้จากการสกัดโดยใช้
แบบจำลองการสกัดแบบกะ75

รูปที่ 8.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $x_{i,n}$ กับ $y_{i,n}$ ณ สภาวะสมดุล.....77

สารบัญภาพ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 8.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Ce} กับ y_{Ce} ณ สภาวะสมดุล..... | 78 |
| รูปที่ 8.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Pr} กับ y_{Pr} ณ สภาวะสมดุล..... | 79 |
| รูปที่ 8.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Nd} กับ y_{Nd} ณ สภาวะสมดุล..... | 80 |
| รูปที่ 8.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Sm} กับ y_{Nd} ณ สภาวะสมดุล..... | 81 |
| รูปที่ 8.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Eu} กับ y_{Eu} ณ สภาวะสมดุล..... | 82 |
| รูปที่ 8.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Gd} กับ y_{Gd} ณ สภาวะสมดุล..... | 83 |
| รูปที่ 8.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Dy} กับ y_{Dy} ณ สภาวะสมดุล..... | 84 |
| รูปที่ 8.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Yb} กับ y_{Yb} ณ สภาวะสมดุล..... | 85 |
| รูปที่ 8.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_Y กับ y_Y ณ สภาวะสมดุล..... | 86 |
| รูปที่ 8.24 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบพลัสเทอร์ฟอเรตเพลท..... | 89 |
| รูปที่ 8.25 เปรียบเทียบค่าการเลือกของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบพลัสเทอร์ฟอเรตเพลท..... | 90 |
| รูปที่ 8.26 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากที่เหลืออยู่ในส่วนคงเหลือเมื่อเทียบกับปริมาณธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมด..... | 91 |
| รูปที่ 8.27 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากที่ถูกสกัดเข้าไปยังส่วนสกัดเมื่อเทียบกับปริมาณธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมด..... | 92 |
| รูปที่ ก.1 ตารางธาตุ..... | 98 |
| รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับ % TBP ในน้ำมันก๊าด..... | 101 |
| รูปที่ ค.1 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ La ในส่วนคงเหลือจากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ..... | 107 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ ค.2 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ Pr ในส่วนคงเหลือจากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ..... | 108 |
| รูปที่ ค.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ Nd ในส่วนคงเหลือจากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ..... | 109 |
| รูปที่ ค.4 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ Sm ในส่วนคงเหลือจากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ..... | 110 |
| รูปที่ ค.5 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ Gd ในส่วนคงเหลือจากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ..... | 111 |
| รูปที่ ค.6 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ Y ในส่วนคงเหลือจากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ..... | 112 |
| รูปที่ จ.1 ข้อมูลจำเพาะของหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอร์เมตเพลทแบบ ไม่มีการป้อนกลับที่ใช้ในการทดลอง | 134 |
| รูปที่ จ.2 ข้อมูลจำเพาะของหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอร์เมตเพลทแบบ มีการป้อนกลับที่ใช้ในการทดลอง..... | 136 |

สัญลักษณ์

| | |
|----|--|
| E | ตัวทำละลาย สารสกัด ส่วนสกัด |
| F | สารป้อน |
| k | สัมประสิทธิ์การกระจาย |
| R | ส่วนคงเหลือ |
| Re | สารป้อนกลับ |
| x | ความเข้มข้นของแรเอิร์ทในเฟสน้ำหรือส่วนคงเหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |
| y | ความเข้มข้นของแรเอิร์ทในเฟสน้ำมัน (มิลลิกรัม/ลิตร) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ธาตุหายากเป็นธาตุที่มีมูลค่าสูงและมีคุณค่ามาก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน ธาตุเหล่านี้จะอยู่รวมกันในสินแร่ต่าง ๆ โดยสินแร่ที่พบธาตุหายากในปริมาณมาก ได้แก่ แร่โมนาไซต์ (Monazite) แร่บาสเนไซต์ (Basnesite) และแร่ซีโนไทม์ (Xenotime)

ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (พปส.) กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ได้นำแร่โมนาไซต์ที่ได้จากเหมืองแร่ดิบูกทางภาคใต้ของประเทศไทย มาแปรสภาพและแยกธาตุวัตควินิวเคลียร์ ได้แก่ ยูเรเนียมและทอเรียมออก กากแร่ที่เหลือจะเป็นธาตุหายากที่มีปริมาณมากพอที่จะสกัดได้ โดยธาตุหายากที่พบมีทั้งธาตุหายากกลุ่มเบาและธาตุหายากกลุ่มหนัก เนื่องจากธาตุหายากมีถึง 15 ธาตุ จึงจำเป็นต้องทำการสกัดแยกธาตุหายากออกจากกัน และวิธีที่นิยมใช้ คือ การสกัดของเหลวด้วยของเหลว

กระบวนการสกัดด้วยของเหลว เป็นกระบวนการแยกสารซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย โดยอาศัยความสามารถในการละลายที่ไม่เท่ากันของตัวถูกละลายในตัวทำละลายสองชนิด ในกระบวนการสกัดจะใช้ตัวทำละลายชนิดหนึ่งเป็นตัวสกัด (Extractant) แยกเอาสารที่ต้องการแยกออกจากตัวทำละลายอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นสารป้อน (Feed) โดยที่ตัวทำละลายสองชนิดจะไม่ละลายซึ่งกันและกันหรือละลายได้น้อยมาก ทำให้ภายหลังการสกัดเกิดการแยกชั้นของของเหลวออกเป็นสองเฟส และตัวถูกละลายส่วนใหญ่จะเกิดการถ่ายเทมวลข้ามเฟสไปยังตัวสกัด

โครงการนี้เป็นการศึกษาขั้นตอนของการสกัดธาตุหายากออกจากแร่โมนาไซต์ โดยใช้วิธีการสกัดด้วยของเหลว และใช้หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท สำหรับธาตุหายากที่นำมาสกัดนั้น เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม IIIB ของตารางธาตุ โดยทั่วไป ธาตุหายากจึงมีเวเลนซ์เท่ากับ 3 โดยธาตุซีเรียม (มีเวเลนซ์เท่ากับ 3 หรือ 4) สามารถสกัดออกก่อนได้โดยวิธีการตกตะกอนที่ pH ที่เหมาะสม

1.1 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

- 1) ศึกษาผลของการป้อนกลับต่อประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายาก โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ
- 2) ศึกษาผลของการป้อนกลับต่อประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายาก โดยใช้หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอร์เมตเพลทที่มีการป้อนกลับ

1.2 ขอบเขตของปริญญาโท

- 1) ศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายาก โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะที่ไม่มีการป้อนกลับ
- 2) ศึกษาผลของการป้อนกลับต่อประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายาก โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ
- 3) ศึกษาหาอัตราส่วนของสารป้อน สารสกัด และสารป้อนกลับที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ
- 4) ศึกษาหาข้อมูลสมมูลสำหรับระบบการสกัดธาตุหายาก
- 5) ศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอร์เมตเพลทที่ไม่มีการป้อนกลับ
- 6) ศึกษาผลของการป้อนกลับต่อประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอร์เมตเพลทที่มีการป้อนกลับ โดยใช้อัตราส่วนของสารป้อน สารสกัด และสารป้อนกลับที่เหมาะสม ที่ได้จากการศึกษาการสกัด โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาและทดลองไปพัฒนางานสกัดธาตุหายากต่อไป
- 2) นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการสกัดธาตุหายากที่ใช้สารละลายแอมิโนในเทรตเป็นสารป้อน และใช้สารละลาย 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดเป็นตัวทำละลาย ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมหรือระดับงานวิจัยต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ธาตุหายาก

2.1 นิยามของธาตุหายาก [1]

ธาตุหายาก หรือ Rare earth elements หรือ Rare earths โดยทั่วไปหมายถึงธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ (Lanthanides) ในบางครั้งจึงเรียกธาตุหายากว่า แลนทาไนด์ (Lanthanides) แลนทานอน (Lanthanons) หรือ แลนทานอยด์ (Lanthanoids) ชื่อของอนุกรมธาตุนี้มาจากชื่อของธาตุแรกของอนุกรม คือ ธาตุแลนทานัม ซึ่งอนุกรมธาตุนี้ประกอบด้วยธาตุ 15 ธาตุ เรียงลำดับกันตามเลขอะตอมตั้งแต่ 57 ถึง 71 โดยทั่วไป มักแบ่งธาตุหายากออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ ธาตุหายากกลุ่มเบา (Light rare earths) หรือกลุ่มซีเรียม หมายถึง ธาตุหายากที่มีเลขอะตอม 57 ถึง 63 (รวมทอเรียมที่มีเลขอะตอม 90) และธาตุหายากกลุ่มหนัก (Heavy rare earths) หรือกลุ่มอิตเทรียม หมายถึง ธาตุหายากที่มีเลขอะตอม 64 ถึง 71 (รวมทั้งสแกนเดียมและอิตเทรียมที่มีเลขอะตอม 21 และ 39 ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับธาตุหายากมาก จึงนับรวมไว้ในกลุ่มธาตุหายากด้วย) ดังตารางที่ 2.1

ในปัจจุบันพบว่า ธาตุหายากเป็นธาตุที่มีได้หายากแต่พบมากในธรรมชาติ เช่น ซีเรียม ซึ่งเป็นธาตุหายากที่มีมากที่สุดที่สุดในธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุหายากอื่น ๆ ธาตุหายากทุกชนิดมีสมบัติเป็นโลหะ ปกติมีเวเลนซีเท่ากับสาม แต่บางธาตุ ได้แก่ ซีเรียม สามารถมีเวเลนซีเท่ากับสี่ได้เมื่อถูกออกซิไดซ์ และบางธาตุสามารถมีเวเลนซีเท่ากับสองได้เมื่อถูกรีดิวซ์ ได้แก่ ยูโรเพียม อิตเทอร์เบียม และซาแมเรียม

ปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการแยกธาตุหายากต่าง ๆ ที่สำคัญที่มีการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ไอออนเอกซ์เชนจ์โครมาโทกราฟี (Ion-exchange chromatography) และการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction) โดยวิธีไอออนเอกซ์เชนจ์โครมาโทกราฟีเหมาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับการแยกธาตุหายากแต่ละธาตุออกจากกัน และสามารถแยกธาตุหายากที่มีเลขอะตอมติดกันได้ดีกว่าการใช้การสกัดของเหลวด้วยของเหลว หรือเหมาะสำหรับการแยกธาตุหายากให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น สำหรับวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลวเป็นวิธีที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสกัดธาตุหายาก เนื่องจากสามารถใช้สัปดาห์ที่มีความเข้มข้นสูงได้ และประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าการใช้วิธีไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโทกราฟีเมื่อต้องการแยกสารที่มีปริมาณมาก แต่ข้อเสียของวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว คือ ไม่เหมาะสมในการแยกธาตุหายากกลุ่มหนักที่มีเลขอะตอมติดกัน ดังนั้นโดยทั่วไปเมื่อต้องการแยกธาตุหายากแต่ละธาตุออกจากกัน ในขั้นแรกอาจทำการสกัดธาตุหายากด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลวก่อนเพื่อแยกธาตุหายากตัวที่ถูกสกัดง่ายออกไป จากนั้นจึงทำการสกัดแยกธาตุหายากแต่ละตัวออกจากกันด้วยวิธีไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโทกราฟีต่อไปได้

ตารางที่ 2.1 ธาตุหายากและคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ [1]

| ธาตุ | สัญลักษณ์ | Atomic number | Atomic mass |
|----------------|-----------|---------------|-------------|
| แลนทานัม | La | 57 | 138.9 |
| ซีเรียม | Ce | 58 | 140.1 |
| เพรซีโอดิเมียม | Pr | 59 | 140.9 |
| นีโอดิเมียม | Nd | 60 | 144.2 |
| โพรมีเทียม | Pm | 61 | 147.0 |
| ซามเรียม | Sm | 62 | 150.4 |
| ยูโรเพียม | Eu | 63 | 152.0 |
| แกโดลิเนียม | Gd | 64 | 157.3 |
| เทอร์เบียม | Tb | 65 | 158.9 |
| ดิสโพรเซียม | Dy | 66 | 162.5 |
| โฮลเมียม | Ho | 67 | 164.9 |
| เออร์เบียม | Er | 68 | 167.3 |
| ทูลิเมียม | Tm | 69 | 168.9 |
| อิตเทอร์เบียม | Yb | 70 | 173.0 |
| ลูทีเชียม | Lu | 71 | 175.0 |
| (อิตเทรียม | Y | 39 | 88.9) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แหล่งที่พบ [1]

ธาตุหายากมักกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปมากกว่าจะเกิดรวมกันเป็นหัวแร่ (Concentrates) แร่ที่มีธาตุหายากอยู่ปริมาณมาก คือประมาณร้อยละ 95 ของธาตุหายากที่มีอยู่ในโลก ได้แก่ แร่บาสนไนต์ แร่โมนาไซต์ และแร่ซีโนไทม์

ในประเทศไทย ธาตุหายากจะพบในแร่โมนาไซต์และแร่ซีโนไทม์

2.3 แร่โมนาไซต์ในประเทศไทย [1 - 4]

แร่โมนาไซต์เป็นแร่กัมมันตรังสี (Radioactive mineral) ชนิดหนึ่งที่ตั้งอยู่ในกลุ่มแร่หายาก โดยมีทอเรียมและยูเรเนียมเป็นองค์ประกอบ

2.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

แร่โมนาไซต์เกิดอยู่ในระบบผลึกโมโนคลินิก (Monoclinic) โดยผลึกที่พบมักมีขนาดเล็ก แร่โมนาไซต์ส่วนใหญ่ไม่แสดงรูปผลึกหรือแสดงรูปผลึกไม่ชัดเจน มีสีเหลือง น้ำตาล-เหลือง น้ำตาลแดง มักอมเขียวหรือบางครั้งเกือบขาว ความวาวของผิวแร่คล้ายขี้ผึ้งจนถึงคล้ายแก้ว โปร่งแสง ดังรูปที่ 2.1 ความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ในช่วง 4.6-5.4 โดยเพิ่มขึ้นตามปริมาณธาตุทอเรียม ความแข็งมีค่าระหว่าง 5.0-5.5 ภายใต้มงแสงอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้นจะให้สีเขียว มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนและไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า สามารถตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีได้ด้วยเครื่องวัดไกเกอร์ (Geiger counter)



รูปที่ 2.1 ลักษณะผลึกของแร่โมนาไซต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 คุณสมบัติทางเคมี

แร่โมนาไซต์เป็นสารประกอบฟอสเฟตของธาตุในกลุ่มธาตุหายากที่สำคัญ ได้แก่ ซีเรียม แลนทานัม นอกจากนี้ ยังมีธาตุทอเรียมและยูเรเนียมเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ตามสูตร $(Ce\ La\ Y\ Th)PO_4$ ธาตุ Th ที่อยู่ในแร่โมนาไซต์จะอยู่ในรูป ThO_2 ตั้งแต่ 2-20% อัตราส่วนของ Ce:La ประมาณ 1:1 Th มักแทนที่ Ce และ La ได้เล็กน้อยไปจนถึง 10-20% ของธาตุ ThO_2 ส่วนธาตุ Y แทนที่ Ce และ La ได้เล็กน้อย ซิลิกา (SiO_2) มักปนอยู่ด้วยในรูปทอไรต์ (Thorite, $ThSiUO_4$) หัวแร่โมนาไซต์สะอาดจะมีผลวิเคราะห์ของแร่เอิร์ทออกไซด์ร่วมกับทอเรียม (REO + Thoria) ตั้งแต่ 55% ขึ้นไป

แร่โมนาไซต์โดยทั่วไปเกิดเป็นแร่ประกอบหินในหินอัคนีชนิดหินแกรนิต หินแปร ชนิดหินไนส์ และบริเวณที่มีหินดังกล่าวเป็นหินแม่บางครั้งก็พบแหล่งของแร่โมนาไซต์ ซึ่งอาจมีแร่โมนาไซต์ปริมาณมากพอจนกลายเป็นแหล่งแร่ที่สำคัญ โดยมีแร่อื่น ๆ ที่เกิดร่วมด้วย เช่น แร่ซีโนไทม์ แร่เซอร์คอน แร่อิลเมไนต์ เป็นต้น

แร่โมนาไซต์ในประเทศไทยพบอยู่ในแหล่งแร่ดีบุกเกือบทุกแห่ง ทั้งแร่บนบก ในทะเล และบนภูเขา โดยแหล่งแร่เหล่านี้มักพบปริมาณของแร่โมนาไซต์ค่อนข้างสูง แต่ความสมบูรณ์ของแร่โมนาไซต์จะต่ำกว่าแร่ดีบุกมาก ในปริมาณที่ต่ำกว่า 0.001% ขณะที่แร่ดีบุกมีความสมบูรณ์พอที่จะทำเหมืองได้ตั้งแต่ 0.012% ขึ้นไป

หิวแร่ดีบุกปฐมภูมิ (Primary concentrate) ที่ได้จากเหมือง จะพบแร่โมนาไซต์ในปริมาณที่สูงขึ้นพอสมควร ปกติหิวแร่ดีบุกขั้นต้นจะมีแร่ดีบุกอยู่ตั้งแต่ 10% ขึ้นไป จนถึง 70-80% และจะมีแร่โมนาไซต์ตั้งแต่ 0.01% จนถึงสูงกว่า 1% อย่างไรก็ตามในกระบวนการแต่งแร่จะมีการสูญเสียแร่โมนาไซต์พร้อมแร่อื่น ๆ ไปกับหางแร่หรือขี้แร่ (Tailing) หลังจากแต่งแร่ดีบุกสะอาดออกไปแล้วจะเหลือมูลแร่นักหรือแร่คละ (Amang) ซึ่งจะประกอบด้วยแร่พลอยได้จากแร่ดีบุก ประกอบด้วยแร่ซีโนไทม์ แร่โมนาไซต์ แร่เซอร์คอน แร่รูไทล์ แร่โคลัมไบต์ เป็นต้น

ผลผลิตแร่โมนาไซต์ที่สำคัญ ได้จากการนำมูลแร่หรือแร่คละดังกล่าวมาผ่านกระบวนการแต่งแร่อีกต่อหนึ่ง ซึ่งโรงงานที่ผลิตแร่โมนาไซต์หรือโรงแต่งแร่ต่าง ๆ มักอยู่ในท้องที่จังหวัด

ภูเก็ต พังงา และระนอง แหล่งแร่โมนาไซต์ที่สำคัญอีกแหล่ง คือ แหล่งแร่ชายหาด (Beach sand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

deposit) ที่จังหวัดชุมพร ซึ่งมีการแต่งแร่เซอร์คอนและแร่โรมาไนต์เป็นแร่สำคัญ โดยแร่ดิบก็มีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (พปส.) กระทรวง-วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ได้นำแร่โรมาไนต์มาแปรสภาพโดยการบดให้ละเอียด และการย่อยแร่ จากนั้นจะมีการแยกธาตุวัฏควินิวเคลียร์ ได้แก่ ยูเรเนียมและทอเรียมออก ที่เหลือจะเป็นกลุ่มธาตุหายาก โดยจะนำไปสกัดเอาซีเรียมออกก่อนโดยใช้เครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซท-เทลอร์ สำหรับสารละลายที่เหลือจะนำไปสกัดในหอสกัดแบบพัลส์เฟอร์พอเรตเพลทโดยใช้สารละลาย 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟต (Tri-n-butylphosphate, TBP) ในน้ำมันก๊าดเป็นสารสกัดเพื่อแยกเอากลุ่มธาตุนีโอดีเมียมและธาตุหายากกลุ่มหนักออกจากธาตุหายากกลุ่มเบา ธาตุหายากกลุ่มเบาที่เหลือนี้จะถูกนำไปสกัดในหอสกัดแบบพัลส์เฟอร์พอเรตเพลทด้วย 50% TBP ในน้ำมันก๊าดเพื่อแยกผลิตภัณฑ์หลักคือ แลนทานัมและเพรซีโอดีเมียมออกจากกัน สำหรับธาตุหายากกลุ่มนีโอดีเมียมและธาตุหายากกลุ่มหนักจะถูกนำไปสกัดด้วย 50% TBP เช่นเดียวกัน เพื่อแยกธาตุหายากกลุ่มหนักออกจากนีโอดีเมียม สำหรับธาตุหายากกลุ่มหนักจะนำไปแยกธาตุหายากแต่ละธาตุออกจากกัน โดยวิธีการไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโทกราฟีต่อไป

2.4 การใช้ประโยชน์จากธาตุหายาก [1]

ธาตุหายากมีจำนวนมากถึงเกือบ 1 ใน 6 ของธาตุทั้งหมดที่ปรากฏอยู่บนตารางธาตุ การใช้ประโยชน์จึงกว้างขวางมาก อาทิเช่น

2.4.1 อุตสาหกรรมโลหะ

- ใช้มิชเมทัล (Misch metal) ที่ได้จากการนำแร่ที่เป็นต้นกำเนิดธาตุหายากมาแปรสภาพให้เป็นสารประกอบคลอไรด์ แล้วนำมาแยกสลายด้วยไฟฟ้าได้เป็นโลหะของธาตุหายากรวมกันเป็นกลุ่ม ๆ ผสมกับเหล็กกล้าเพื่อผลิตเหล็กกล้าที่มีอัลลอยต่ำ ความแข็งแรงสูง (High-strength low alloy steel)

- ใช้มิชเมทัลเติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกล

ที่อุณหภูมิสูงสำหรับผลิตเครื่องยนต์ของเครื่องบิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 อุตสาหกรรมเคมี-ตัวเร่งปฏิกิริยา

- ใช้ซีเรียมเป็นส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนียเพื่อลดอุณหภูมิของปฏิกิริยาจาก 450-550 องศาเซลเซียส เป็น 400-470 องศาเซลเซียส
- ใช้อิเทรียมหรือซีเรียม เป็นส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาจุดชนวนของเสียจากการเผาไหม้ของน้ำมันเครื่องยนต์ (Catalytic converter) ซึ่งตามปกติจะต้องใช้สารถึง 3 ชนิด คือ แพลทินัม โรเดียม และแพลเลเดียม ผสมกันและมีราคาแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแพลทินัม การใช้ธาตุหายากมาผสมช่วยให้สามารถใช้แพลเลเดียมเพียงธาตุเดียวได้ ซึ่งมีราคาถูกกว่า เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายลดลงร้อยละ 30-50
- ใช้ซีเรียมเป็นสารกันน้ำออกแทนตะกั่ว ได้ดีและช่วยลดมลพิษ

2.4.3 อุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก

- ใช้ซีเรียมออกไซด์และยูโรเพียมออกไซด์ ผสมในเลนส์ที่ให้มิติเข้มเมื่อถูกแสงแดดและใสเมื่ออยู่ในร่ม (Phototropic lens)
- ใช้ซีเรียมออกไซด์และนีโอไดเมียมออกไซด์ ผสมในแก้วที่ดูดแสงในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต เพื่อทำภาชนะบรรจุเบียร์ อาหาร และยาที่ไวต่อแสงในช่วงคลื่นนี้
- ใช้ซีเรียมออกไซด์ผสมในแก้วสำหรับผลิตจอโทรทัศน์สี เพื่อป้องกันมิให้จอเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเนื่องจากถูกอิเล็กตรอน
- ใช้สำหรับทำให้แก้วมีสีตามต้องการ เช่น นีโอไดเมียมทำให้แก้วมีสีม่วงหรือแดง เออร์เบียมทำให้แก้วมีสีชมพู เป็นต้น
- ผงซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) ใช้สำหรับขัดเลนส์โดยไม่ทำให้เกิดรอยขีดข่วน เพรซีโอไดเมียมหรือนีโอไดเมียมใช้ร่วมกับธาตุอื่น ๆ เช่น ไทเทเนียม แมงกานีส สำหรับเคลือบเลนส์ทำให้ดัชนีหักเห (Refractive index) ของเลนส์สูงขึ้น ช่วยลดการสะท้อนแสงของเลนส์ได้เกือบทั้งหมด

2.4.4 อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟอสฟอรั

- ผลึกแกดเลียม-แกโดลิเนียม-การ์เนต (Gallium-Gadolinium-Garnet) ใช้ทำฟิล์มของหน่วยความจำแบบฟอง (Bubble memory film) ซึ่งใช้ในระบบโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ฟิล์มชนิดนี้สามารถเก็บข้อมูลด้วยความเร็วสูงกว่าแถบแม่เหล็กและจานแม่เหล็กประมาณ 10 เท่าตัว แต่ใช้พลังงานน้อยกว่า นอกจากนี้ ข้อมูลที่เก็บไว้จะไม่ถูกลบออกเมื่อเกิดกระแสไฟดับ
- ใช้เส้นทอานมออกไซด์มากถึงร้อยละ 20 ผสมในใยแก้วนำแสง (Optic fiber) ซึ่งต้องเป็นแก้วที่มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index) สูง ๆ
- การใช้ธาตุหายากผลิตไส้หลอดไฟเรืองแสงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ประหยัดพลังงานมากกว่าแบบเก่า เนื่องจากตัดพลังงานบางช่วงที่ไม่จำเป็นต่อสายตาในสเปกตรัมของแสงสีขาวออกไป เช่น ยูโรเพียมในอิตเทรียมออกไซด์ให้แสงในช่วงส้ม-แดง และซิงค์ซิลิเกตให้แสงในช่วงสีเขียว
- นีโอติเมียมใช้เป็นต้นกำเนิดแสงเลเซอร์

2.4.5 อุตสาหกรรมนาฬิกา

แต่เดิมจะนำเรเดียมซึ่งแผ่รังสีแกมมา มาใช้ในการทำปรายน้ำสำหรับดูเวลาในที่มีด ปัจจุบันใช้โพรมีเทียมซึ่งแผ่รังสีบีตาแทน

2.4.6 ด้านเทคโนโลยีนิวเคลียร์

ธาตุหายากบางธาตุจัดได้ว่าเป็นธาตุที่มีค่าพื้นที่หน้าตัดสูง สามารถดูดซับนิวตรอนได้มาก แกโดลิเนียมในปริมาณน้อย จึงถูกใช้ผสมในเชื้อเพลิงนิวเคลียร์สำหรับเป็น Burnable poison หรือยูโรเพียมใช้สำหรับระบบความปลอดภัยของการควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ ซึ่งปกติมีแท่งควบคุม (Control rod) เป็นตัวควบคุม

2.4.7 ด้านอุตสาหกรรมสี

ผลิตภัณฑ์เซรามิก สีทาอาคาร และสีเคลือบ ที่มีสีแดงซึ่งผลิตจากซีเรียม (Cerium sulfide, Ce_2S_3) สำหรับทดแทนแม่สีสีแดงที่ใช้ในปัจจุบันมากกว่าปีละ 2 พันตัน ซึ่งผลิตจากโลหะหนัก 2 ชนิด คือ แคดเมียม (Cadmium sulfoselenide) และตะกั่ว (Lead molybdate)

2.4.8 การผลิตพลังงานสำหรับอนาคต

ไฮโดรเจนนับเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูงเพราะมีอยู่ทั่วไป และเมื่อเผาไหม้ก็ไม่เกิดมลพิษ แต่อุปสรรคสำคัญอยู่ที่การเก็บกักไฮโดรเจน ซึ่งมีปัญหาทั้งอันตรายจากความดันสูงและการติดไฟได้ง่ายจนอาจเกิดการระเบิด แต่จากการพัฒนาโลหะผสมแลนทานัม-นิกเกิลอัลลอย ($LaNi_5$) ขึ้นมา พบว่าสามารถดูดซับและคายไฮโดรเจนเป็นปริมาณมาก ๆ ได้ในอุณหภูมิและความดันที่ไม่สูงมากนัก และยังดูดซับและคายซับไฮโดรเจนด้วยอัตราที่สูงมาก นับเป็นความหวังทางด้านพลังงานบริสุทธิ์อีกทางหนึ่ง

บทที่ 3

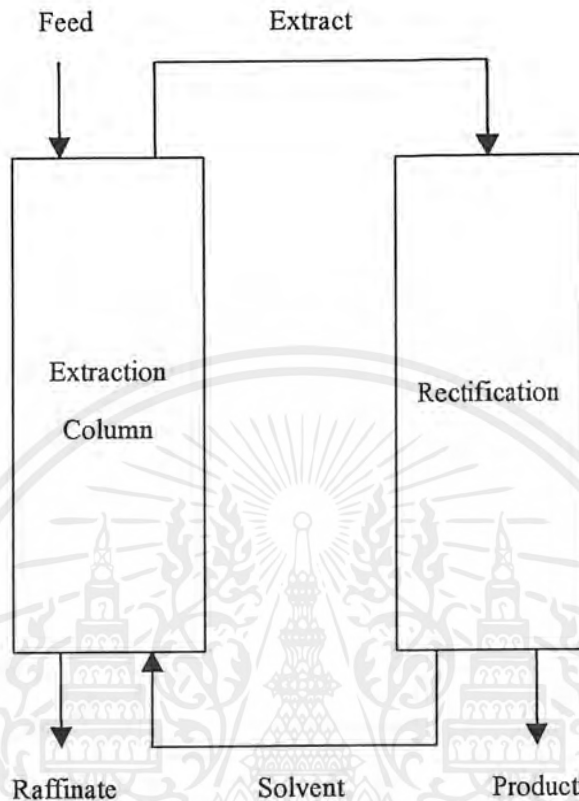
ทฤษฎีการสกัด

3.1 การสกัดของเหลวด้วยของเหลว [5-6]

การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-liquid extraction) หรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกสารที่ต้องการจากของเหลวผสม โดยใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลว ซึ่งสารที่ต้องการสกัด (Solute) ควรจะละลายในตัวทำละลายได้ดีกว่าสารอื่นที่ไม่ต้องการสกัดที่อยู่ในของเหลวผสม โดยในการสกัดนั้นจะถือว่าของเหลวผสมหรือสารป้อน (Feed) และตัวทำละลายจะไม่ละลายเข้าด้วยกัน หรือจะละลายเข้าด้วยกันบางส่วนเท่านั้น การสกัดของเหลวด้วยของเหลวมีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากใช้พลังงานน้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการกลั่น โดยสารที่มักใช้วิธีสกัดของเหลวด้วยของเหลว ยกตัวอย่างเช่น

- สารผสมที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน (Azeotrope)
 - สารประกอบที่จะแยกเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (By product) ที่ไม่ต้องการ
 - สารป้อนที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งแยกด้วยการกลั่นจะเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่า
- สำหรับกระบวนการสกัดมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำของเหลวผสมที่เป็นสารป้อนและตัวทำละลายมาสัมผัสกันเพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลของสารที่ต้องการสกัดจากเฟสของสารป้อนมายังเฟสของตัวทำละลาย
- 2) ภายหลังจากสัมผัสกันเป็นเวลานานพอสมควร เฟสทั้งสองจะแยกออกจากกัน
- 3) แยกตัวทำละลายที่มีอยู่ในแต่ละเฟสเพื่อกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 3.1 การสกัดของเหลวด้วยของเหลวหรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย

จากรูปที่ 3.1 ชนิดของหอสกัด (Extraction column) ที่ใช้ ควรเลือกตามความเหมาะสม โดยในโครงการนี้ ชนิดของหอสกัดที่ใช้เป็นแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท (Pulsed perforated plate column) ซึ่งเป็นเครื่องสกัดแบบต่อเนื่อง โดยสารป้อนและตัวทำละลายจะไหลสวนทางกัน (Countercurrent flow) ภายในหอสกัดและจะแยกออกจากกันได้โดยความแตกต่างของความหนาแน่นของของเหลวทั้งสองเฟส ภายหลังจากสกัดแล้ว สารที่ต้องการสกัดจะอยู่ในส่วนสกัด (Extract phase) และส่วนคงเหลือ (Raffinate phase) จะมีสารถูกสกัดอยู่เพียงเล็กน้อย

สำหรับการไหลสวนทางกันของสารป้อนและตัวทำละลาย หรือส่วนสกัดกับส่วนคงเหลือ ภายในหอสกัดนั้น จะมีเฟสหนึ่งอยู่ในรูปหยด (Dispersed phase) หรือเรียกว่า เฟสกระจาย และอีกเฟสหนึ่งจะเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ซึ่งของเหลวที่หนักกว่าจะเข้าสู่หอสกัดที่ส่วนบนและไหลลงมายังส่วนล่างของหอสกัด ขณะที่ของเหลวที่เบากว่าจะเข้าที่ส่วนล่างและไหลสวนทางกับของเหลวที่หนักกว่าขึ้นสู่ส่วนบนของหอสกัด ในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรต-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟลท จะติดตั้งหน่วยเขย่า (Pulsing unit) เพื่อช่วยเพิ่มการผสมระหว่างเฟสและลดขนาดของหยด ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องสกัดดีขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสกัด ได้แก่

- 1) องค์ประกอบในเฟส
- 2) อัตราส่วนของเฟส
- 3) คุณสมบัติของเฟส
- 4) อุณหภูมิ
- 5) พลังงานที่ป้อนเข้า
- 6) การป้อนกลับ (Reflux)

การออกแบบกระบวนการสกัดของเหลวด้วยของเหลวจำเป็นจะต้องศึกษาข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ เพื่อให้เกิดการตัดสินใจในการเลือกชนิดของตัวทำละลาย อัตราการไหลของตัวทำละลาย และสภาวะการเดินเครื่องที่เหมาะสม รวมถึงเครื่องสกัดที่ใช้ หากเป็นแบบหอสกัด จำเป็นต้องทราบเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของหอสกัด พร้อมทั้งข้อจำกัดในการเดินเครื่อง

ในการกำหนดค่าอัตราไหลของสารป้อนและตัวทำละลายนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ ความสามารถในการสกัดตัวถูกละลาย ถ้าอัตราการไหลสูงขึ้น และอยู่ในช่วงที่ไม่ทำให้เกิดภาวะการท่วมในหอสกัด ตัวถูกละลายจะถูกสกัดออกจากสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่ผลที่ไม่ต้องการจะตามมา คือ ประการแรก จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเก็บตัวทำละลาย และประการที่สอง จะต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นในการล้างตัวทำละลายเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการอีกครั้งหนึ่ง

3.2 การเลือกตัวทำละลาย [5], [7]

การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุด เป็นปัญหาที่ยากอย่างหนึ่งของการสกัด และจะมีอิทธิพลทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการมาเกี่ยวข้องด้วย

ตัวทำละลายจะต้องมีคุณสมบัติพื้นฐาน คือ ต้องมีความสามารถที่จะละลายตัวถูกละลายได้ดี

กว่าที่ละลายได้ในสารละลาย การเลือกตัวทำละลายขึ้นอยู่กับเงื่อนไขดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ค่าการเลือก

ค่าการเลือก (Selectivity, α_{ab}) คือ อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การกระจายขององค์ประกอบ a เมื่อเทียบกับตัวทำละลายและสารที่ป้อนเข้า ต่อสัมประสิทธิ์การกระจายขององค์ประกอบ b เมื่อเทียบกับตัวทำละลายและสารที่ป้อนเข้า เมื่อ

a คือ ตัวถูกละลายที่จะถูกแยกออกจากสารป้อนเข้า

b คือ สารที่เหลือในส่วนคงเหลือ

โดยในกระบวนการสกัดนั้น ค่า α_{ab} จะต้องมามีค่ามากกว่า 1

3.2.2 สัมประสิทธิ์การกระจาย

สัมประสิทธิ์การกระจาย คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในส่วนสกัด กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในส่วนคงเหลือ

3.2.3 จุดเดือดของตัวทำละลาย

ตัวทำละลายที่ใช้ควรมีจุดเดือดที่เหมาะสม และจะต้องมีจุดเดือดที่แตกต่างกับจุดเดือดของตัวถูกละลายพอสมควร เพราะเมื่อแยกส่วนสกัดออกมาแล้วจะต้องนำส่วนสกัดมาแยกเอาตัวทำละลายออกเพื่อนำตัวทำละลายกลับไปใช้ใหม่ ซึ่งวิธีการแยกตัวทำละลายและตัวถูกละลายในอุตสาหกรรมนั้นจะทำโดยการกลั่น

3.2.4 ความง่ายต่อการนำกลับไปใช้ใหม่

สิ่งนี้มีความสำคัญเท่า ๆ กับค่าการเลือก เพราะว่าในทุกระบบการสกัดจะต้องนำตัวทำละลายมาแยกออกจากตัวถูกละลาย แล้วนำตัวทำละลายกลับไปใช้ใหม่เพื่อประหยัด

3.2.5 ความสามารถในการผสมกันได้กับสารละลายที่ป้อนเข้า

เมื่อต้องการค่าการเลือกสูง เพื่อที่จะให้สารที่ไม่ต้องการในสารป้อนมีการผสมเข้าไปในตัวทำละลายน้อยที่สุด ดังนั้นต้องทำการหาตัวทำละลายที่มีการผสมเข้ากับสารป้อนต่ำ เพื่อลด

ปริมาณของตัวทำละลายที่จะออกกับส่วนคงเหลือให้น้อยที่สุด และตัวทำละลายจะนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อความสะดวกทางเศรษฐกิจ

3.2.6 ความหนาแน่นที่ต่างกันพอสมควรกับสารป้อนที่เข้า

ในการสกัดของเหลวจะผสมของเหลว 2 เฟสเข้าด้วยกัน โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของแต่ละเฟส เป็นแรงทำให้เกิดการผสมระหว่างเฟสทั้งสอง

3.2.7 แรงตึงระหว่างผิวหน้า (Interfacial tension)

แรงตึงระหว่างผิวหน้ามีค่าต่ำ เพื่อต้องการพลังงานน้อยในการแยกสารให้กระจายออกไป อย่างไรก็ตาม ค่าที่ต่ำจะมีค่าน้อยกว่า 1 dyne/cm ในทางกลับกัน ค่าแรงตึงระหว่างผิวหน้ามีค่าสูง จะมีค่าประมาณ 50 dyne/cm

3.2.8 ความหนืดต่ำ

โดยทั่วไป ส่วนใหญ่ค่าความหนืดที่ใช้ในระบบการสกัดจะมีค่าน้อยกว่า 10 เซนติพอยส์ ในการเลือกตัวทำละลายควรเลือกตัวที่มีค่าความหนืดต่ำ ๆ เท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ง่ายต่อการถ่ายเทมวลและแยกเฟส แต่ค่าความหนืดดังกล่าวมีอิทธิพลน้อยมาก

3.2.9 การกัดกร่อนต่ำ

การกัดกร่อนของสารป้อนจะถูกกำหนดโดยกระบวนการ ถึงแม้ว่าอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าไป เนื่องจากการปรับสภาวะการทำงานทั้งอุณหภูมิและค่า pH สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ต้องเลือกตัวทำละลายที่กัดกร่อนน้อยกว่าสารป้อน

3.2.10 การติดไฟต่ำและมีความเป็นพิษน้อย

ถ้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงตัวทำละลายที่มีการติดไฟได้ การเลือกเครื่องมือและสภาวะการทำงานควรพิจารณาอย่างรอบคอบเพื่อลดปริมาณตัวทำละลาย และถ้าตัวทำละลายมีความเป็นพิษมาก จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงการแยกออกหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ

3.2.11 ราคาถูกและหาได้ง่าย

ในทางอุตสาหกรรมตัวทำละลายต้องมีราคาต่ำและหาได้ง่ายจึงจะเหมาะสมกับการผลิต

3.2.12 ความเสถียรต่อความร้อน

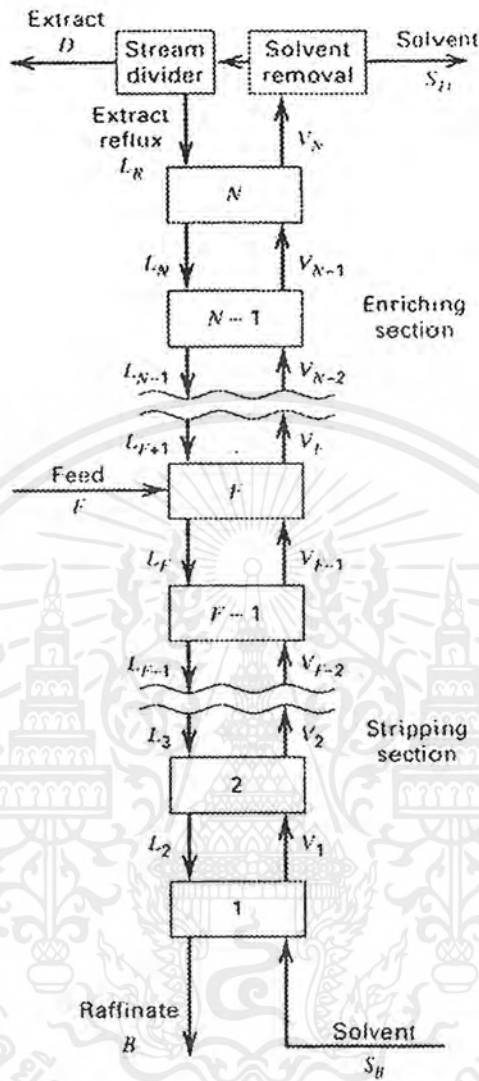
ความเสถียรต่อความร้อนของตัวทำละลายมีความสำคัญมากจะต้องมีค่าสูง จึงต้องพิจารณาค่าความเสถียรต่อความร้อนของตัวทำละลายเป็นพิเศษ

3.3 การป้อนกลับ [6], [8]

การป้อนกลับจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด ในกรณีที่การสกัดแบบไหลสวนทางกันแบบธรรมดายังไม่สามารถทำให้เกิดการแยกขององค์ประกอบในสารป้อนตามต้องการได้

การป้อนกลับ ทำได้โดยการป้อนสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารที่ต้องการสกัดสูงเข้าแทนที่ตำแหน่งของสารป้อน จะทำให้ส่วนสกัดที่ออกจากหอสกัดมีสารที่ต้องการสกัดเพิ่มขึ้น สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ สารละลายที่ป้อนกลับเข้ามายังหอสกัด (Reflux) ควรมีความเข้มข้นของสารที่ต้องการสกัดสูงกว่าสารป้อน และตำแหน่งที่สารป้อนเข้าสู่หอสกัดควรเป็นตำแหน่งที่สารละลายมีองค์ประกอบและคุณสมบัติใกล้เคียงกับสารป้อน

จากรูปที่ 3.2 เมื่อ L คือ อัตราการไหลของส่วนคงเหลือ V คือ อัตราการไหลของส่วนสกัด และ L_R คืออัตราการไหลของสารป้อนกลับ ส่วนสกัดที่ออกทางยอดหอจะผ่านหน่วยแยกเอาตัวทำละลายออก ได้เป็นสารละลายที่มีวิฤภาคเดียวกันกับสารป้อนแต่มีความเข้มข้นสูงกว่า ส่วนหนึ่งจะเป็นผลิตภัณฑ์ยอดหอ (D) อีกส่วนหนึ่งจะถูกป้อนกลับเข้าทางด้านบนของหอสกัด (L_R) เนื่องจากสารละลายที่ป้อนเข้าทางยอดหอแทนสารป้อนเดิมนั้นมีความเข้มข้นสูงขึ้น จึงทำให้ส่วนสกัด (V_N) มีความเข้มข้นสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 3.2 การสกัดของเหลวด้วยของเหลวแบบมีการป้อนกลับ [6]

สารป้อนเมื่อถูกแทนที่ด้วยสารป้อนกลับ จึงต้องถูกป้อนเข้าสู่หอสกัดที่ตำแหน่งใหม่ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดก็คือ ชั้นที่สารละลายมีองค์ประกอบและคุณสมบัติใกล้เคียงกับสารป้อนมากที่สุด เรียกชั้นนี้ว่า ชั้นสารป้อน (Feed stage) ดังนั้นหอสกัดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่เหนือชั้นสารป้อนซึ่งมีองค์ประกอบของตัวถูกละลายที่ต้องการในเฟสของตัวทำละลายมาก จะเรียกส่วนนี้ว่า ส่วนเพิ่มความเข้มข้น (Enriching section) และส่วนที่อยู่ใต้ชั้นสารป้อน ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกสกัดเอาตัวถูกละลายที่ต้องการออกจากเฟสของสารป้อน เรียกส่วนนี้ว่า ส่วนไล่ตัวถูกละลาย (Stripping section)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ประสิทธิภาพการสกัด [5]

การสกัดจะมีประสิทธิภาพ ตัวทำละลายนั้นจะต้องละลายตัวถูกละลายที่อยู่ในเฟสของสารป้อนได้มากขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือก

3.4.1 สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient)

เนื่องจากการสกัดของเหลวด้วยของเหลวเป็นการถ่ายเทมวล ดังนั้นสมดุลเคมีจึงมีผลต่อการสกัด พารามิเตอร์สมดุล คือ สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient หรือ Partition coefficient)

$$k = \frac{y_a}{x_a} \quad (3.1)$$

3.4.2 ค่าการเลือก (Selectivity)

การใช้การสกัดของเหลวด้วยของเหลวเพื่อแยกสารประกอบ 2 ชนิดออกจากกัน สำหรับระบบที่สารละลายผสมมีตัวถูกละลายมากกว่า 2 ชนิด สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการพิจารณาเลือกตัวทำละลายด้วย ก็คือ ค่าการเลือก (α_{ab})

$$\alpha_{ab} = \frac{k_a}{k_b} \quad (3.2)$$

สำหรับการสกัดด้วยตัวทำละลาย ค่าการเลือกต้องมากกว่า 1 เพราะเมื่อค่าการเลือกมีค่าสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดดีขึ้น โดยต้องเลือกตัวทำละลายที่สัมประสิทธิ์การกระจายของสารที่ต้องการสกัดมีค่าสูง ขณะที่สัมประสิทธิ์การกระจายของสารที่ไม่ต้องการสกัดมีค่าต่ำ เช่น ในการสกัดกรดอะซิติกจากน้ำ ซึ่งตัวทำละลายจะต้องสกัดกรดได้มาก แต่สกัดน้ำได้เล็กน้อย

3.5 ประโยชน์ของกระบวนการสกัด [7]

กระบวนการสกัดของเหลวด้วยของเหลวถูกนำไปใช้ในกรณีที่มีการแยกสารโดยตรง เช่น ในกรณีที่การกลั่นและการตกผลึกไม่สามารถนำมาใช้ได้หรือมีราคาสูง การประยุกต์ใช้กระบวนการ

การสกัดของเหลวด้วยของเหลว ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) การแยกของระบบที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน เช่น การแยกอะโรมาติกจากสารละลายไฮโดรคาร์บอน
- 2) การแยกสารที่มีจุดเดือดสูงออกจากสารละลาย เช่น ฟีนอล
- 3) การแยกสารประกอบที่ไวต่ออุณหภูมิ เช่น อะครีเลต
- 4) การแยกสารผสมโดยใช้จุดเดือดสูง เช่น วิตามิน
- 5) การแยกของสารผสมที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน (Azeotrope) เช่น การสกัดกรดอะซีติก หรือฟอร์มิก ออกจากตัวกลางที่เป็นของเหลว
- 6) กระบวนการสกัดสารประกอบอินทรีย์จากสารละลาย เช่น คาโปรแลกตัม
- 7) การสกัดเกลือออกจากสารละลายพอลิเมอร์ เช่น Ketone resin polyols
- 8) การสกัดพวกเกลือโลหะออกจากรีดิวซ์ เช่น ทองแดง
- 9) การสกัดเกลือโลหะออกจากรีดิวซ์
- 10) การวิจัยเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

บทที่ 4

เครื่องสกัดของเหลวด้วยของเหลว

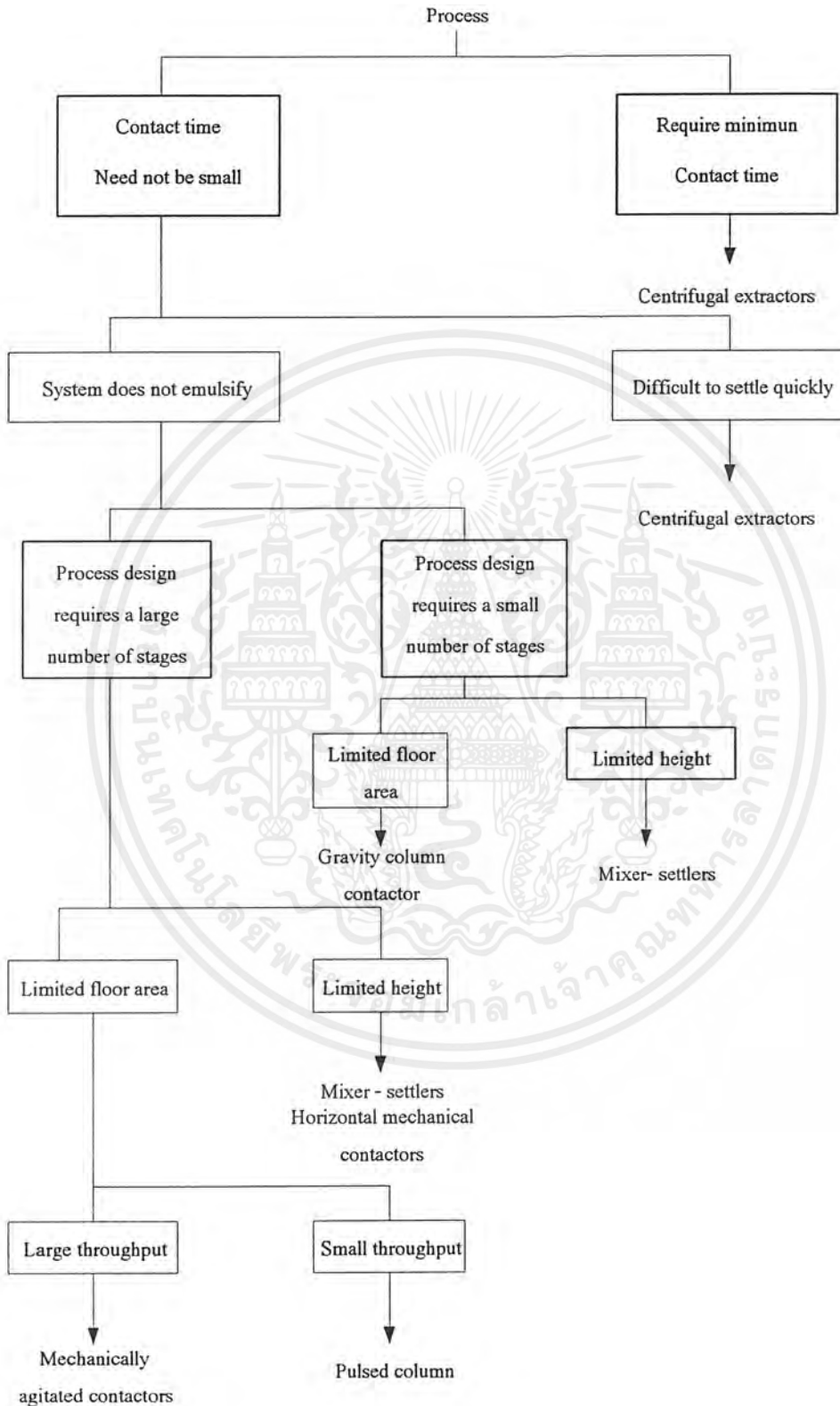
4.1 การเลือกเครื่องมือในการสกัด [5]

ในการออกแบบและเลือกใช้เครื่องสกัดในอุตสาหกรรม ควรคำนึงถึงความต้องการพื้นฐาน ดังนี้

- 1) ประสิทธิภาพในการสกัด
- 2) ปริมาตรของเครื่องสกัดและใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย
- 3) ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติการและการบำรุงรักษาต่ำ

การเลือกเครื่องมือในการสกัดโดยทั่วไป มักพิจารณาจากประสบการณ์และหลักทางเศรษฐศาสตร์ โดยต้องพิจารณาตัวถูกละลายถึงคุณสมบัติทางด้านอัตราการใช้ รวมทั้งคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์และเคมีของระบบที่จะสกัด บางครั้งอาจเกิดความยุ่งยากขึ้นคือ สารอาจเป็นของแข็งอิมัลชัน (Emulsion) หรือวัสดุที่ย่อยสลายง่าย ซึ่งต้องนำมาพิจารณา รวมทั้งพิจารณาพื้นที่ที่จะวางเครื่องมือในการสกัดด้วย สุดท้ายคือ ราคาติดตั้ง ค่าบำรุงรักษาและการเดินเครื่อง โดยประมาณจากเครื่องมือในการสกัดซึ่งต้องมีการพิจารณาทั้งหมด ส่วนคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องนั้น เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเลือกเครื่องมือการสกัด

แสนสัน [9] เสนอเครื่องมือในการสกัดโดยใช้แผนภาพ นับเป็นวิธีการเลือกที่รวดเร็ว อีกทั้งยังรวมปัจจัยที่ช่วยในการเลือกเครื่องมือในการสกัดอีกด้วยดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 หลักการในการเลือกเครื่องมือสกัดของเหลวด้วยของเหลว [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ประเภทของเครื่องสกัด [5]

เครื่องสกัดสามารถแบ่งได้หลายประเภท ในที่นี้จะกล่าวถึงการแบ่งประเภทเครื่องมือลักษณะใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท คือ

4.2.1 แบ่งตามลักษณะการดำเนินการ

4.2.1.1 แบบสเตจไวส์ (Stagewise) เครื่องสกัดจะแบ่งแยกจำนวนขั้นตอนสมดุลให้เห็นอย่างชัดเจน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนสมดุลนั้นจะมีประสิทธิภาพในการสกัดแยกสูง ซึ่งในแต่ละสเตจ เฟสทั้งสองจะถูกนำเข้าสู่สมดุลจากนั้นจึงแยกออกจากกัน และไหลสวนทางกันไปยังสเตจถัดไป เครื่องมือนี้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการผสมตามแนวแกน (Axial mixing) นอกจากนี้ ส่วนแยกพัก (Settlers) โดยปกติจะมีขนาดใหญ่กว่าส่วนผสม (Mixer)

4.2.1.2 แบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) เครื่องสกัดแบบนี้ จะมีการถ่ายเทมวลตลอดความยาวของเครื่อง ของเหลวจะไหลสวนทางกันเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของเหลว 2 เฟส เครื่องสกัดนี้จะไม่มีการแยกจำนวนขั้นตอนสมดุลแยกกันอย่างชัดเจน และจะเกิดการแยกเฟสที่ปลายเครื่องเท่านั้น จะเหมาะสมกับระบบที่มีการถ่ายเทมวลเร็ว

4.2.2 แบ่งตามลักษณะการใช้พลังงานกลจากภายนอก

4.2.2.1 ประเภทไม่ใช้พลังงานกลจากภายนอก

- ข้อดี - ค่าใช้จ่ายน้อย
- ข้อเสีย - เกิดการผสมน้อย
 - พื้นที่ในการถ่ายเทมวลต่ำ
 - ประสิทธิภาพการสกัดของหอสกัดต่ำ
- ตัวอย่าง - หอสกัดแบบสเปรย์ (Spray column)
 - หอสกัดแบบแพค (Packed column)

4.2.2.2 ประเภทใช้พลังงานกลจากภายนอก

- ข้อดี - พื้นที่ในการถ่ายเทมวลสูง
 - ประสิทธิภาพการสกัดของหอสกัดดี
- ข้อเสีย - ค่าใช้จ่ายสูง
 - ถ้ากวนมากไปอาจทำให้เกิดการผสมย้อนกลับ (Backmixing) ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลลดลง
 - มีการผสมตามแนวแกน
- ตัวอย่าง - การกวน (Agitated) ได้แก่ หอสกัดแบบแกนกลางหมุน
 - การเขย่า (Pulsation) ได้แก่ หอสกัดแบบพัลส์แพค (Pulse packed)

4.2.3 แบ่งตามลักษณะการวางตัวของหอสกัดแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

4.2.3.1 หอสกัดตามแนวตั้ง (Vertical column type extractor)

การใช้หอสกัดตามแนวตั้งจะประหยัดพื้นที่ติดตั้งมากกว่า และไม่มีส่วนพัก (Settler) ระหว่างสเตจ ทำให้เกิดการกักเก็บตัวทำละลายในกระบวนการน้อยลง

ตัวอย่าง หอสกัดแบบสเปรย์ (Spray column)

4.2.3.2 หอสกัดตามแนวนอน (Horizontal extractors)

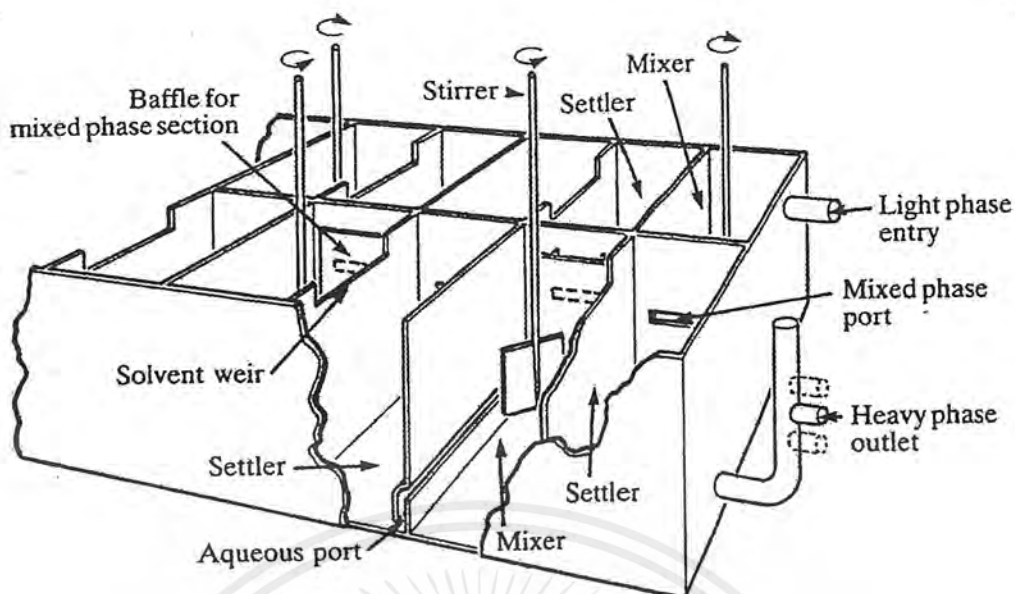
- ตัวอย่าง - มิกเซอร์เซตเทเลอร์ (Mixer-settlers)
 - เครื่องสกัดแบบใช้แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal extractors)
 - เครื่องสกัดแบบเรนนิ่ง บัคเก็ต (Raining bucket extractors)

4.3 ตัวอย่างเครื่องสกัดที่ใช้ในอุตสาหกรรม [5], [6], [9]

4.3.1 เครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซทเทเลอร์ (Mixer-settler)

เครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซทเทเลอร์เป็นแบบสแตงไวส์ที่ใช้กันมากที่สุด ซึ่งเหมาะกับระบบที่มีอัตราการถ่ายเทมวลช้า ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติการจึงต้องมากขึ้น เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลจนถึงสมดุล

เครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซทเทเลอร์แบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังรูปที่ 4.2 คือ ส่วนผสม (Mixer) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เฟสหนึ่งกระจายเข้าไปในอีกเฟสหนึ่ง โดยการใช้พลังงานกลหรือพลังงานลมเข้าไป และอีกส่วน คือ ส่วนแยก (เซทเทเลอร์) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการแยกชั้นระหว่างเฟสทั้งสองที่เกิดการผสมกันในส่วนผสม การติดตั้งเครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซทเทเลอร์นี้ อาจติดตั้งในแนวตั้งหรือแนวระดับ แล้วให้มีการไหลแบบสวนทางภายในหรือระหว่างอุปกรณ์การสูบ (Pumping) ภายในและระหว่างอุปกรณ์อาศัยระบบกล ระบบไฮดรอลิก หรือแรงโน้มถ่วงของโลก พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการออกแบบ คือ คุณสมบัติของเฟส รูปร่างของช่องผสมและช่องแยกพัก ลักษณะภายในของช่องผสมและช่องแยก และพลังงานที่ให้แก่วัตถุวน จุดมุ่งหมายของการออกแบบ คือ ทำให้เครื่องมือนี้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ นอกจากนี้ช่องผสมควรมีขนาดเหมาะสม เพื่อให้มีเวลาเพียงพอต่อการเข้าสู่สภาวะสมดุลของทั้งสองเฟส ช่องแยกพักควรมีขนาดใหญ่พอที่จะให้เกิดการแยกเฟสอย่างสมบูรณ์ ในระบบของเครื่องสกัดแบบมิกเซอร์-เซทเทเลอร์โดยทั่วไป เวลาที่ใช้ในการผสมกันไม่เกินหนึ่งถึงสองนาที แม้ว่าระบบที่มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำ ทำให้อาจใช้เวลามากกว่าบ้าง สมรรถนะการทำงานจริงจะพิจารณาจากประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอน



รูปที่ 4.2 เครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซทเทิลเลอร์ [10]

ประสิทธิภาพของขั้นตอนจะลดลง ถ้าเฟสทั้งสองมิได้ถูกแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ในช่องแยกพัก ลักษณะเช่นนี้ไม่มีผลนักต่อขั้นตอนช่วงกลาง แต่ในขั้นตอนสุดท้ายหากเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่บริสุทธิ์

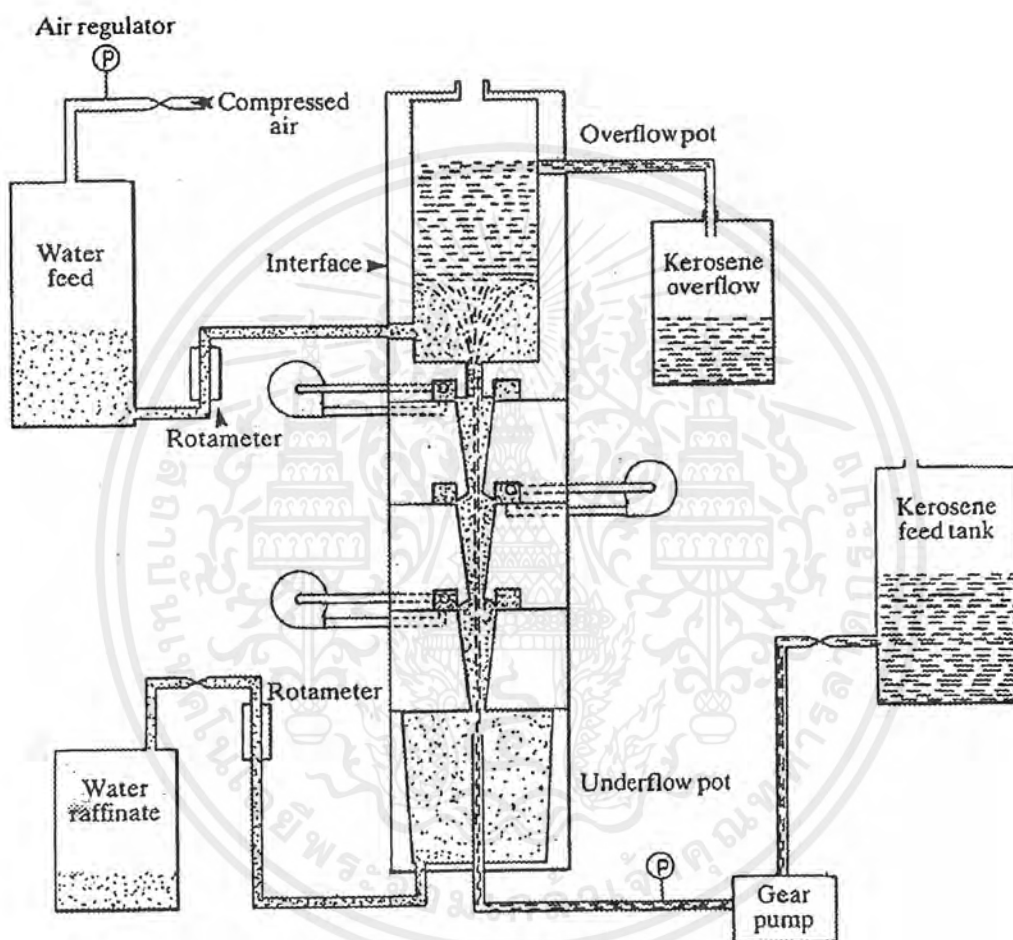
4.3.2 เครื่องสกัดแบบแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal device)

เครื่องสกัดแบบแรงหนีศูนย์กลาง แสดงในรูปที่ 4.3 เครื่องสกัดแบบแรงหนีศูนย์กลาง เป็นได้ทั้งแบบสเตทไวส์และดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งมีหลักการทำงานโดยเฟสหนึ่งกระจายและไหลสวนทางกับเฟสอื่น โดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลางที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างเฟสทั้งสอง พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการออกแบบเครื่องสกัดแบบแรงหนีศูนย์กลาง คือ คุณสมบัติของเฟส ลักษณะภายในของเครื่องสกัดแบบแรงหนีศูนย์กลาง และแรงที่ใช้ในการหมุน

หากจำแนกรูปแบบของอุปกรณ์ประเภทนี้ จะมีทั้งแบบขั้นตอนเดียวและหลายขั้นตอน และมีทั้งแบบที่ติดตั้งในแนวตั้งกับติดตั้งในแนวระดับ ข้อดีของอุปกรณ์ประเภทนี้ ได้แก่

- 1) เวลาที่สารอยู่ในเครื่อง (Residence time) สั้นกว่า
- 2) ปริมาณสารที่บรรจุ (Hold-up) ต่ำกว่า

- 3) ใช้เนื้อที่น้อยกว่า
- 4) ทำความสะอาดง่าย
- 5) สามารถใช้กับสารละลายที่มีช่วงคุณสมบัติทางกายภาพในการใช้งานกว้างกว่า



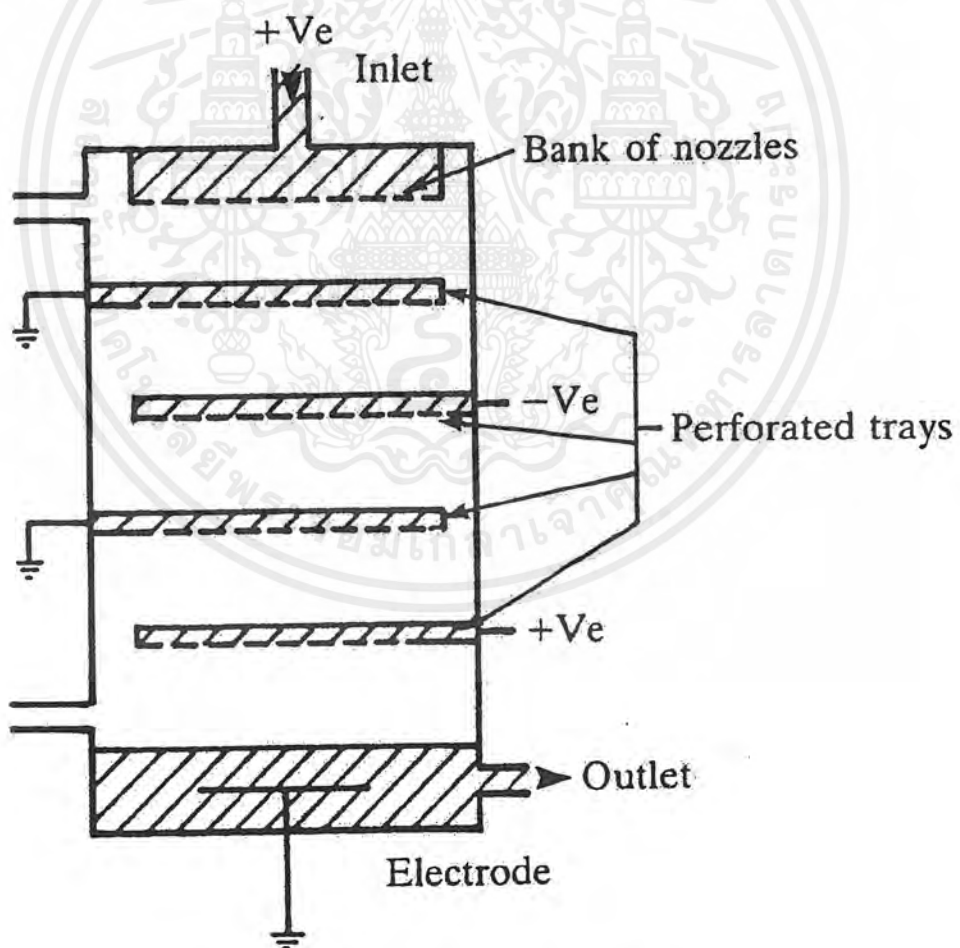
รูปที่ 4.3 เครื่องสกัดแบบแรงหนีศูนย์กลาง [10]

4.3.3 เครื่องสกัดโดยใช้ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic extraction)

เครื่องสกัดโดยใช้หลักไฟฟ้าสถิตย์ แสดงในรูปที่ 4.4 อุปกรณ์แบบนี้อาศัยหลักการของหยดในเฟสกระจายซึ่งถูกให้ประจุและเร่งผ่านเฟสต่อเนื่อง เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า การสั่นสะเทือนของหยดมีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลระหว่างหยดและเฟสต่อเนื่อง ซึ่งหยดที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ภายใน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่องจะเพิ่มขึ้นด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั้น และได้มีการทดสอบพบว่าสัมประสิทธิ์ของเฟสกระจายสำหรับหยดที่กำลังสั้นขึ้นอยู่กับสภาพการไหลแบบปั่นป่วนภายในหยดสาร

เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงแก่หัวฉีด และทันทีที่หยดสารออกจากหัวฉีด หยดสารจะถูกทำให้มีประจุ จากนั้นจะถูกแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงทางไฟฟ้า ทำให้หยดสารมีความเร็วมากขึ้นเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า แทนที่จะตกลงมาตามสนามแรงโน้มถ่วงเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ประจุบนหยดสารยังทำให้เกิดแรงทางกลในทิศทางตั้งฉากออกจากผิวของสาร ดังนั้นแรงดึงดูดระหว่างเฟสที่เป็นหยดสารกับสารที่เป็นเนื้อสารจะลดลง ผลลัพธ์จากแรงทั้งสองจะเพิ่มการสั้นสะเทือนของหยด ซึ่งก็คือ เพิ่มอัตราถ่ายเทมวล



รูปที่ 4.4 เครื่องสกัดโดยใช้ไฟฟ้าสถิตย์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

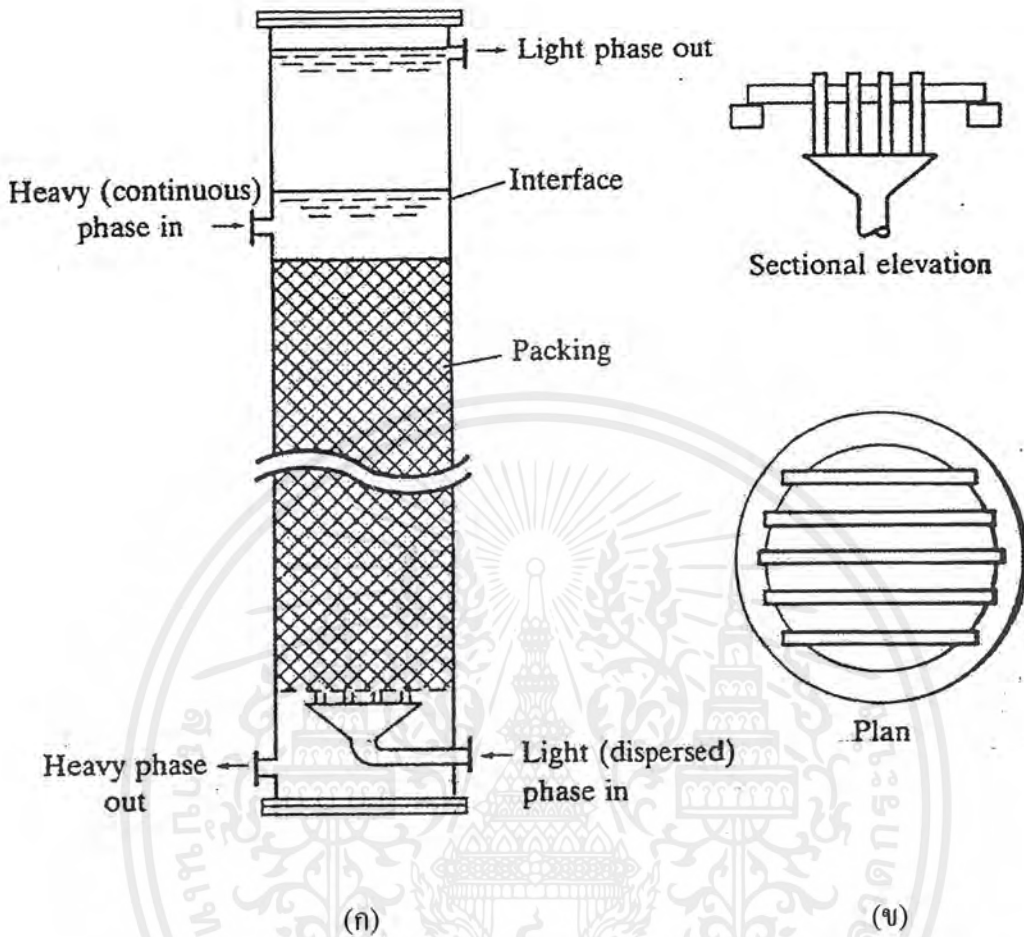
ในหอสกัดที่แยกของเหลวออกจากของเหลว สามารถอัดรายการถ่ายเทมวลจากผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารทั้งสอง ยิ่งหยดเล็กลง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารทั้งสองยิ่งมากขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น

4.3.4 หอสกัดแบบแพค (Packed column)

หอสกัดแบบแพคถูกพัฒนาขึ้นจากหอสกัดแบบเดิม ด้วยการบรรจุวัสดุขนาดเล็กหรือแพกกิง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยจะลดการผสมย้อนกลับ (Backmixing) ของเฟสต่อเนื่องและเพิ่มการถ่ายเทมวลโดยจะแตกหยดของเฟสกระจายที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนและจะช่วยให้การผสมในหยดได้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปชนิดของแพกกิง ได้แก่ Rasching rings และ Beryl saddles ในการเลือกแพกกิงนั้นต้องคำนึงถึงการเปียกของเฟสต่อเนื่อง หอสกัดประเภทนี้เป็นแบบที่ง่าย ราคาถูก และสามารถขยายเส้นผ่านศูนย์กลางได้โดยไม่มีปัญหาในการเดินเครื่อง นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการจำนวนหน่วยในการถ่ายเทมวลน้อย แต่ไม่เหมาะกับของเหลวที่มีสารแขวนลอย

การจัดหอสกัดแสดงดังรูป 4.5 (ก) เพลท (Plate) ที่รองรับการบรรจุควรมีพื้นที่ว่างอย่างน้อยเท่ากับแพกกิง (Packing) รวมทั้งมีตะแกรง (Bar grid) ดังรูป 4.5 (ข) Hamilton และ Pratt [11] ได้เสนอว่าเฟสกระจายเกิดการกระจายอย่างรวดเร็วจนกระทั่งกระจายขนาดที่สภาวะคงตัว (Steady state) อัตราการถ่ายเทมวลจะต่างจากหอสกัดแบบสเปรย์ เนื่องจากเส้นทางที่คลัดเคี้ยว รวมทั้งการลดความเร็ว การเพิ่มความเร็ว การรวมตัว และการกระจาย

ส่วนมากหอสกัดประเภทนี้ จะใช้เซรามิกหรือโลหะ เมื่อใช้กับระบบที่สะอาดดังเช่นระบบน้ำ และเมื่อเฟสน้ำมันเป็นเฟสกระจาย หรืออีกทางเลือกหนึ่งคือใช้พลาสติก เช่น โพลีเอทิลีน หรือโพลีโพรไพลีน เมื่อเฟสน้ำเป็นเฟสกระจาย หากใช้วัสดุสลับกัน เช่น ใช้เซรามิกหรือโลหะบรรจุ เมื่อเฟสน้ำเป็นเฟสกระจาย เฟสกระจายจะไหลบนแพกกิงเหมือนฟิล์มซึ่งแม้ว่ามีความหนาเพียงเล็กน้อย ก็ทำให้การทำงานลดลง



รูปที่ 4.5 หอสกัดแบบแพค [11]

(ก) รูปแบบทั่วไปของหอสกัด

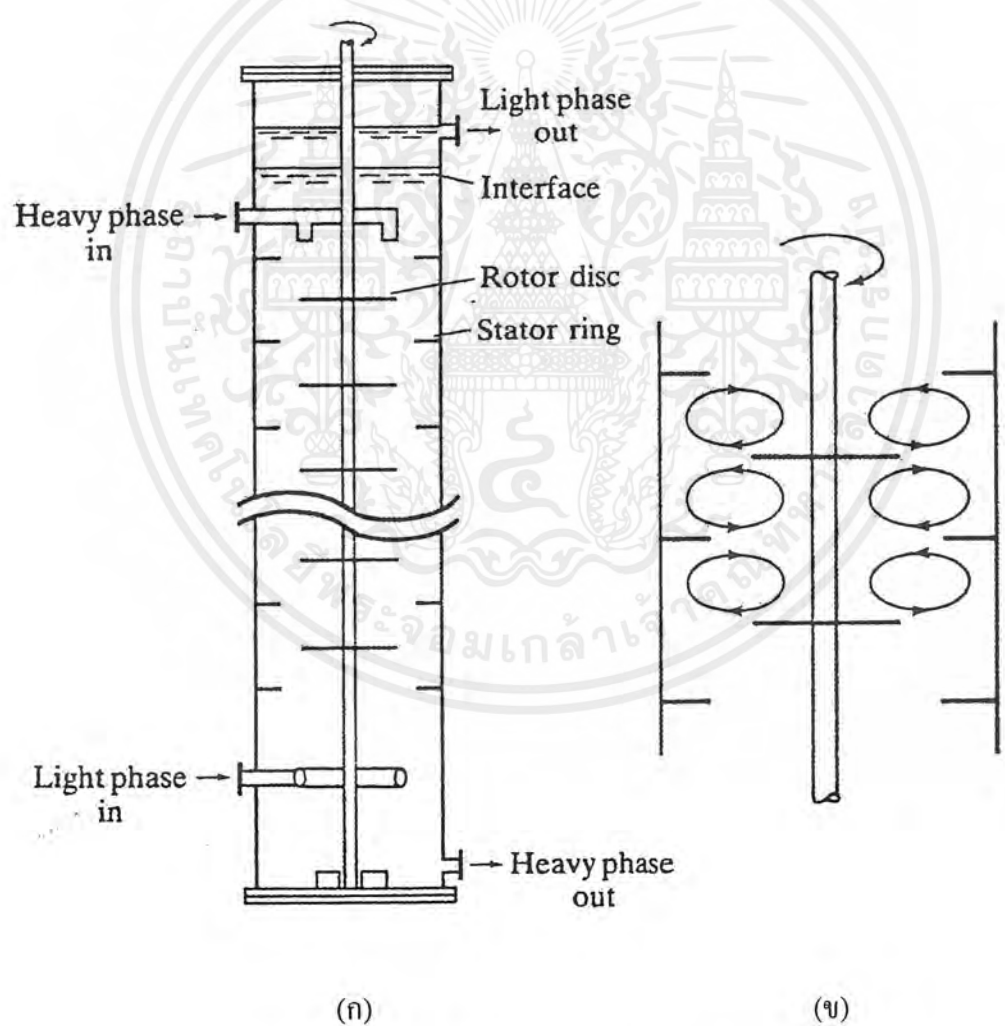
(ข) การแตกเป็นเหมือนตะแกรงและช่วยให้เฟสเบาถูกกระจาย

4.3.5 หอสกัดแบบแกนกลางหมุน (Rotary disc column หรือ RDC)

เครื่องสกัดประเภทนี้ ได้รับการพัฒนาในห้องปฏิบัติการของรอยัลดัตช์/เชลล์ (Royal Dutch /Shell Laboratories) อัมสเตอร์ดัม เมื่อปี ค.ศ. 1948-1952 ดังแสดงรูปที่ 4.6 RDC ประกอบด้วยช่องว่างตามแนวตั้งที่แบ่งเป็นส่วน ๆ โดยวงแหวนสเตเตอร์ (Stator ring) และมีแกนตามแนวตั้ง ขยับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าภายนอก เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์คิดจะน้อยกว่าส่วนเปิดของสเตเตอร์ ดังนั้น โรเตอร์ทั้งหมดสามารถใส่หรือถอดออกเพื่อทำการบำรุงรักษาได้ ในขณะที่

เครื่องสกัดกำลังทำงาน สารทั้งหมดที่อยู่ในหอสกัดจะหมุนและเกิดเป็นคู่กระแสวนตามแนวอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Vortex) ซ้อนทับกันระหว่างโรเตอร์แต่ละคู่ซึ่งอยู่คร่อมสเตเตอร์ดิस्कทั้งสองที่อยู่ติดกัน ดังรูปที่ 4.6 การเกิดกระแสวนนี้จะช่วยทำให้เฟสกระจายมีขนาดหยดเล็กน้อยเมื่อมีการไหลสุทธิของสารประกอบในแนวตั้งซึ่งไหลสวนทางกับเฟสต่อเนื่อง จากการศึกษาของ Kusters [11] พบว่า RDC ที่ใช้ส่วนมากมักมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงต่ำกว่า 1 เมตร จนถึง 4.5 เมตร และ มักใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เนื่องจาก RDC มีโครงสร้างแบบเปิด ทำให้เกิดความสกปรกน้อยกว่าเครื่องสกัดชนิดอื่น จึงสามารถใช้ได้กับระบบที่มีของแข็ง เช่น การทำผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ และการล้างของแข็ง เป็นต้น



รูปที่ 4.6 หอสกัดแบบแกนกลางหมุน [11]

(ก) รูปแบบทั่วไปของหอสกัด

(ข) รูปแบบของการไหลในแต่ละสเตจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคงตัวของกระแสวนเกิดจากผลกระทบของมวลสารในระหว่างโรเตอร์ดิस्कและวงแหวนสเตเตอร์ที่เหมาะสม นอกจากนี้ควรมีพื้นที่ว่างเพียงพอในการไหลตามแนวตั้ง การเลือกระยะความสูงของแต่ละส่วนควรทำอย่างระมัดระวัง หากสูงเกินไปจะทำให้เกิดกระแสวนที่ไม่เสถียร หากน้อยไปจะลดการเกิดกระแสวน ผลจากการขยายขนาดของเครื่องจะมากกว่าผลจากการเพิ่มความสูงของเครื่องสกัด โดยจะทำให้การถ่ายเทมวลต่อสเตรตเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาที่สารอยู่ในเครื่องเพิ่มขึ้น ในการขยายขนาด ควรใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของหอสกัดอย่างน้อย 7.5 เซนติเมตร แต่ที่นิยมใช้ คือ 10-15 เซนติเมตร รวมทั้งควรแบ่งหอสกัดไม่น้อยกว่า 15 ส่วน ขณะที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่อเนื่อง

4.3.6 เครื่องสกัดแบบพัลส์ (Pulse extractor)

จากข้อมูลที่ผ่านมาพบว่า หอสกัดแบบพัลส์สามารถควบคุมการทำงานง่าย มีความทนทานสูง และมีปริมาตรต่ำกว่าหอสกัดที่มีการกวน แม้ว่าแบบมีเครื่องกวนจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบไม่มีเครื่องกวน พลังงานที่ใช้ในระบบจะนำไปใช้ในการเคลื่อนที่ไปมาของพัลส์ เช่น ชิ้นส่วนของเพลทที่เจาะรูซึ่งมีการเคลื่อนที่ไปมา ขณะที่เฟสของเหลวทั้งสองเฟสสัมผัสกันเมื่อมีการไหลสวนทางกันในหอสกัด

Van Dijck [9] เสนอลักษณะการทำงานของหอสกัดที่มีการพัลส์ 2 แบบ คือ

1) การใช้เพลทที่เจาะรู โดยเพลทดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปมาตามแนวตั้งของหอสกัด เมื่อมีของเหลวไหลผ่าน

2) โครงสร้างภายในของกรอสกัด เช่น แปกกิง และซีฟเพลท (Sieve plate) ซึ่งจะหยุดนิ่งขณะที่ของเหลวถูกพัลส์ด้วยไฮโดรลิกโดยกลไกของพัลส์ภายนอก พลังงานที่ใช้ในการพัลส์จะเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลโดยการเพิ่มพื้นที่สัมผัส หรือจะเกิดความปั่นกวนสูงขึ้นในระบบ โดยการให้ความเร่งและความหน่วงกลับไปกลับมาในของเหลว

ตัวอย่างของหอสกัดแบบพัลส์

4.3.6.1 หอสกัดแบบพัลส์สเปรย์ (Pulsed spray column)

เนื่องจากหอสกัดแบบสเปรย์เป็นเครื่องสกัดที่มีลักษณะเป็นท่อยาววางเปลา และมิของเหลว 2 เฟสไหลสวนทางกัน โดยเฟสกระจายถูกฉีดกระจายผ่านของเหลวชนิดที่สอง ซึ่งเรียกว่า เฟสหลัก โดยที่หยดอาจจะไหลผ่านขึ้นหรือลง ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเฟสกระจาย เมื่อเทียบกับเฟสหลัก เครื่องสกัดประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้ เพราะสามารถใช้ได้กับของเหลวที่มีความสกปรกและมีการกัดกร่อน ซึ่งไหลผ่านด้วยอัตราการไหลที่สูง นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ง่าย ราคาถูก และมีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง ดังนั้นประสิทธิภาพของหอสกัดแบบสเปรย์สามารถเพิ่มขึ้นได้ หากเพิ่มอัตราการไหล

สำหรับการขยายขนาดและการออกแบบ Luric และ Sharer กล่าวว่า การพัลส์ มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกของหอสกัดแบบสเปรย์เพียงเล็กน้อย โดยเฉพาะที่การพัลส์ต่ำ ๆ O'Brien [9] รายงานว่า ประสิทธิภาพของเครื่องจะสูงขึ้นเมื่อความถี่พัลส์สูงขึ้น

4.3.6.2 หอสกัดแบบพัลส์แพค (Pulsed packed column)

เนื่องจากหอสกัดแบบสเปรย์มีประสิทธิภาพต่ำ การเพิ่มประสิทธิภาพของหอสกัดแบบสเปรย์สามารถทำได้โดยการใส่แพกกิงในหอสกัดแบบสเปรย์ ชนิดของแพกกิง ได้แก่ Raching Rings และ Bearl Saddles นอกจากนี้ยังเพิ่มการพัลส์เข้าไปในหอสกัดแบบแพคนี้ด้วย เรียกว่า หอสกัดแบบพัลส์แพค ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวล เนื่องจากการกระจายตัวของแบบที่มีการพัลส์จะดีกว่าแบบที่ไม่มีการพัลส์ เฟลทที่มีรูจะถูกคิดไว้ที่ส่วนบนเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่และการปรับแนวของแพกกิงเนื่องจากการพัลส์

เครื่องกำเนิดพัลส์ (Pulsation generator) ต้องแข็งแรงและมีคุณภาพสูงเพียงพอที่จะทำให้องค์ของเหลวเคลื่อนที่ หน่วยกระตุ้นทางกลจะอยู่ในรูปเครื่องสูบลม (Pump) ที่มีลูกสูบ ซึ่งจะยกขึ้นโดยตรงจากพื้นของหอสกัด หรือในรูปลูกเบี้ยว หรือรูปเบลโลว์ (Bellow)

Thronton [9] ได้เสนอว่า แพกกิงที่ทำจากพอลิเอทิลีนจะไม่เปื่อยในสารละลายน้ำ ซึ่งจะมีความจุและอัตราการถ่ายเทมวลสูงกว่าแพกกิงที่ทำจากเซรามิก การพัลส์จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

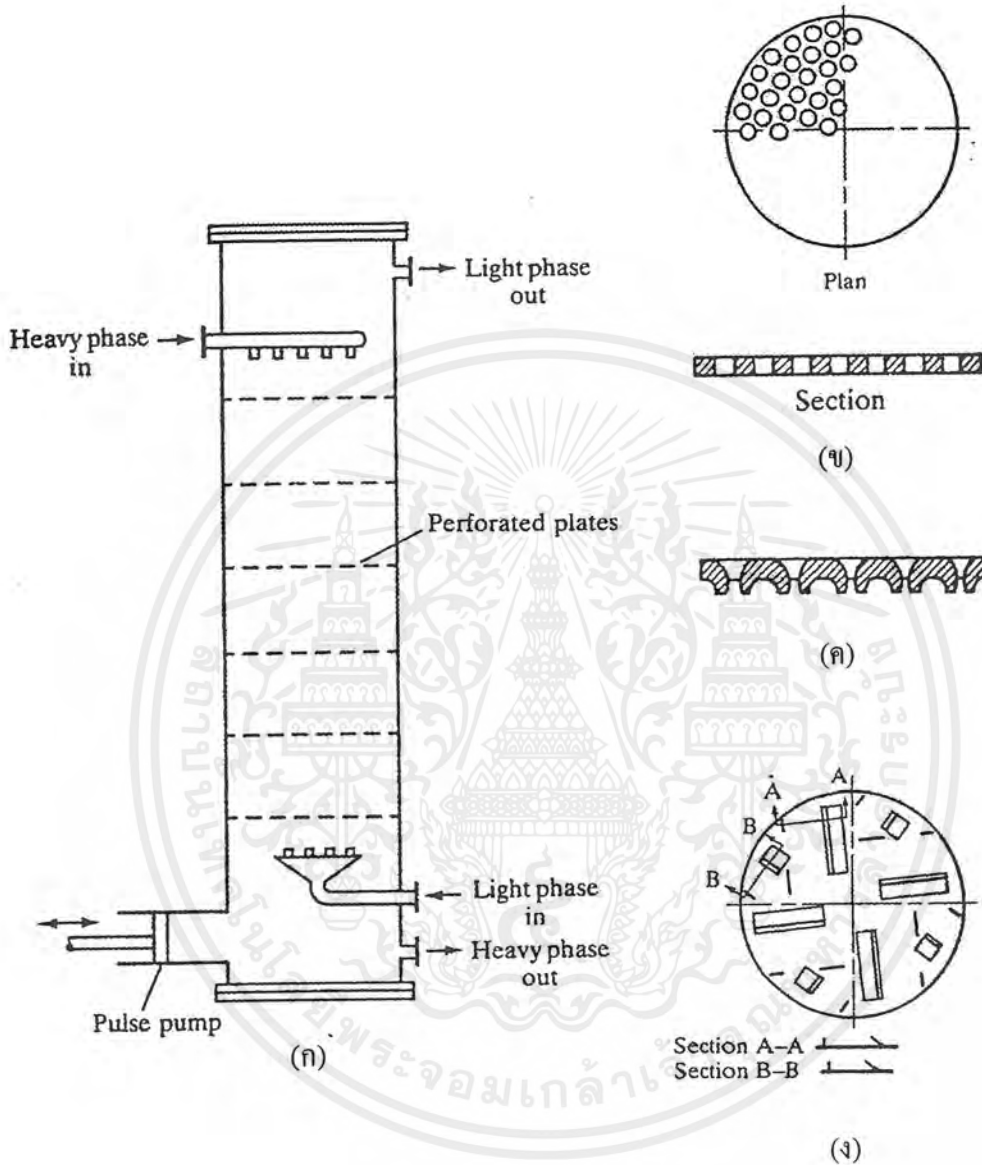
ลดขนาดหยดของเฟสกระจาย เพิ่ม Hold-up และเพิ่มพื้นที่ระหว่างผิวสัมผัสสำหรับการถ่ายเทมวล การพัลส์จะทำให้เกิดอิมัลชันเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการไหลต่อพื้นที่สูงสุด (Throughput) ลดลง

4.3.6.3 หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท (Pulsed perforated plate column)

การพัลส์จะเป็นแบบที่มีการรวมตัวกันแล้วกระจายตัวใหม่เข้าไปเข้ามา (Coalescence-redispersion recycle) ในของเหลวทั้งสองเฟส การเคลื่อนตัวของเฟสกระจายจากเพลทหนึ่ง ไปอีกเพลทหนึ่ง จะมีการรวมตัวเหนือหรือต่ำกว่าของอีกเพลทหนึ่งเกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับว่าของเหลวหนักหรือเบาเป็นเฟสกระจาย ชั้นที่ถูกรวมตัวนี้ไม่มีแรงเพียงพอที่จะทำให้ของเหลวผ่านแผ่นรูพรุนได้ เพราะจะมีแรงดึงระหว่างผิวหน้า จนกระทั่งจะมีการพัลส์ขึ้นไปหรือลงมาอีก ซึ่งจะเป็นแรงดันให้เฟสกระจายผ่านแผ่นเจาะรูพรุนขึ้นไปในเพลทต่อไป ดังนั้นในการทำงานที่มีประสิทธิภาพของหอสกัดแบบพัลส์ เฟสทั้งสองจะไหลจากเพลทหนึ่งไปยังอีกเพลทหนึ่ง โดยจะมีการกระจายตัวและรวมตัวกัน หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท แสดงดังรูปที่ 4.7

ข้อดีของหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท

- 1) การทำงานมีการยืดหยุ่นดีจะมีลักษณะของพัลส์เปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบ
- 2) สามารถใช้ได้กับกระบวนการที่มีความแตกต่างของความหนาแน่นเพียงเล็กน้อย
- 3) สามารถขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ง่าย



รูปที่ 4.7 หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท [11]

- (ก) รูปแบบของหอสกัดโดยทั่วไป
- (ข) เพลทแบบแผ่นราบ (Flat plate)
- (ค) เพลทแบบมีรูยื่นออกมา (Plate with protruded holes)
- (ง) เพลทแบบหมุน (Swirl plate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ชุดหอสกัดแบบพัลส์สำหรับสกัดแอร์ที่ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์ [5]

ชุดหอสกัดแบบพัลส์ประกอบด้วยหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท เครื่องสูบมิติจริง และเครื่องช่วยกำเนิดพัลส์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.4.1 หอสกัด

ทำด้วยท่อแก้วหนา 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 37 มิลลิเมตร ยาวท่อนละ 40 เซนติเมตร จำนวน 6 ท่อน วางต่อกันในแนวตั้ง ท่อแก้วแต่ละท่อนถูกยึดให้ต่อกันด้วยหน้าแปลนโลหะสแตนเลสและลวดสาแทรก หน้าแปลนที่รองรับปลายท่อแก้วแต่ละด้านทำเป็นบ่า และมีปะเก็น PTFE (เทฟลอน) หนา 6 มิลลิเมตร เซาะร่องลึก 3 มิลลิเมตร รองรับปลายท่อแก้วกับบ่าหน้าแปลน ส่วนปลายบนสุดและล่างสุดของหอสกัด ใช้ท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 70 มิลลิเมตร ยาว 40 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร รวมความสูงของตัวหอสกัดและปลายบน-ล่างประมาณ 3.43 เมตร ภายในตัวหอสกัดมีแผ่นโลหะสแตนเลสหนา 0.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร พื้นที่เจาะรู 30% จำนวน 50 แผ่น แต่ละแผ่นวางเรียงห่างกันแผ่นละ 5 เซนติเมตร หอสกัดมีปริมาตรรวมประมาณ 5 ลิตร

4.4.2 เครื่องสูบแบบมิติจริง (Metering pump)

ใช้สำหรับสูบส่งของเหลวเข้าสู่หอสกัด เครื่องสูบที่ใช้เป็นชนิด 2 หัว (Double head) หัวหนึ่งของเครื่องสูบจะถูกใช้สำหรับส่งของเหลวชั้นน้ำ และอีกหัวหนึ่งของเครื่องสูบจะใช้สำหรับส่งของเหลวชั้นน้ำมัน

4.4.3 เครื่องกำเนิดพัลส์

เครื่องกำเนิดพัลส์เป็นแบบใช้อากาศโดยตรง เชื่อมต่อจากเครื่องอัดอากาศ (Air-compressor) เข้าสู่หอสกัดทาง Pulse leg ซึ่งทำด้วยหลอดแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 3.5 เมตร

เครื่องสกัดที่ใช้ในโรงงาน เป็นแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อแก้ว-

ยาว ภายในบรรจุด้วยเพลทเจาะรู (Perforated plate) เฟสของเหลวหนักและเฟสของเหลวเบา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลสวนทางกัน ของเหลวหนึ่งเป็นเฟสกระจายและอีกของเหลวหนึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง การพัลส์ทำได้โดยตรงด้วยลมผ่านทางฐานหอสกัด และผ่านไปตามความยาวหอสกัด

เฟสกระจายจะไหลผ่านรูของเพอร์ฟอเรตเพลท และกระจายในเฟสต่อเนื่องอีกครั้ง การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทมวลทำได้โดยการวัดความดันเป็นระยะ ๆ ตัวแปรที่ใช้ควบคุมการพัลส์ คือ แอมพลิจูด และความถี่ โดยแอมพลิจูดเป็นระยะที่เพิ่มขึ้นของสารละลายในหอสกัดในการพัลส์แต่ละครั้ง ส่วนความถี่นั้นเป็นความถี่ในการพัลส์ โดยมีหน่วยเป็นรอบ/นาที และถูกควบคุมโดย Electronic timer ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับตั้งค่าความถี่ที่ใช้ในการทำการพัลส์ของเหลวภายในหอสกัด

สิ่งสำคัญในการกำหนดค่าแอมพลิจูดและความถี่สำหรับการทดลอง คือ ช่วงการทำงานที่แตกต่างกันในหอสกัด ในทางปฏิบัติจะใช้ช่วงการทำงานแบบอิมัลชัน เพราะเป็นบริเวณที่ให้อัตราการถ่ายเทมวลดีที่สุด

บทที่ 5

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแบบจำลองการสกัดแบบกะ

5.1 ความรู้พื้นฐานของแบบจำลองการสกัดแบบกะ [12]

แบบจำลองการสกัดแบบกะเป็นวิธีการทดลองการสกัดในระดับห้องทดลองโดยใช้กรวยแยก เพื่อจำลองกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องและไหลสวนทางกัน วัตถุประสงค์หลักในการใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ คือ การหาตัวทำละลายและสภาวะการสกัดที่เหมาะสม เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้กับการสกัดในระดับอุตสาหกรรม สำหรับโครงการนี้ได้ใช้แบบจำลองการสกัดในการศึกษาผลของการป้อนกลับต่อประสิทธิภาพในการสกัดชาคั่วหยาบ และหาอัตราส่วนของสารป้อนสารสกัด และสารป้อนกลับที่เหมาะสมในการสกัดชาคั่วหยาบ นอกจากนี้การใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะยังมีประโยชน์ในด้านการประหยัดสารเคมี ความสะดวกในการปฏิบัติงาน และสามารถควบคุมกระบวนการได้ง่าย

5.1.1 ข้อควรพิจารณาในการศึกษาแบบจำลองการสกัดแบบกะ

ก. การใช้กรวยแยกเพื่อศึกษาแบบจำลองการสกัดแบบกะ มีตัวแปรที่ต้องพิจารณาหลายตัวแปร เช่น

1) ลักษณะการเขย่ากรวยแยก

ในการสกัดโดยใช้กรวยแยกสำหรับแบบจำลองการสกัดแบบกะนี้ จะใช้ข้อสมมติที่ว่า “การสกัดในกรวยแยกแต่ละครั้ง หลังทำการเขย่าสารจะเข้าสู่สมดุล” หรือเป็นการสกัดแบบอุดมคติ ดังนั้นลักษณะของการเขย่าจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยทั่วไปมักใช้เครื่องเขย่าในการเขย่าสารละลายในกรวยแยกเพื่อให้เข้าสู่สมดุล นอกจากนี้การเขย่ากรวยแยกโดยใช้มือก็สามารถทำได้ แต่ถ้าเขย่าแรงเกินไปอาจทำให้สมดุลผิดพลาดได้ ดังนั้นในบางครั้งผู้ทดลองจะต้องทำการ

ศึกษาเบื้องต้นถึงระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลก่อนใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ตัวถูกละลายไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย เช่น การแยกโลหะบางประเภท

2) การถ่ายเทสารออกจากกรวยแยก

ในส่วนของการถ่ายเทสารออกจากกรวยแยกนี้ จะถือว่าสามารถถ่ายเทได้สมบูรณ์ ดังนั้นสิ่งสำคัญคือการเลือกใช้ขนาดของกรวยแยกที่ไม่เล็กจนเกินไปหรือใช้ปริมาณสารในการเขย่าไม่น้อยจนเกินไป หากใช้ขนาดของกรวยแยกหรือใช้ปริมาณสารที่เหมาะสมแล้ว การสูญเสียของสารระหว่างการถ่ายเทก็จะไม่มีผลกระทบต่อผลการทดลองมากนัก

ข. อัตราส่วนของสารที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองการสกัดแบบกะ

การใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะนี้ ต้องใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารต่าง ๆ ได้แก่ ตัวทำละลาย ตัวถูกละลาย และสารป้อนกลับ เท่ากับอัตราส่วนของอัตราไหลแบบต่อเนื่องในหอสกัดจริง

5.2 แบบจำลองการสกัดแบบกะสำหรับกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องและไหลสวนทางกัน [12]

พิจารณาจากรูปที่ 5.1 รูปด้านบน คือ แบบจำลองการสกัดแบบกะที่ใช้จำลองกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องและไหลสวนทางกันจำนวน 6 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปด้านล่าง วงกลมในรูปด้านบน แต่ละวงจะใช้แทนการสกัดในกรวยแยก เริ่มจากกรวยแยก a สารป้อน F จะถูกสกัดด้วยตัวทำละลาย E ได้ส่วนสกัด E_u และส่วนคงเหลือ R_u ซึ่งจะถูกนำไปสกัดต่อด้วยตัวทำละลาย E อีกในกรวยแยก b ส่วนสกัดที่ได้จากกรวยแยก b จะนำไปสกัดต่อกับสารป้อน F ในกรวยแยก g และส่วนคงเหลือจากกรวยแยก b จะถูกนำไปสกัดในกรวยแยก c ต่อไป

ในการพิจารณาว่าจำนวนรอบการสกัด (Cycle) ที่ใช้เพียงพอหรือไม่ที่จะทำให้แบบจำลองการสกัดแบบกะสามารถจำลองหรือแสดงคุณสมบัติของสาร เช่น ความเข้มข้น น้ำหนัก หรือคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องและไหลสวนทางกันที่สภาวะคงที่ (Steady state) สามารถตรวจสอบได้จากการวัดความเข้มข้นหรือคุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างของสารที่ต้องการจากส่วนคงเหลือที่ออกมาทางด้านขวามือของแบบจำลอง เช่น R_f ที่รอบการสกัดเท่ากับ 1

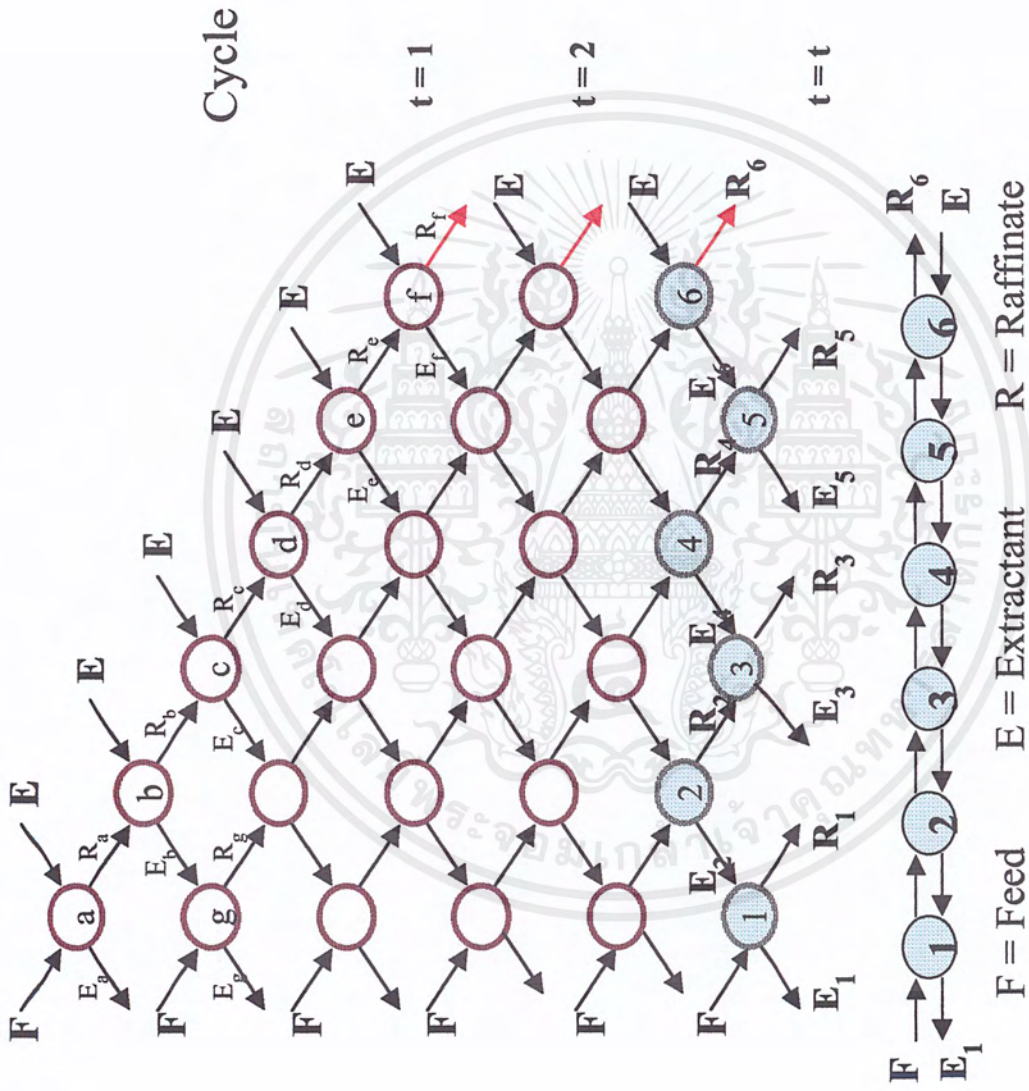
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ R_c ที่รอบการสัปดาห์เท่ากับ t ดังรูปที่ 5.1 เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการสัปดาห์แล้ว ความเข้มข้นในส่วน
 คงเหลือนี้ใกล้เคียงกับความเข้มข้นในส่วนคงเหลือของรอบการสัปดาห์ก่อนหน้า แสดงว่าการสัปดาห์ถึง
 สภาวะคงที่แล้ว

5.2.1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองการสัปดาห์แบบกะ

- ก. ข้อมูลสมมูลได้จากการวัดความเข้มข้นในส่วนสัปดาห์และส่วนคงเหลือที่ได้จากการ
 สัปดาห์ในกรวยแยกแต่ละอัน
- ข. สามารถนำข้อมูลความเข้มข้นที่สภาวะคงที่ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย
 และค่าการเลือกได้





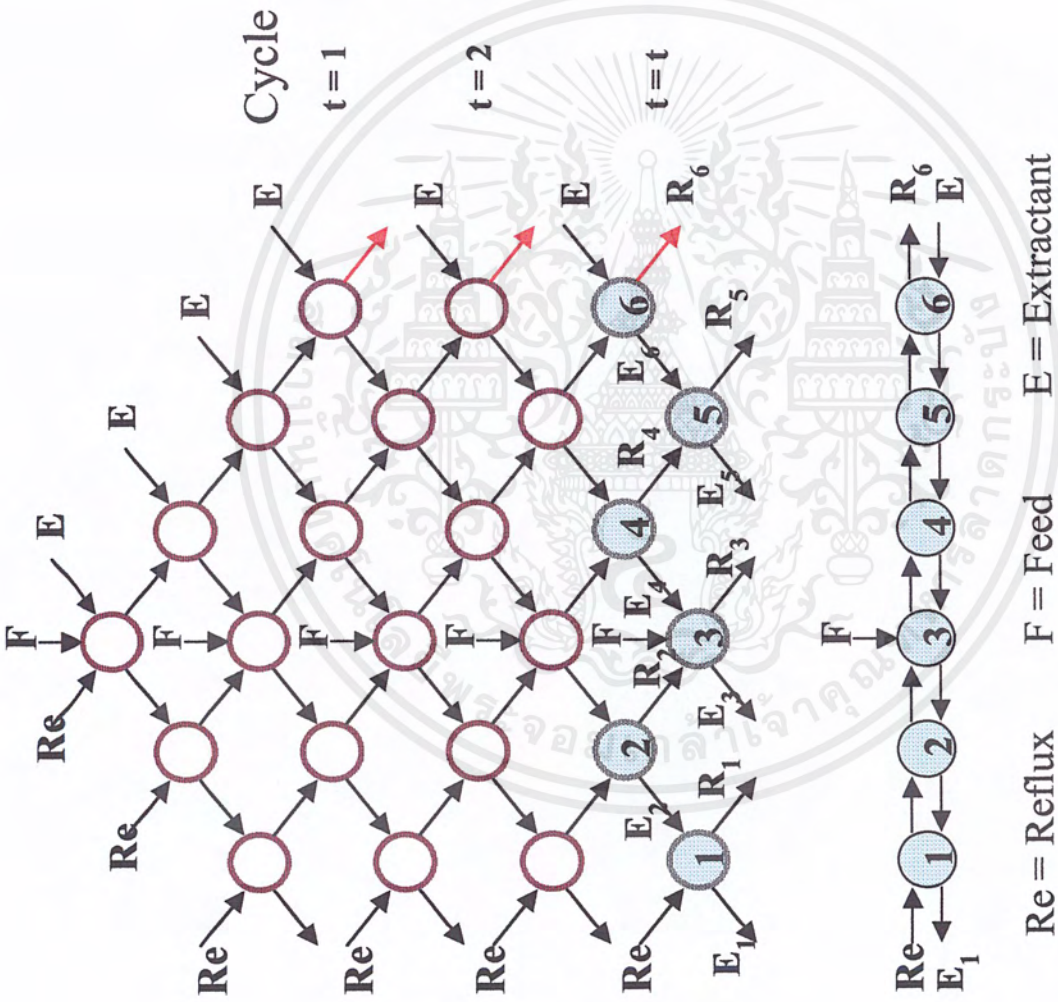
รูปที่ 5.1 แบบจำลองการสกัดแบบกะสำหรับกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องและไหลสวนทางกัน [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การสกัดแบบแบ่งส่วน

พิจารณาจากรูปที่ 5.2 รูปด้านบน คือ แบบจำลองการสกัดแบบกะประเภทการสกัดแบบแบ่งส่วน (Fractional extraction) สามารถใช้จำลองกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องและไหลสวนทางกันแบบมีการป้อนกลับสำหรับการทดลองนี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ด้านล่าง โดยหลักการของแบบจำลองการสกัดแบบนี้จะเหมือนกับหลักการดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.2





รูปที่ 5.2 แบบจำลองการสกัดแบบกะประเภทการสกัดแบบแบ่งส่วน [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

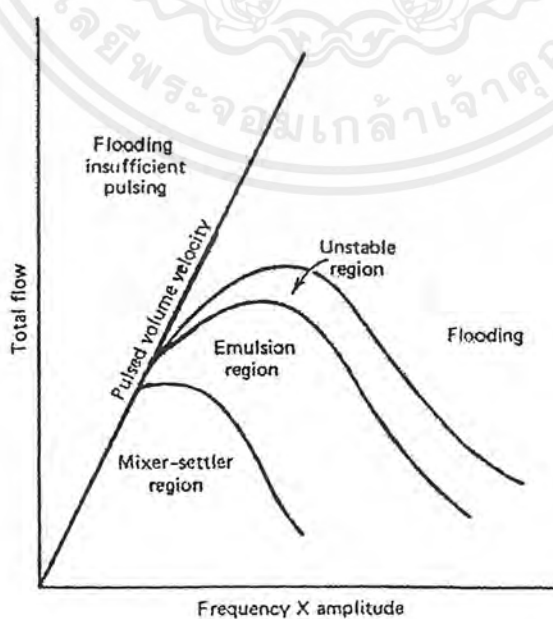
บทที่ 6

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการสกัด

6.1 สถานะการทำงานของหอสกัดแบบพัลส์ [13]

โดยทั่วไปการสกัดในหอสกัดแบบไหลสวนทางและต่อเนื่องกันเมื่อให้เฟสที่ความหนาแน่นน้อยกว่ากว่าเช่นเฟสน้ำมันเป็นเฟสกระจาย และเฟสที่ความหนาแน่นมากกว่าหรือเฟสน้ำเป็นเฟสต่อเนื่อง พบว่าสถานะการท่วมของหอสกัด คือ สถานะที่เฟสน้ำมันถูกเฟสน้ำที่ไหลสวนทางกันนั้นพาออกไป จะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารภายในหอสกัดไม่ดี

Sege และ Woodfield [13] ได้ศึกษาลักษณะการทำงานของคอลัมน์แบบพัลส์พบว่าเมื่ออัตราการไหลของของเหลวทั้งสองเฟสคงที่จะพบว่ามีสถานะการทำงานที่เสถียรอยู่สามสถานะ และมีสถานะที่ทำให้เกิดการท่วมอยู่สองสถานะขึ้นอยู่กับความถี่ในการพัลส์และแอมพลิจูด ความถี่ที่ใช้



รูปที่ 6.1 ลักษณะการทำงานในภาวะต่างๆ ของหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอรตเพลท [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปอยู่ที่ 1-3 เฮิร์ตซ์ (ความถี่ที่ใช้จะลดลง เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอสกัดใหญ่ขึ้น) และ แอมพลิจูดที่ใช้โดยทั่วไปจะไม่เกินช่วงความถี่ระหว่างเพลท

สภาวะการทำงานของหอสกัดที่ความถี่คู่กับแอมพลิจูด และอัตราการไหลรวมต่าง ๆ กัน แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 และ 6.2 แบ่งออกเป็น 5 บริเวณ ได้แก่

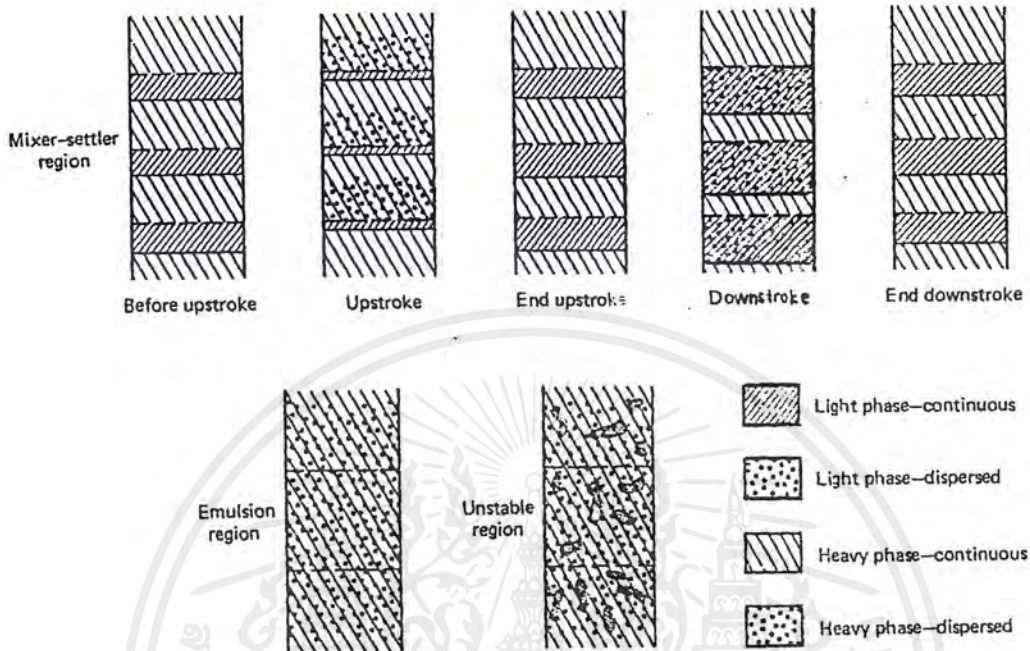
1) บริเวณมิกเซอร์เซทเทิลอร์ (Mixer-settler region) : เป็นบริเวณที่มีอัตราการไหลและการพัลส์ต่ำ ทำให้เฟสกระจายรวมตัวกันเป็นชั้นอยู่ได้เพลท (อาจอยู่ด้านบนถ้าของเหลวที่มีความหนาแน่นมากกว่าเป็นเฟสกระจาย) บริเวณนี้เราจะเรียกว่าบริเวณมิกเซอร์เซทเทิลอร์ เนื่องจากของเหลวจะถูกผสมและเกิดการรวมตัวเช่นเดียวกับในเครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซทเทิลอร์

2) บริเวณที่เกิดภาวะการท่วมเนื่องจากการพัลส์ไม่เพียงพอ (Flooding insufficient pulsing region) : หอสกัดเกิดภาวะการท่วมเนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลรวมของของเหลวมากกว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการพัลส์ที่ความถี่คู่กับแอมพลิจูดนั้น ๆ ที่บริเวณนี้สภาวะการทำงานจะมีความเสถียรแต่การถ่ายเทมวลสารไม่ดี

3) บริเวณอิมัลชัน (Emulsion region) : เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวและเพิ่มการพัลส์จะทำให้เฟสกระจายเกิดกระจายตัวเป็นของเหลวหยดเล็ก ๆ ใต้อย่างสม่ำเสมอ การถ่ายเทมวลสารในบริเวณนี้เกิดขึ้นดีที่สุดในรูป

4) บริเวณที่เกิดภาวะการท่วม : หอสกัดเกิดภาวะการท่วมเนื่องจากการเพิ่มพัลส์หรือความถี่คู่กับแอมพลิจูดมากเกินไปที่อัตราการไหลรวมคงที่ ที่สภาวะการทำงานนี้ขนาดของหยดของเหลวจะเปลี่ยนไปในการพัลส์แต่ละครั้ง

5) บริเวณที่ไม่เสถียร (Unstable region) : เป็นช่วงระหว่างบริเวณอิมัลชันและบริเวณที่เกิดภาวะการท่วม คือ อิมัลชันที่เกิดเริ่มรวมตัวกันเป็นหยดที่ใหญ่ขึ้น และเริ่มเกิดการท่วมเนื่องจากความเร็วปลายของหยดของเหลวมีค่าน้อยกว่าความเร็วเชิงเส้นในท่อเปล่าของเฟสต่อเนื่อง ทำให้ของเหลวในเฟสกระจายนี้ถูกดึงออกจากหอสกัดโดยเฟสต่อเนื่อง



รูปที่ 6.2 ลักษณะของ Droplet pattern ในภาวะการทำงานต่าง ๆ [13]

6.2 การเปียกตัว [14]

ผลกระทบของการเปียกตัวของเพลทด้วยของเหลวต่อประสิทธิภาพในการสกัดแยกสารพบว่า ประสิทธิภาพของคอลัมน์จะเพิ่มขึ้นถ้าเพลทเปียกตัวด้วยเฟสต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้เฟสกระจาย มีการสร้างตัวเป็นหยดเล็ก ๆ ได้ดี ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวทั้งสองเฟสเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าเพลทเปียกตัวด้วยเฟสกระจาย ประสิทธิภาพของคอลัมน์จะต่ำลง

พฤติกรรมการเปียกตัวของแข็งด้วยของเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

- 1) พฤติกรรมการเปียกตัวได้ดีของของแข็งด้วยน้ำ เรียกว่า Hydrophilic เพลทที่มีคุณสมบัตินี้ ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะสเตนเลส
- 2) พฤติกรรมการเปียกตัวได้ดีของของแข็งด้วยน้ำมัน เรียกว่า Hydrophobic เพลทที่มีคุณสมบัตินี้ ได้แก่ เทฟลอน

6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดสารละลายแเรเอิร์ทไนเทรตด้วยสารละลายไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าด

สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้พัฒนาการสกัดธาตุหายากจากแรมโมนาไซด์ ซึ่งธาตุหายากถูกเตรียมอยู่ในรูปสารละลายแเรเอิร์ทไนเทรต โดยใช้สารละลาย 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดที่อิ่มตัวด้วยกรดไนตริก 5 โมลาร์เป็นสารสกัด สารละลายแเรเอิร์ทไนเทรตมีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงพอ ซึ่งได้แก่ La, Pr, Nd, Sm, Y และ Gd

จากการทดลองของปรารณา คิวสุวรรณ และ สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข [3] พบว่าหากความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายแเรเอิร์ทผสมอยู่ในช่วง 3.5-7.2 โมลาร์ ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงหรือแเรเอิร์ทกลุ่มหนักจะถูกสกัดได้ดี แต่เนื่องจากสารละลายแเรเอิร์ทไนเทรตที่ใช้สกัดมีปริมาณ La และ Nd ซึ่งจัดอยู่ในแเรเอิร์ทกลุ่มเบาในปริมาณที่สูงมาก ขณะที่ปริมาณของ Y ซึ่งจัดอยู่ในแเรเอิร์ทกลุ่มหนักมีอยู่ในปริมาณน้อย ดังนั้นในการสกัดนี้ ระบบที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายแเรเอิร์ทผสมสูง

สำหรับประสิทธิภาพการสกัด สามารถดูได้จากค่าการเลือก (Selectivity, α) สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient)

จากการศึกษาของ Smutz, Bochinski และ Spedding [15] พบว่า

กรณีที่ 1 สำหรับสารละลายที่มีแเรเอิร์ทไนเทรตมากกว่า 1 ชนิด และมีความเข้มข้นของแเรเอิร์ทไนเทรตค่อนข้างมาก

1) ค่า α จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นรวมของแเรเอิร์ทเท่านั้น โดยจะไม่ขึ้นกับสัดส่วนของแเรเอิร์ทที่มีอยู่ เมื่อสารละลายแเรเอิร์ทมีความเข้มข้นของกรดไนตริกต่ำๆ

2) การถ่ายเทมวลจากเฟสน้ำไปยังเฟสน้ำมันจะลดลง ถ้าในสารละลายแเรเอิร์ทไนเทรตหรือเฟสน้ำมันมีกรดไนตริกอยู่มาก

3) การถ่ายเทมวลจากเฟสน้ำไปยังเฟสน้ำมันจะลดลง ถ้ามีสารพวก Salting-out agent เช่น $Al(NO_3)_3$

กรณีที่ 2 สำหรับสารละลายที่มีแเรเอิร์ทไนเทรตมากกว่า 1 ชนิดและมีความเข้มข้นของแเรเอิร์ทไนเทรตต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การถ่ายเทมวลจากเฟสน้ำไปยังเฟสน้ำมันจะเพิ่มขึ้น ในสารละลายแเรเอิร์ทไนเทรตหรือเฟสน้ำมันที่มีกรดไนตริกอยู่มาก

2) การถ่ายเทมวลจากเฟสน้ำไปยังเฟสน้ำมันจะเพิ่มขึ้น ถ้ามีสารพวก Salting-out agent เช่น $Al(NO_3)_3$

Salting-out agent คือ เกลือที่เติมลงในสารละลายน้ำเพื่อลดความสามารถในการละลายของสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ไอออนของเกลือนี้จะไปจับกับโมเลกุลของน้ำทำให้น้ำไม่สามารถจับกับโมเลกุลของตัวถูกละลายได้ จึงสามารถทำให้เกิดการแยกของตัวถูกละลายจากน้ำได้

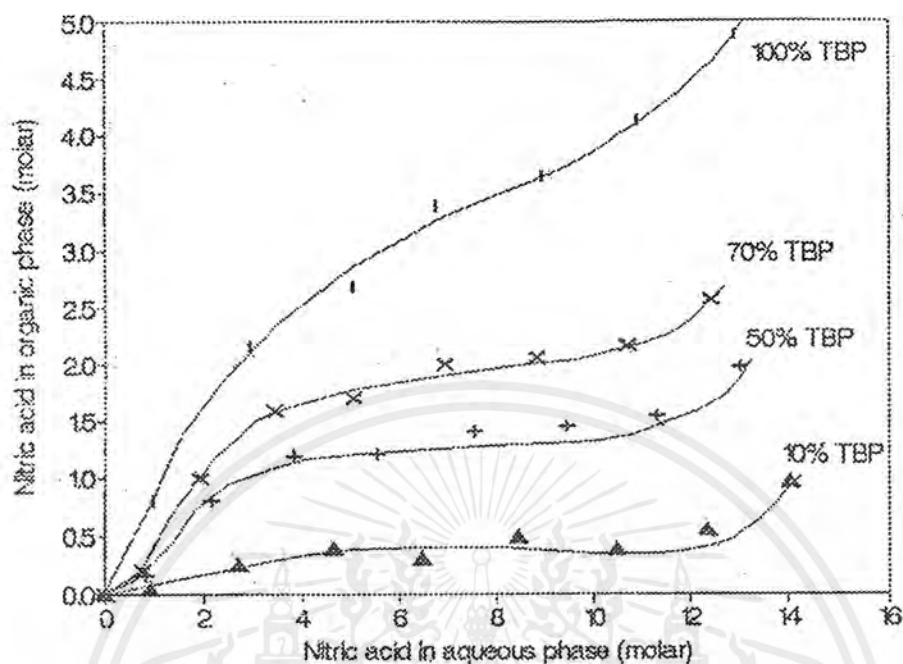
6.3.1 การเลือกตัวทำละลาย [3]

ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดธาตุหายากซึ่งอยู่ในแร่โมนาไซต์ในโครงการนี้ คือ สารละลายไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ถูกเจือจางด้วยน้ำมันก๊าด (Kerosene) โดยธาตุหายากหรือแเรเอิร์ทจะถูกเตรียมในรูปของสารละลายแเรเอิร์ทไนเทรต ทั้งสารละลายไตรบิวทิลฟอสเฟตและสารละลายแเรเอิร์ทไนเทรตจะถูกป้อนเข้าหอสกัด โดยที่สารละลายไตรบิวทิลฟอสเฟตซึ่งเป็นเฟสน้ำมันจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของหอสกัด ส่วนสารละลายแเรเอิร์ทไนเทรตซึ่งเป็นเฟสน้ำจะถูกป้อนเข้าทางตอนบนของหอสกัด สารละลายทั้งสองเฟสจะไหลสวนทางกันภายในหอสกัดและเกิดการถ่ายเทมวลของแเรเอิร์ทไนเทรตที่ต้องการสกัดจากเฟสน้ำมายังเฟสน้ำมัน

ตัวแปรต่าง ๆ ของชนิดตัวทำละลายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดมีดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของสารละลาย TBP (%TBP)
- 2) ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลาย TBP

ปรารภณา คิวสุวรรณ และสุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข ได้ทำการทดลองศึกษาเกี่ยวกับผลของการละลายของกรดไนตริกในเฟสของสารละลาย TBP และในเฟสของน้ำ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของ TBP ในน้ำมันก๊าด เท่ากับ 10, 50, 70 และ 100% โดยปริมาตร ซึ่งสำหรับที่ 100% โดยปริมาตรนั้น ได้นำมาจากรายงานผลการทดลองของ Foos และ Wilhelm โดยกราฟแสดงผลการทดลอง เป็นดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไนตริกในเฟสน้ำกับเฟสน้ำมัน [3]

จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ จะมีช่วงที่กรดไนตริกไม่เกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสน้ำและเฟสน้ำมัน เมื่อความเข้มข้นในเฟสน้ำเปลี่ยนไป เช่น ที่ 50% TBP เมื่อเฟสน้ำมีความเข้มข้นของกรดไนตริกในช่วง 4-12 โมลาร์ ในเฟสน้ำมันจะมีความเข้มข้นของกรดไนตริกประมาณ 1.1 โมลาร์ สำหรับที่ % TBP อื่น ๆ สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกัน ดังนั้น เพื่อให้การสกัดสารแรเอิร์ทไนเทรตด้วยสารละลาย TBP ไม่มีผลของการถ่ายเทมวลของกรดไนตริกเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงควรเลือกใช้ตัวทำละลายที่มี % TBP ต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ตัวทำละลายที่ % TBP ต่ำ ทำให้เกิดผลดีและผลเสียดังต่อไปนี้

1) ลดปัญหาเรื่องการถ่ายเทมวลของกรดไนตริก ซึ่งอาจมีผลต่อการถ่ายเทมวลของแรเอิร์ทไนเทรต

2) ช่วยให้ความถ่วงจำเพาะของเฟสน้ำมันลดลง เนื่องจาก

- ความถ่วงจำเพาะของ TBP = 0.97
- ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันก๊าด = 0.78

ดังนั้นการใช้ % TBP ต่ำ จะทำให้ความถ่วงจำเพาะของเฟสน้ำมันลดลง ส่งผลให้การแยกตัวของเฟสน้ำและเฟสน้ำมันดีขึ้น

3) ทำให้ความสามารถในการสกัดลดลง เนื่องจากมีความเข้มข้นของ TBP ลดลง แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มอัตราการไหลของตัวทำละลายให้มากขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการล้างตัวทำละลายหากใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้น

ดังนั้น ในการทดลองการสกัดจึงเลือกใช้ % TBP เท่ากับ 50% ซึ่งจะให้ความถ่วงจำเพาะมีค่า 0.88

ในการสกัด ได้ตั้งสมมติฐานเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณว่า “ระหว่างสกัดจะไม่มี การถ่ายเทมวลของกรดไนตริกระหว่างเฟสน้ำและเฟสน้ำมัน และเฟสน้ำกับเฟสน้ำมันจะไม่มี การละลายซึ่งกันและกัน” แต่ในความเป็นจริงเฟสน้ำมันที่ใช้ ละลายในเฟสน้ำที่ใช้ได้น้อยมากอยู่แล้ว ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน แต่เฟสน้ำจะสามารถละลายในเฟสน้ำมันได้ประมาณ 6% โดยน้ำหนัก ดังนั้น เพื่อให้การสกัดเป็นไปตามสมมติฐาน เฟสน้ำมันที่ใช้หรือสารละลาย 50% TBP ในน้ำมัน กัด จึงได้ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยสารละลายกรดไนตริกในน้ำเสียก่อน เพื่อป้องกันมิให้สารละลายกรด ไนตริกมีการถ่ายเทมวลอีก นอกจากนี้กรดไนตริกยังช่วยป้องกันการเกิดอิมัลชันของเฟสน้ำและ เฟสน้ำมันซึ่งจะเป็นปัญหาในการสกัด

6.3.2 การเลือกชนิดเฟสต่อเนื่อง

เนื่องจากเฟลทที่ใช้เป็นโลหะสเตนเลส ซึ่งมีพฤติกรรมการเปียกตัวได้ดีของของแข็งด้วย น้ำ ดังนั้น เพื่อให้เฟสกระจายมีการสร้างตัวเป็นหยดเล็ก ๆ ได้ดี จึงเลือกใช้เฟสน้ำหรือสารละลาย แรเอิร์ทไนเทรตเป็นเฟสต่อเนื่องโดยจะให้เข้าทางด้านบนหอสกัด และให้สารละลาย TBP ใน น้ำมันกัดซึ่งเป็นเฟสกระจายเข้าสู่หอสกัดทางด้านล่าง เพื่อให้เกิดการไหลสวนทางกันระหว่าง เฟสต่อเนื่องและเฟสกระจาย

6.3.3 ผลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายแรเอิร์ทไนเทรตต่อการสกัดแรเอิร์ท [15]

จากข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับผลของกรดไนตริกต่อการสกัดแรเอิร์ทไนเทรต ดังได้กล่าวมา แล้ว สำหรับการสกัดในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแรเอิร์ทไนเทรตสูง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) กรดไนทริกจะช่วยลดการเกิดอิมัลชันระหว่างเฟสน้ำและน้ำมัน
- 2) เมื่อตัวทำละลายที่เลือกใช้เป็น 50% TBP ในน้ำมันก๊าดที่ถูกทำให้อิมัลชันด้วยกรดไนทริกเข้มข้น 5 โมลาร์ จากรูปที่ 6.3 ควรใช้เฟสน้ำที่มีความเข้มข้นกรดไนทริกอยู่ในช่วง 4-10 โมลาร์ เพื่อป้องกันการถ่ายเทมวลของกรดไนทริกระหว่างการสกัดแร่เอิร์ทไนเตรด

แต่จากผลการทดลองของกาญจนา กิตติชนะเจริญ และคณะ [16] ซึ่งได้ทำการทดลองหาความเข้มข้นของกรดไนทริกในเฟสน้ำที่เหมาะสม เมื่อตัวทำละลายที่เลือกใช้เป็น 50% TBP ในน้ำมันก๊าดที่ถูกทำให้อิมัลชันด้วยกรดไนทริกเข้มข้น 5 โมลาร์ พบว่าที่ความเข้มข้นของกรดไนทริกในเฟสน้ำในช่วง 4-10 โมลาร์ ค่าการเลือกจะมีค่าต่ำ ทำให้การแยกแร่เอิร์ทออกเป็นกลุ่มเกิดขึ้นได้ไม่ดีเท่าที่ควร กาญจนา กิตติชนะเจริญ และคณะ จึงได้ทำการทดลองหาความเข้มข้นของกรดไนทริกในเฟสน้ำที่เหมาะสม พบว่า ที่ความเข้มข้นของกรดไนทริกต่ำ ๆ ประมาณ 0.3-1 โมลาร์ สัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกมีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้น ถึงแม้ว่าจะมีการถ่ายเทมวลของกรดไนทริกในระหว่างการสกัดซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของกรดไนทริกมีค่าไม่คงที่ แต่ถ้าในการสกัดมีการใช้สารละลายแร่เอิร์ทผสมที่มีความเข้มข้นของกรดไนทริกต่ำ ๆ จะทำให้ช่วยลดปัญหาผลของความเข้มข้นของกรดไนทริกต่อประสิทธิภาพการสกัดได้ ทั้งนี้เพราะที่ความเข้มข้นของกรดไนทริกต่ำ ๆ จะมีสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกค่อนข้างคงที่ นั่นเอง

- 3) ที่ความเข้มข้นของกรดไนทริกต่ำ ๆ จะทำให้ค่าการเลือก ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแร่เอิร์ทภายในสารละลายแร่เอิร์ทผสม ซึ่งเป็นผลดีที่จะสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในโครงการนี้ไปใช้กับสารละลายแร่เอิร์ทผสมอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ กันได้ดี
- 4) ที่ความเข้มข้นของกรดไนทริกต่ำ ๆ จะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของสารที่ต้องการสกัดได้ดี

6.3.4 ผลของอัตราการใช้ของเฟสน้ำและเฟสน้ำมันต่อประสิทธิภาพในการสกัดแร่เอิร์ท [5], [16]

จากการทดลองของกษม เขาวนจินดา และคณะ [5] พบว่า ควรใช้อัตราส่วนของอัตราการไหลของเฟสน้ำต่ออัตราการไหลของเฟสน้ำมันประมาณ 1:1 เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าว การสกัดแร่เอิร์ทจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองของ กาญจนา กิตติชนะเจริญ และคณะ พบว่า สำหรับการสกัดที่มีอัตราส่วนของอัตราการใช้ของเฟสน้ำต่ออัตราการใช้ของเฟสน้ำมันเท่ากัน การสกัดที่มีอัตราการใช้รวมของเฟสน้ำและเฟสน้ำมันสูง จะมีการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

การดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

- 1) การสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ
- 2) การสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอร์เมตเพลท

7.1 การสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

7.1.1 อุปกรณ์ในการสกัดธาตุหายาก

- 1) เครื่อง ICP (Inductively coupled plasma)
- 2) เครื่องเขย่ากรวยแยก
- 3) กรวยแยกขนาด 250 มิลลิลิตร
- 4) ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 และ 100 มิลลิลิตร
- 5) อุปกรณ์อื่น ๆ ในห้องปฏิบัติการ

7.1.2 สารเคมี

- 1) สารละลายแเรเอิร์ทไนเตรด
- 2) สารละลาย 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟต (50% TBP) ในน้ำมันก๊าดที่ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5 โมลาร์

7.1.3 การสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะแบบไม่มีการป้อนกลับ

7.1.3.1 ตัวแปรที่ศึกษา

อัตราส่วนโดยปริมาตรของส่วนสกัดต่อส่วนคงเหลือที่ค่าเท่ากับ 1:1 และ 2:1

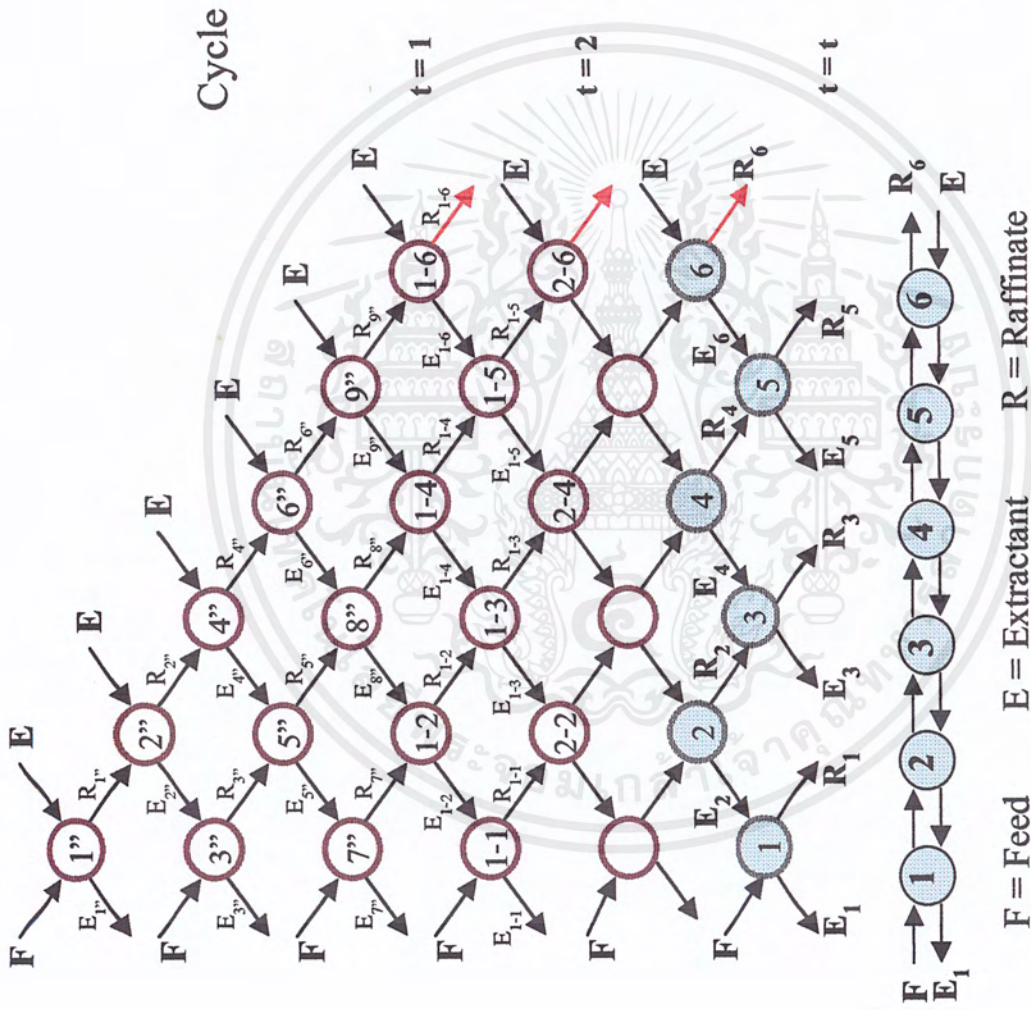
7.1.3.2 ขั้นตอนการสกัดธาตุหายาก

- 1) นำสารป้อนและสารสกัดใส่ลงในกรวยแยกที่ 1" ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ใน การทดลอง จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 7 นาที
- 2) หลังการเขย่า เมื่อสารเกิดการแยกเฟส จะได้ E_{1n} และ R_{1n} แยกสารทั้งสองออก จากกัน
 - นำ R_{1n} และสารสกัด ใส่ลงในกรวยแยกที่ 2"
 - จากนั้น เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 7 นาที
- 3) หลังการเขย่า เมื่อสารเกิดการแยกเฟส จะได้ E_{2n} และ R_{2n}
 - นำ E_{2n} และสารป้อน ใส่ลงในกรวยแยกที่ 3"
 - นำ R_{2n} และสารสกัด ใส่ลงในกรวยแยกที่ 4"
 จากนั้น เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 7 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกเฟส จะได้ E_{3n} , R_{3n} จากกรวยแยกที่ 3" และ E_{4n} , R_{4n} จากกรวยแยกที่ 4" ตามลำดับ
- 4) ทำการทดลองเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ โดยเก็บตัวอย่างเฉพาะส่วนของ R จากกรวยแยก ที่ 6 ของแต่ละรอบการสกัด สำหรับนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายากด้วย เครื่อง ICP และหยุดทำการทดลองเมื่อความเข้มข้นของธาตุหายากที่ต้องการ สกัดใน R จากกรวยแยกที่ 6 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่
- 5) เมื่อถึงรอบการสกัดที่มีแนวโน้มความเข้มข้นค่อนข้างคงที่แล้ว กำหนดให้เป็น Cycle t นำ $E_2, R_2, E_4, R_4, E_6, R_6$ มาแบ่งเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน ส่วนหนึ่งจะนำ ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP อีกส่วนหนึ่งจะนำไปทำการ สกัดต่อในกรวยแยกที่ 1, 3 และ 5 ดังรูปที่ 7.1 (โดยสารป้อนที่ใส่ในกรวยแยก ที่ 1 ก็ต้องลดปริมาณลงครึ่งหนึ่งจากที่กำหนดไว้ข้างต้นเช่นกัน)

เมื่อทำการสกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว E และ R ที่ได้จากทั้ง 3 กรวยแยก ก็จะ

นำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.1 แบบจำลองการสกัดแบบกะที่ไม่มีการป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.4 การสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะแบบมีการป้อนกลับ

7.1.4.1 ตัวแปรที่ศึกษา

อัตราส่วนของสารป้อน สารสกัด และสารป้อนกลับที่เหมาะสม อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการทดลอง

| อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารที่ใช้ในการทดลอง | |
|---|-----------------------|
| เฟสน้ำมัน : เฟสน้ำ | สารป้อนกลับ : สารป้อน |
| 1 : 1 | 0.33 : 1 |
| | 0.5 : 1 |
| | 1 : 1 |
| 2 : 1 | 0.33 : 1 |
| | 0.5 : 1 |
| | 1 : 1 |

7.1.4.2 ขั้นตอนการสกัดธาตุหายาก

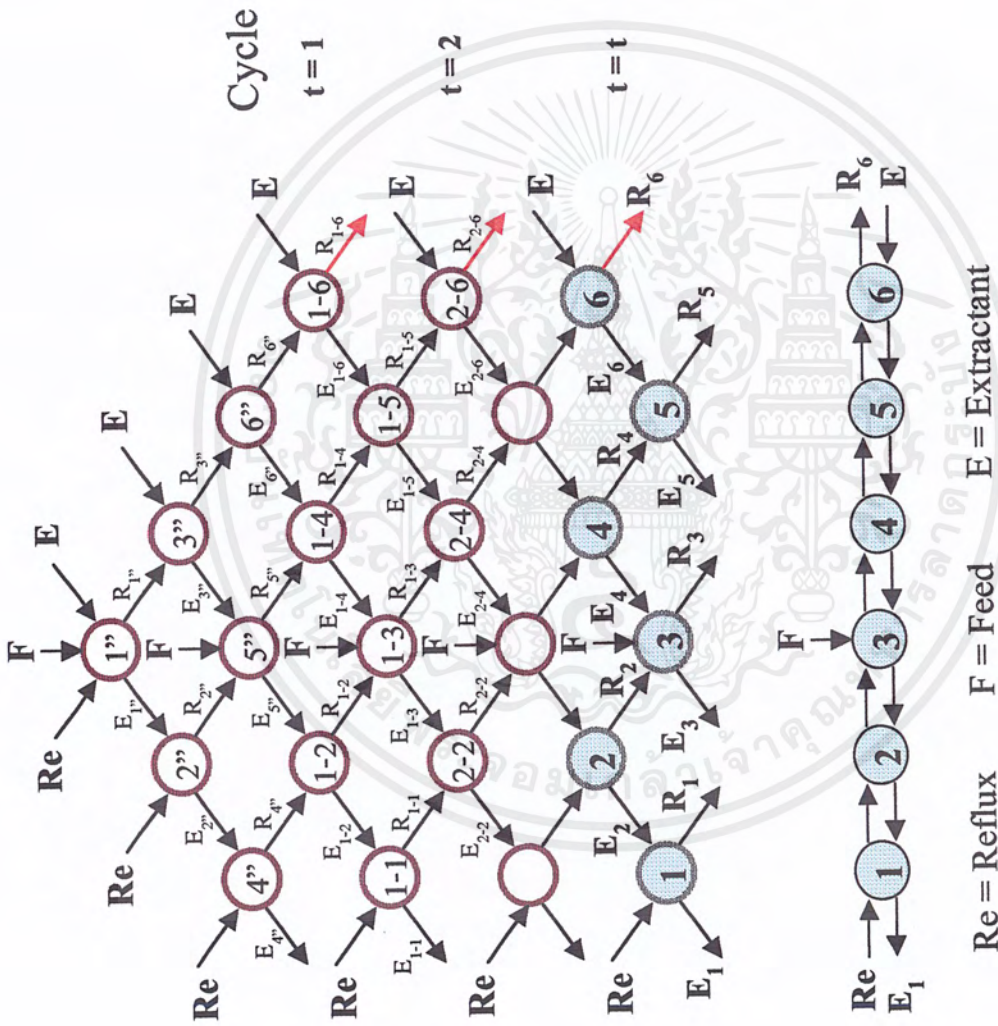
- นำสารป้อน สารสกัด และสารป้อนกลับ ใส่ลงในกรวยแยกที่ 1" ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในตารางทดลอง จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 7 นาที
- หลังการเขย่า เมื่อสารเกิดการแยกเฟส จะได้ E_{1n} และ R_{1n} แยกสารทั้งสองออกจากกัน
 - นำ E_{1n} และสารป้อนกลับ เติมลงในกรวยแยกที่ 2"
 - นำ R_{1n} และสารสกัด เติมลงในกรวยแยกที่ 3"
 จากนั้น เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 7 นาที
- 3) หลังการเขย่า เมื่อสารเกิดการแยกเฟส จะได้ E_{2n} , R_{2n} จากกรวยแยกที่ 2" และ E_{3n} , R_{3n} จากกรวยแยกที่ 3"
 - นำ E_{2n} และสารป้อนกลับ ใส่ลงในกรวยแยกที่ 4"
 - นำ E_{3n} , R_{2n} และสารป้อน ใส่ลงในกรวยแยกที่ 5"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำ R_3 และสารสกัด ใส่งในกรวยแยกที่ 6"

จากนั้นเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 7 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกเฟส จะได้ R_4 , E_4 จากกรวยแยกที่ 4" R_5 , E_5 จากกรวยแยกที่ 5" และ R_6 , E_6 จากกรวยแยกที่ 6" ตามลำดับ

- 4) ทำการทดลองเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ โดยเก็บตัวอย่างเฉพาะส่วนของ R จากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบการสกัด สำหรับนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP และหยุดทำการทดลองเมื่อความเข้มข้นของธาตุหายากที่ต้องการสกัดใน R จากกรวยแยกที่ 6 มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่
 - 5) เมื่อถึงรอบการสกัดที่มีแนวโน้มความเข้มข้นค่อนข้างคงที่แล้ว กำหนดให้เป็น Cycle t นำ E_2 , R_2 , E_4 , R_4 , E_6 , R_6 มาแบ่งเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน ส่วนหนึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP อีกส่วนหนึ่งจะนำไปทำการสกัดต่อในกรวยแยกที่ 1, 3 และ 5 ดังรูปที่ 7.2 (โดยสารป้อนกลับที่ใส่ในกรวยแยกที่ 1 และสารป้อนที่ใส่ในกรวยแยกที่ 3 ก็ต้องลดปริมาณลงครึ่งหนึ่งจากที่กำหนดไว้ข้างต้นเช่นกัน)
- เมื่อทำการสกัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว E และ R ที่ได้จากทั้ง 3 กรวยแยก ก็จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP
- 6) ทำการทดลองใหม่ โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของสารป้อน สารสกัด และสารป้อนกลับ



รูปที่ 7.2 แบบจำลองการสกัดแบบกะที่มีการป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบจำลองการสกัดแบบกะ

- 1) นำข้อมูลความเข้มข้นของธาตุที่วัดได้จากการทดลองในหัวข้อ 7.1.3 และ 7.1.4 มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกเทียบกับธาตุเลนทานัม
- 2) เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกจากข้อ 1) ระหว่างการสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับและการสกัดแบบมีการป้อนกลับ
- 3) เลือกการทดลองที่มีอัตราส่วนของสารป้อน สารสกัด และสารป้อนกลับที่เหมาะสมที่สุด

7.1.6 การหาข้อมูลสมดุล

จากการทดลองการสกัดในข้อ 7.1.3 และ 7.1.4 นำข้อมูลความเข้มข้นของธาตุหายากในรอบการสกัดสุดท้าย มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุหายากในส่วนสกัดกับความเข้มข้นของธาตุหายากในส่วนคงเหลือที่ออกจากกรวยแยกเดียวกัน

7.2 การสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท

7.2.1 อุปกรณ์ในการสกัดธาตุหายาก

- 1) หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท
- 2) ปัม
- 3) นาฬิกาจับเวลา
- 4) เครื่อง ICP (Inductively coupled plasma)
- 5) ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 และ 100 มิลลิลิตร
- 6) อุปกรณ์อื่นๆ ในห้องปฏิบัติการ

7.2.2 สารเคมี

- 1) สารละลายแเรอิร์ทไนเตรด
- 2) สารละลาย 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟต (50% TBP) ในน้ำมันก๊าดที่ถูกทำให้ร้อนด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5 โมลาร์

7.2.3 การสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่ไม่มีการป้อนกลับ

ดำเนินการสกัดธาตุหายากโดยใช้อัตราการใช้ของส่วนสกัดและส่วนคงเหลือเท่ากัน สำหรับสภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ จ.1

- 1) วัดอัตราการใช้ของสารสกัด 50%TBP ในน้ำมันก๊าดและอัตราการใช้ของสารละลายแเรเอิร์ทไนเตรด
- 2) สูบสารละลายแเรเอิร์ทไนเตรดเข้าทางด้านบนของหอสกัดจนเกือบเต็มหอสกัด
- 3) สูบสารสกัด 50% TBP ในน้ำมันก๊าดเข้าทางด้านล่างของหอสกัด เปิดพัลส์ สารละลายทั้งสองจะไหลสวนทางกันและเกิดการกระจายตัวของสารสกัด
- 4) เก็บตัวอย่างส่วนสกัดและส่วนคงเหลือที่ออกจากหอสกัดที่เวลา 30 60 90 และ 120 นาที
- 5) นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP

7.2.4 การสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่มีการป้อนกลับ

ดำเนินการสกัดธาตุหายากในหอสกัดที่มีการป้อนกลับ โดยอัตราส่วนของอัตราการใช้ของส่วนสกัดและส่วนคงเหลือได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 7.1.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ จ.2

- 1) วัดอัตราการใช้ของสารสกัด 50% TBP ในน้ำมันก๊าด สารป้อนแเรเอิร์ทไนเตรดและสารป้อนกลับ
- 2) สูบสารป้อนแเรเอิร์ทไนเตรดเข้าหอสกัดที่ตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ จ.2 จนเกือบเต็มหอสกัดจึงสูบสารป้อนกลับเข้าทางด้านบนของหอสกัดและสารสกัด 50% TBP เข้าทางด้านล่างของหอสกัด เปิดพัลส์
- 3) เก็บตัวอย่างส่วนสกัด และส่วนคงเหลือที่ออกจากหอสกัดที่เวลา 30 60 90 และ 120 นาที
- 4) นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายากด้วยเครื่อง ICP

7.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท

เปรียบเทียบระหว่างแบบมีการป้อนกลับและไม่มีการป้อนกลับ

- 1) นำข้อมูลการสกัดธาตุหายากมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือก (เทียบกับแลนทานัม) ของธาตุหายากแต่ละชนิด นำผลการคำนวณที่ได้มาเขียนกราฟดังต่อไปนี้
 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกระจายกับชนิดของธาตุหายาก เปรียบเทียบระหว่างการสกัดแบบมีการป้อนกลับและไม่มีการป้อนกลับ
 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือก (เทียบกับแลนทานัม) กับชนิดของธาตุหายาก เปรียบเทียบระหว่างการสกัดแบบมีการป้อนกลับและไม่มีการป้อนกลับ
- 2) นำข้อมูลการสกัดธาตุหายากมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของธาตุหายากที่เหลืออยู่ในส่วนคงเหลือ และเปอร์เซ็นต์ของธาตุหายากที่ถูกสกัดเข้าไปในส่วนสกัด เมื่อเทียบกับปริมาณธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมด นำผลการคำนวณที่ได้มาเขียนกราฟดังต่อไปนี้
 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของธาตุหายากที่เหลืออยู่ในส่วนคงเหลือเมื่อเทียบกับปริมาณธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมดกับชนิดของธาตุหายาก เปรียบเทียบระหว่างการสกัดแบบมีการป้อนกลับและไม่มีการป้อนกลับ
 - กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของธาตุหายากที่ถูกสกัดเข้าไปในส่วนสกัดเมื่อเทียบกับปริมาณธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมดกับชนิดของธาตุหายาก เปรียบเทียบระหว่างการสกัดแบบมีการป้อนกลับและไม่มีการป้อนกลับ

บทที่ 8

ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ที่สำคัญที่นำไปสู่ข้อสรุปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองเท่านั้น และเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายจึงได้นำเสนอในรูปแบบของกราฟ สำหรับผลการทดลองทั้งหมดที่แสดงในรูปตารางและกราฟจะแสดงอยู่ในภาคผนวก

8.1 ผลการทดลองการสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

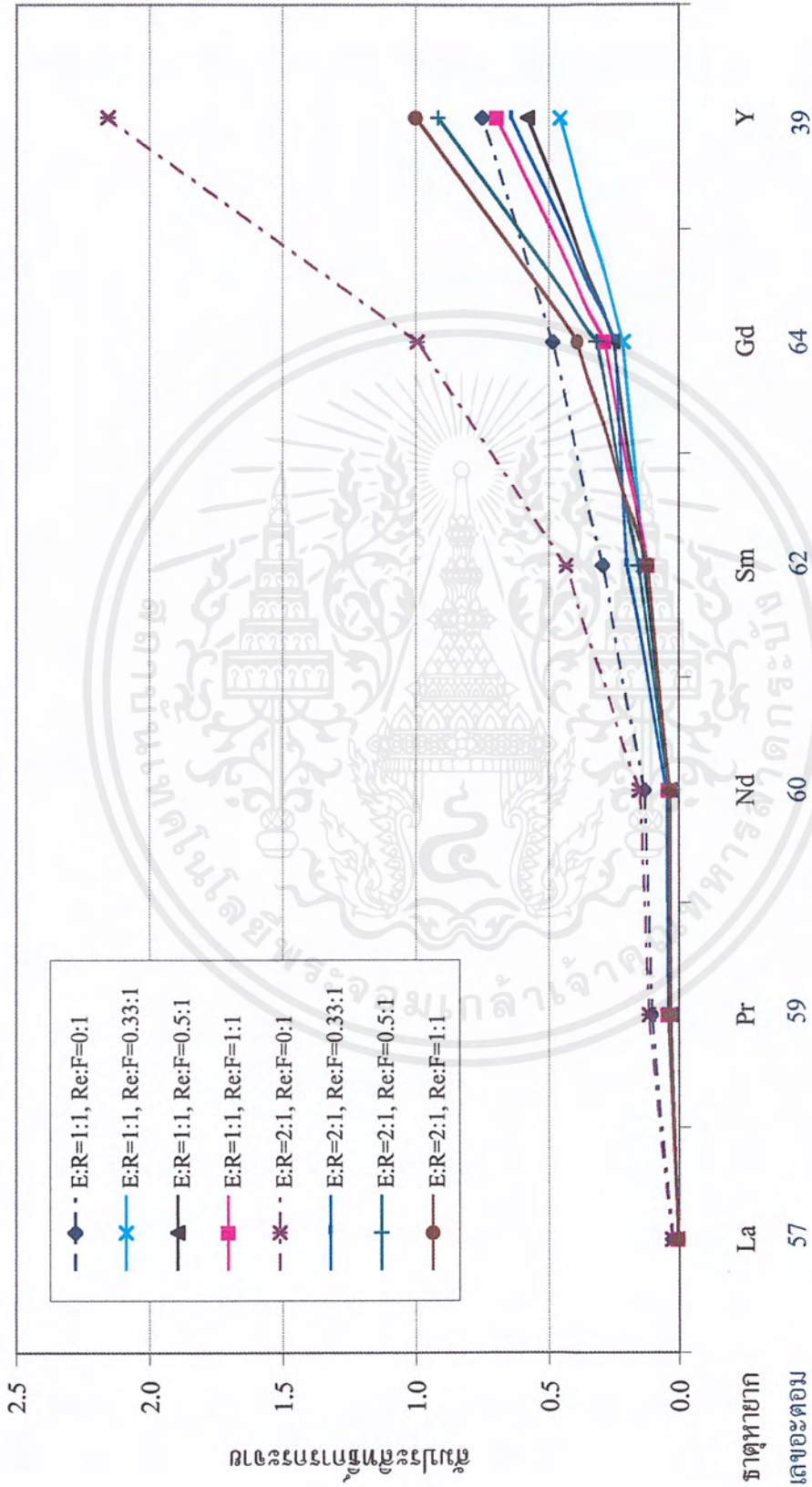
ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของส่วนสกัดต่อส่วนคงเหลือเป็น 1:1 และ 2:1 เนื่องจากเมื่อใช้อัตราส่วนของเฟสน้ำมันต่อเฟสน้ำมากขึ้นจะทำให้การสกัดธาตุหายากเข้าไปในเฟสน้ำมันได้ดีขึ้น ซึ่งจากการทดลองของ กษม เชาวน์จินดาและคณะ [5] พบว่าที่อัตราส่วนของเฟสน้ำต่อเฟสน้ำมันเป็น 1:1 จะให้ประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายากดีกว่าการใช้อัตราส่วนของเฟสน้ำมันต่อเฟสน้ำเป็น 0.5:1 และที่เลือกใช้อัตราส่วนของสารป้อนกลับต่อสารป้อนเป็น 0.33:1, 0.5:1 และ 1:1 เนื่องจากต้องการศึกษาผลของการเพิ่มอัตราส่วนของสารป้อนกลับต่อสารป้อนต่อประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายาก

1) จากรูปที่ 8.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากที่ได้จากการทดลองการสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายมีค่าสูงขึ้นตามเลขอะตอมที่เพิ่มขึ้น (ยกเว้น Y ที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับธาตุหายากกลุ่มหนัก) เช่น Nd ที่มีเลขอะตอม 60 จะถูกสกัดเข้าไปอยู่ในชั้นน้ำมันได้ดีกว่าธาตุหายากที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า เช่น La ที่มีเลขอะตอม 57 ดังนั้นผลการคำนวณค่าการเลือกของธาตุหายากเมื่อเทียบกับ La จึงมีแนวโน้มสูงขึ้นตามเลขอะตอมที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายดังรูปที่ 8.8 ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลจากการศึกษาของ Weaver et al. [16]

ซึ่งพบว่าที่สภาวะสมดุลของการกระจายตัวของแรเอิร์ทไนเตรระหว่างชั้นสารละลายกรดไนตริก กับชั้นสารละลายไตรบิวทิลฟอสเฟต (ชั้นน้ำมัน) ธาตุหายากจะกระจายตัวเข้าไปในชั้นน้ำมันได้ดี ขึ้นตามเลขอะตอมของธาตุหายากที่เพิ่มขึ้น

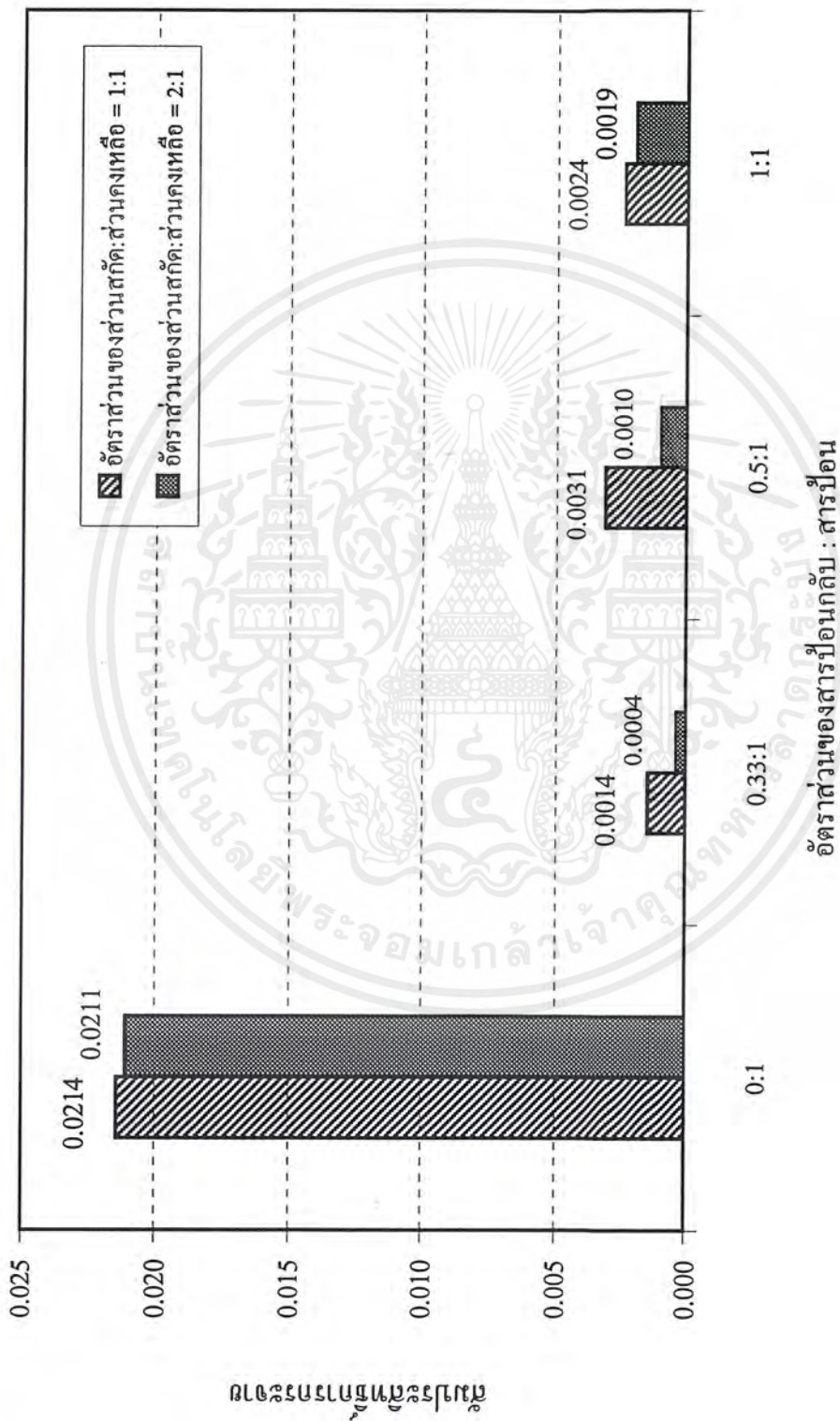
2) พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากกลุ่มหนัก (Gd ในรูปที่ 8.6 และ Y ในรูปที่ 8.7) สำหรับการสกัดที่ไม่มี การป้อนกลับ พบว่ามีค่าสูงกว่าแบบที่มีการป้อนกลับ ในขณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาธาตุหายากกลุ่มเบา (รูปที่ 8.2 ถึง 8.5) จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากกลุ่มเบาสำหรับการสกัดที่ไม่มี การป้อนกลับก็มีค่าสูงกว่าการสกัดแบบที่มีการป้อนกลับเช่นเดียวกัน นั่นคือ สำหรับการสกัดแบบที่ไม่มี การป้อนกลับ ทั้งธาตุหายากกลุ่มหนักและธาตุหายากกลุ่มเบาจะถูกสกัดเข้าไปยังชั้นน้ำมันได้ดีกว่าการสกัดที่มีการป้อนกลับ

3) พิจารณาค่าการเลือกของธาตุหายากเมื่อเทียบกับ L_a ในรูปที่ 8.9 ถึง 8.13 จะเห็นว่าอัตราส่วนของสารป้อนกลับต่อสารป้อน (Re:F) เท่ากันนั้น อัตราส่วน E:R เท่ากับ 2:1 จะให้ค่าการเลือกของธาตุหายากสูงกว่าการสกัดที่ใช้ E:R เท่ากับ 1:1 และค่าการเลือกของธาตุหายากกลุ่มหนัก สำหรับการสกัดที่ใช้การป้อนกลับมีค่าสูงกว่าแบบที่ไม่ใช้การป้อนกลับ นั่นคือ การใช้การป้อนกลับในการสกัดจะทำให้สามารถแยกธาตุหายากกลุ่มหนักออกจาก L_a ได้ดี จากรูปที่ 8.8 พบว่า สำหรับอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารป้อน สารสกัด และสารป้อนกลับในการทดลองนี้ที่ทำให้ค่าการเลือกของธาตุหายากกลุ่มหนักเมื่อเทียบกับ L_a สูงสุดคือ อัตราส่วน Re:F เท่ากับ 0.33:1 และ E:R เท่ากับ 2:1

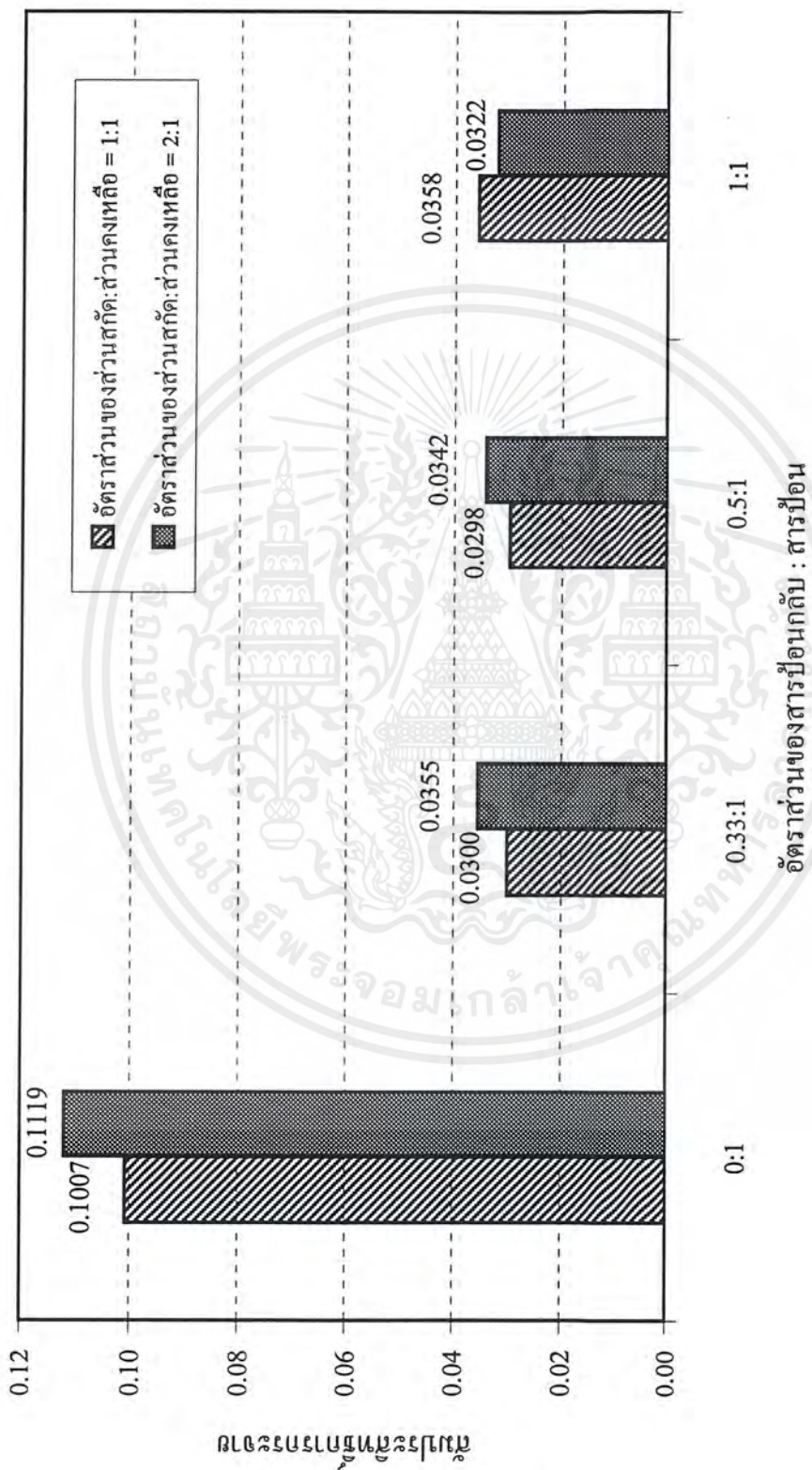


รูปที่ 8.1 แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

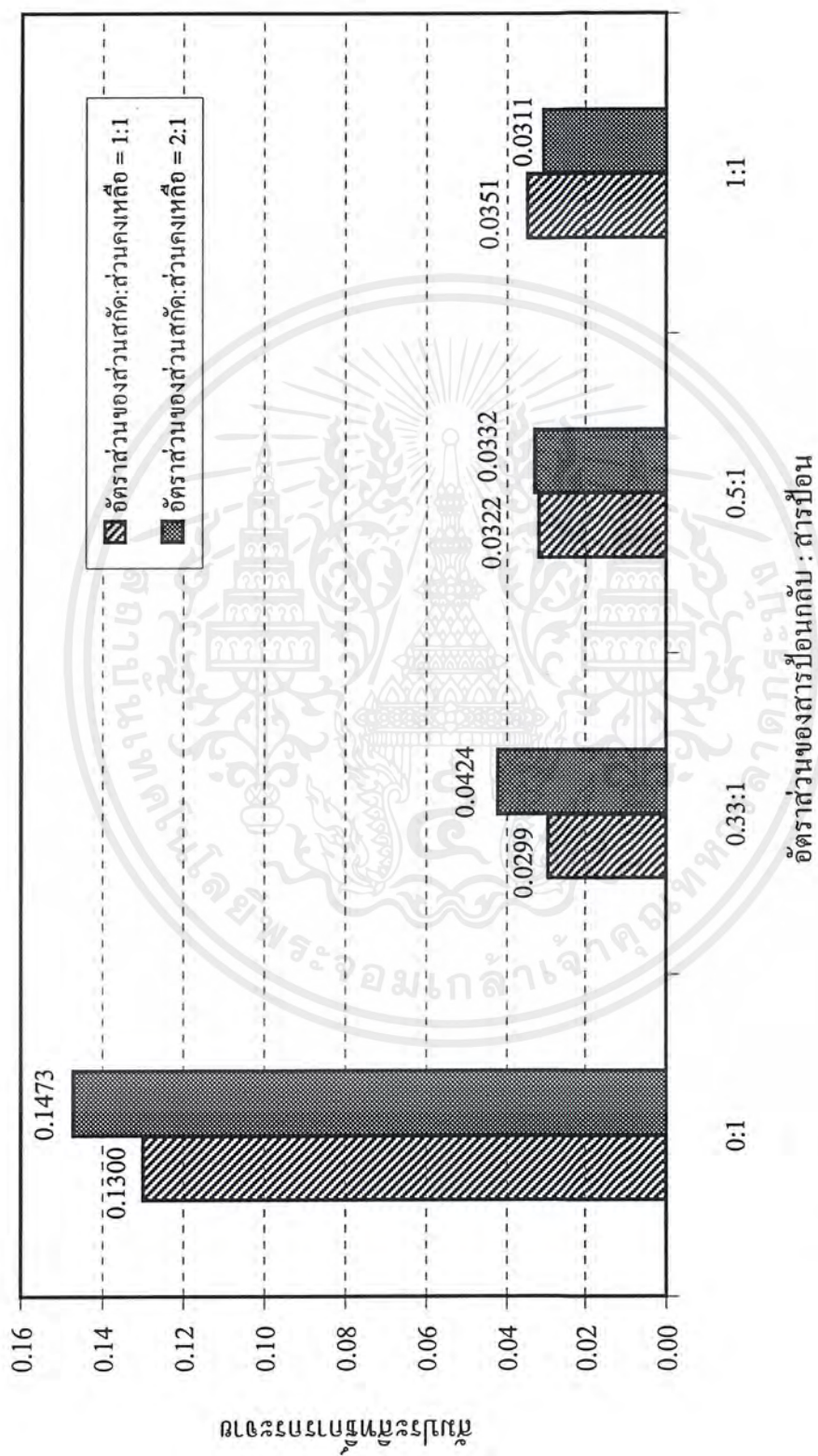
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



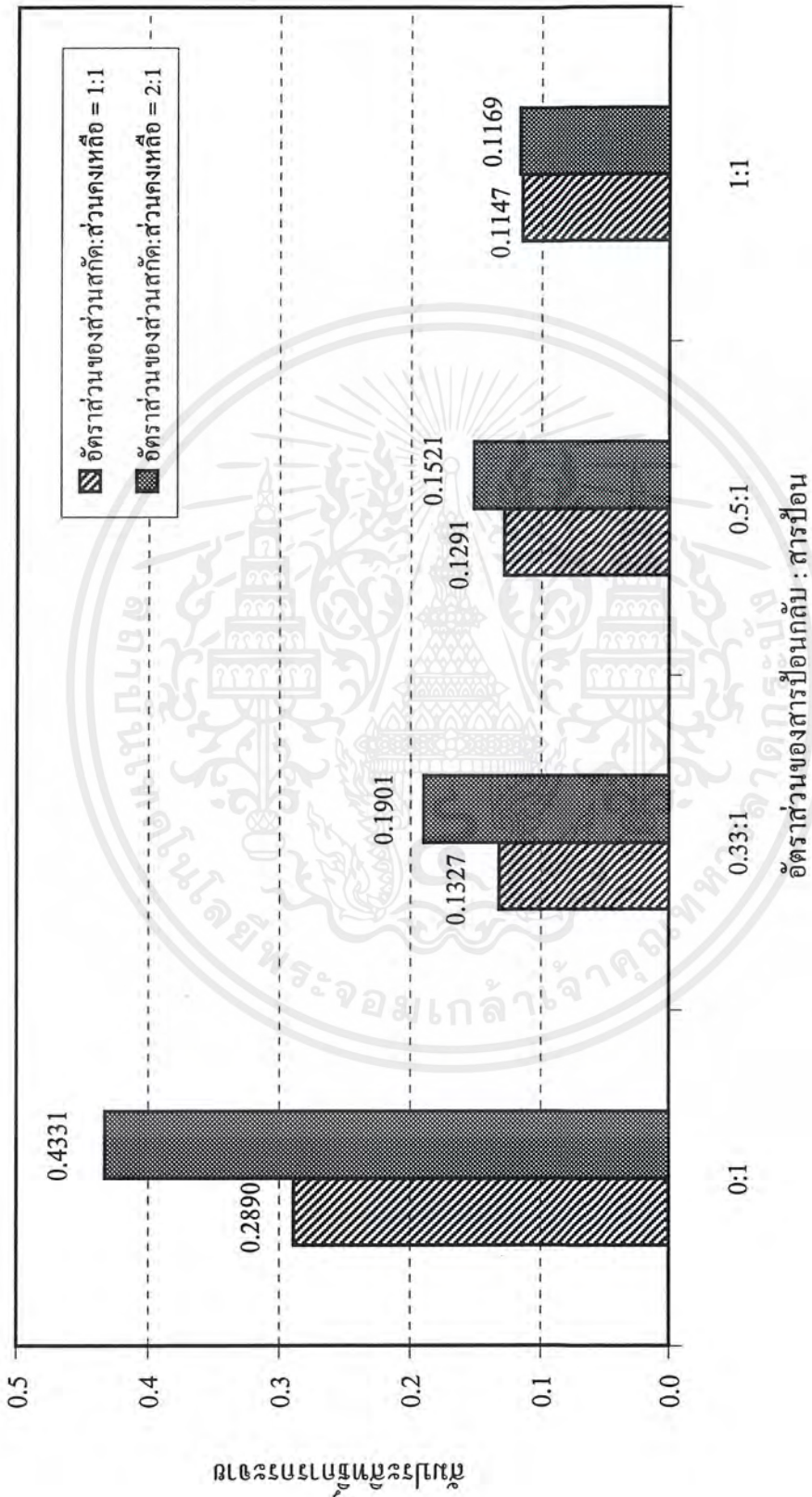
รูปที่ 8.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ La ที่ได้จากการสักรัดโดยใช้แบบจำลองการสักรัดแบบกะ



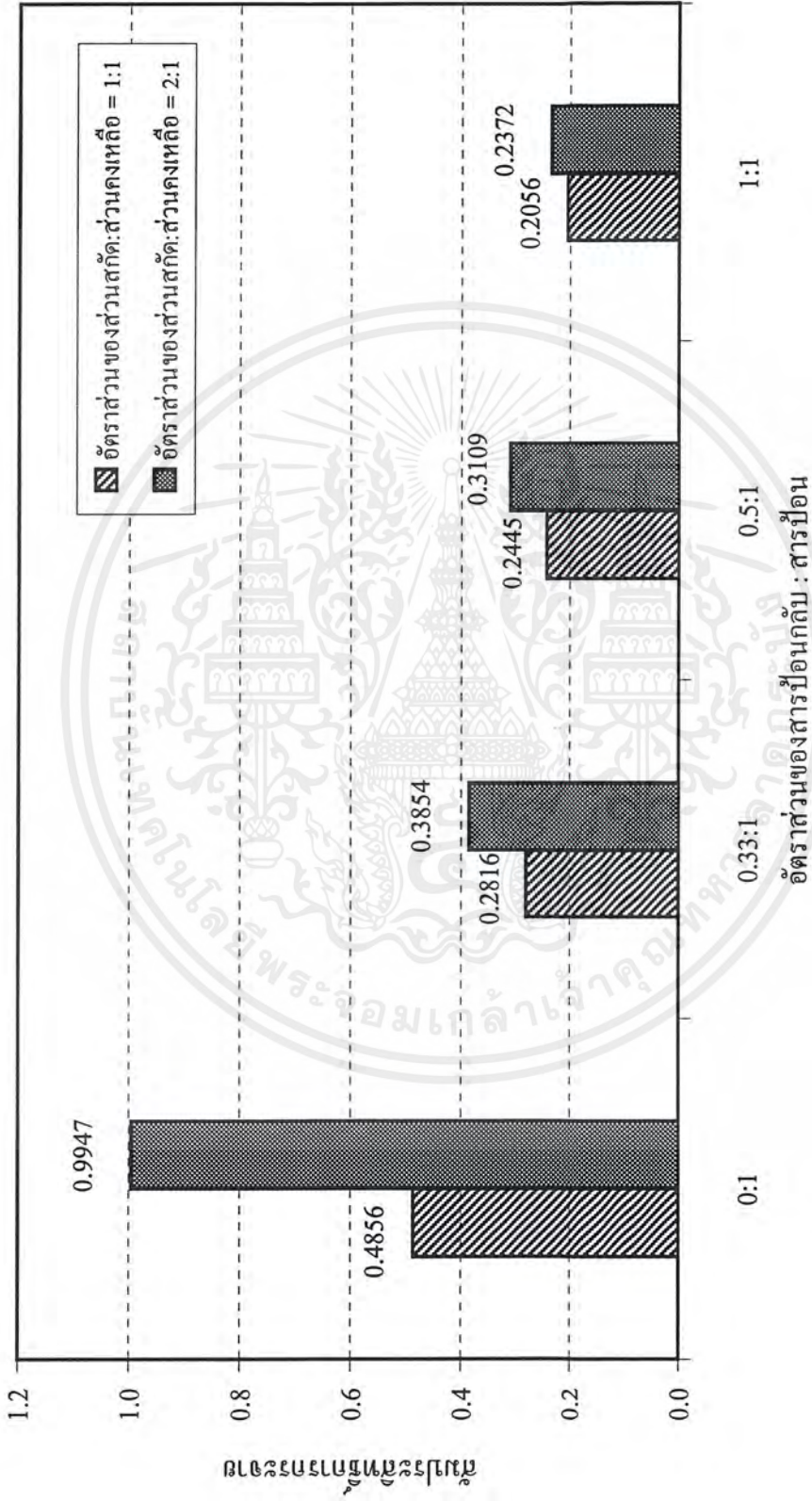
รูปที่ 8.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Pr ที่ได้จากการสักรัดโดยใช้แบบจำลองการสักรัดแบบกะ



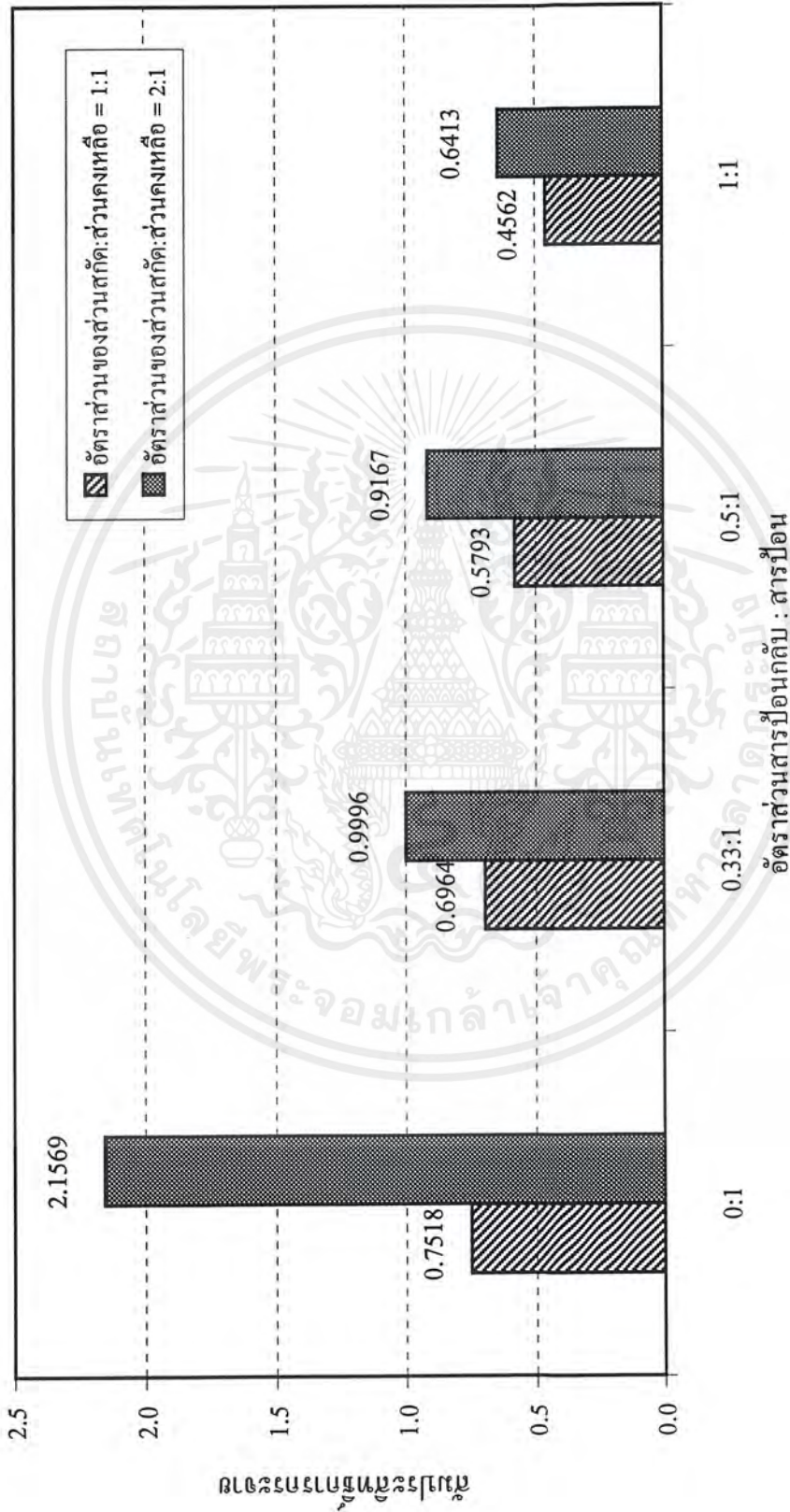
รูปที่ 8.4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Nd ที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ



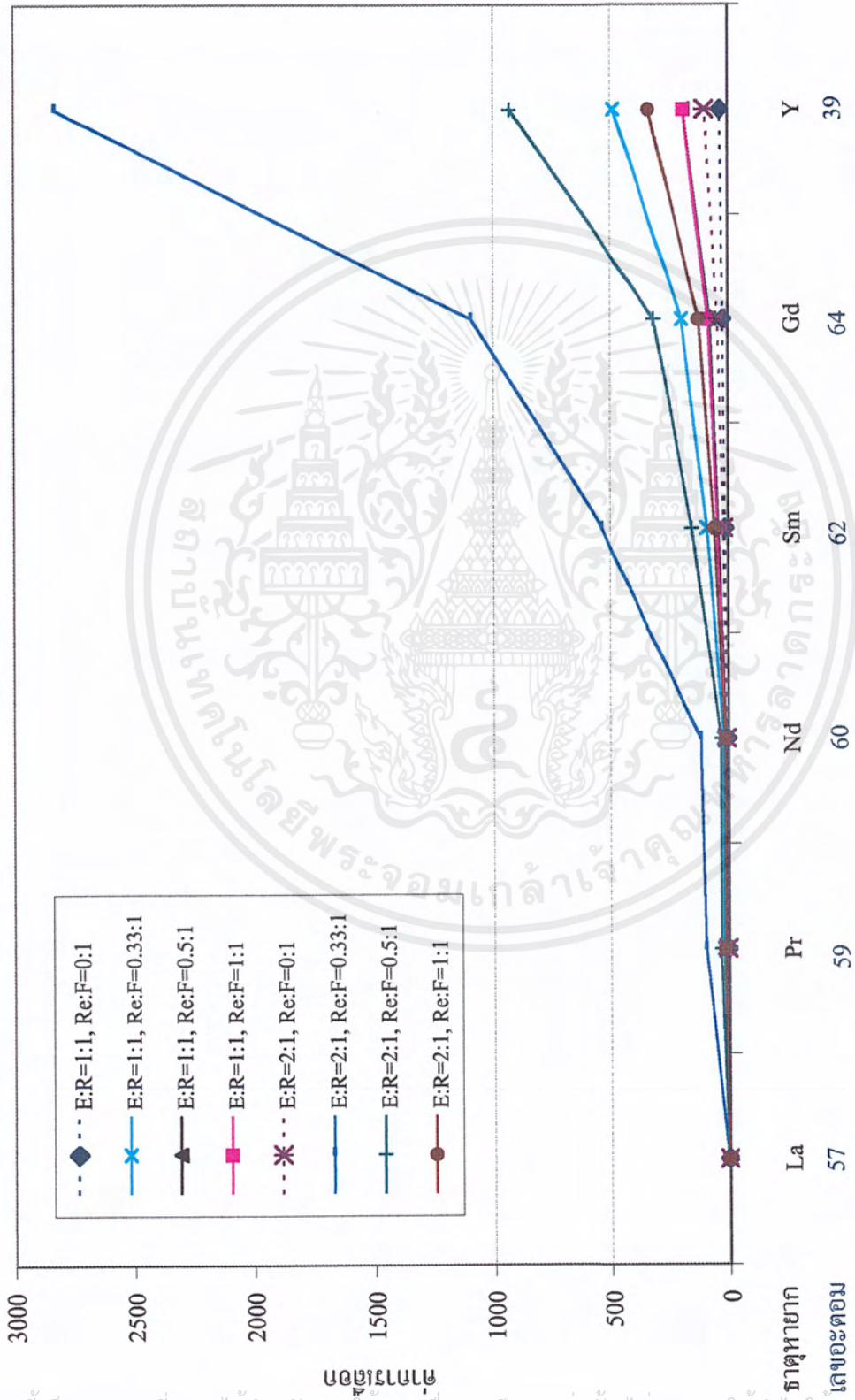
รูปที่ 8.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Ssm ที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ



รูปที่ 8.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Gd ที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

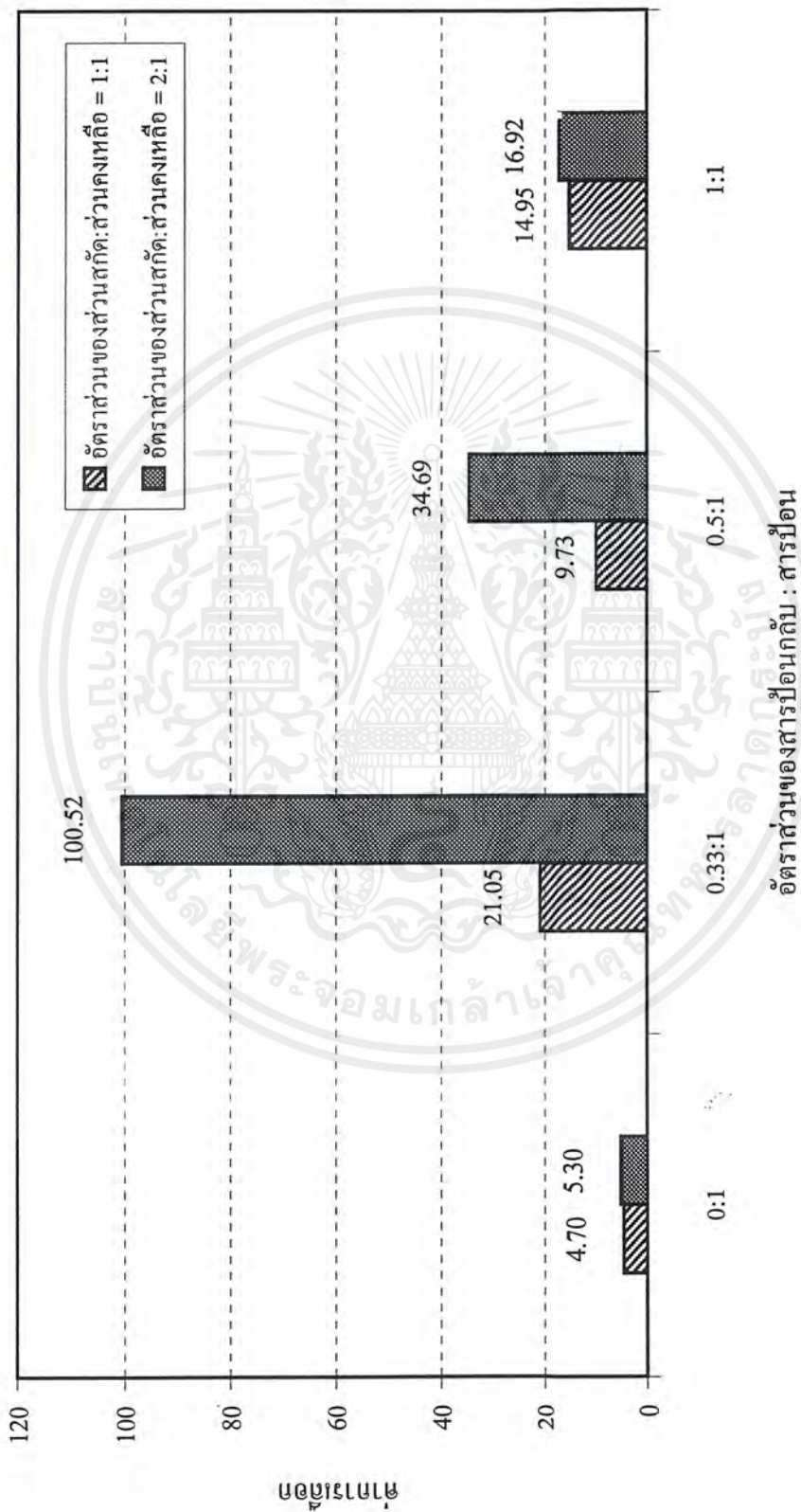


รูปที่ 8.7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ Y ที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

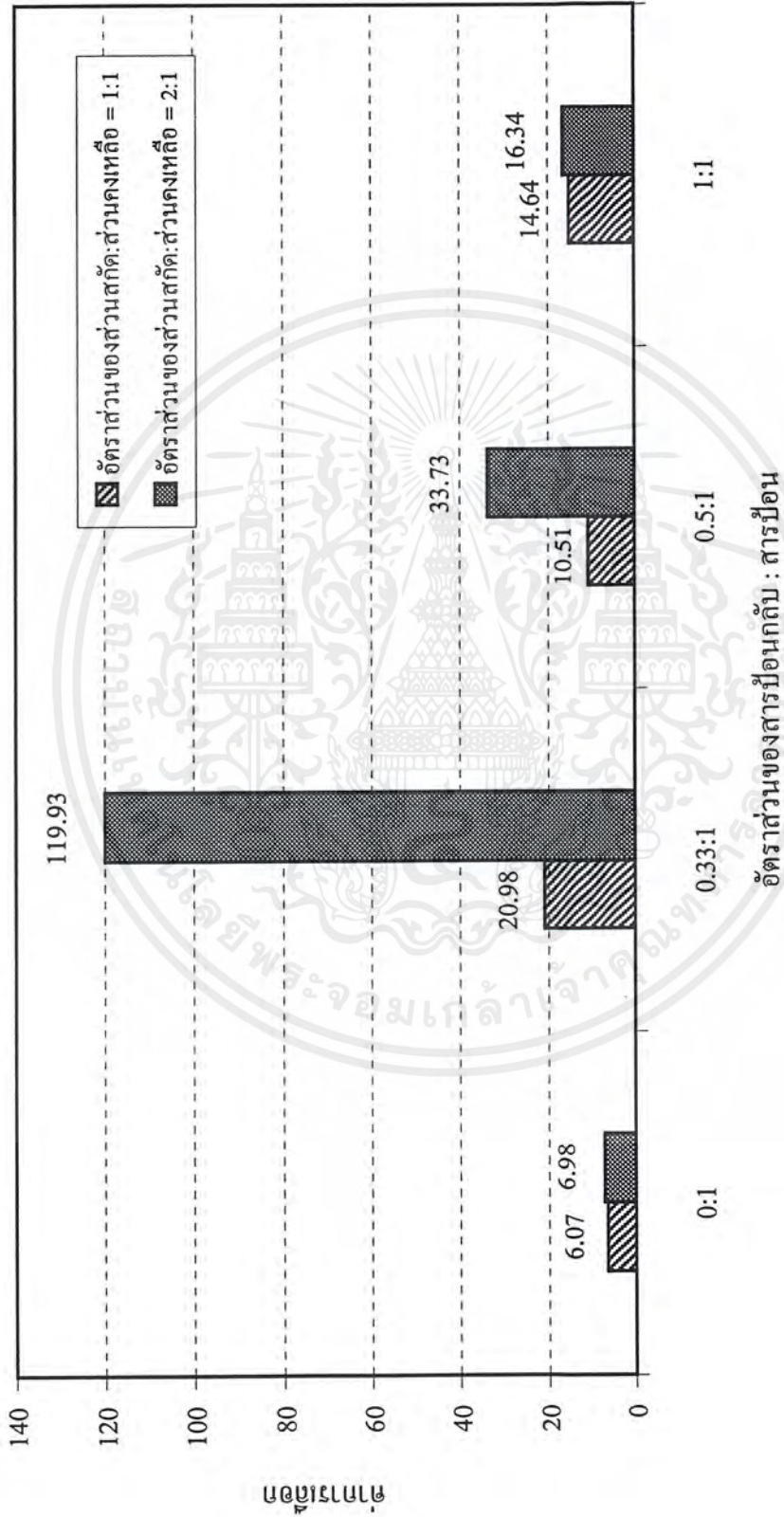


รูปที่ 8.8 แนวโน้มค่าการเลือกของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

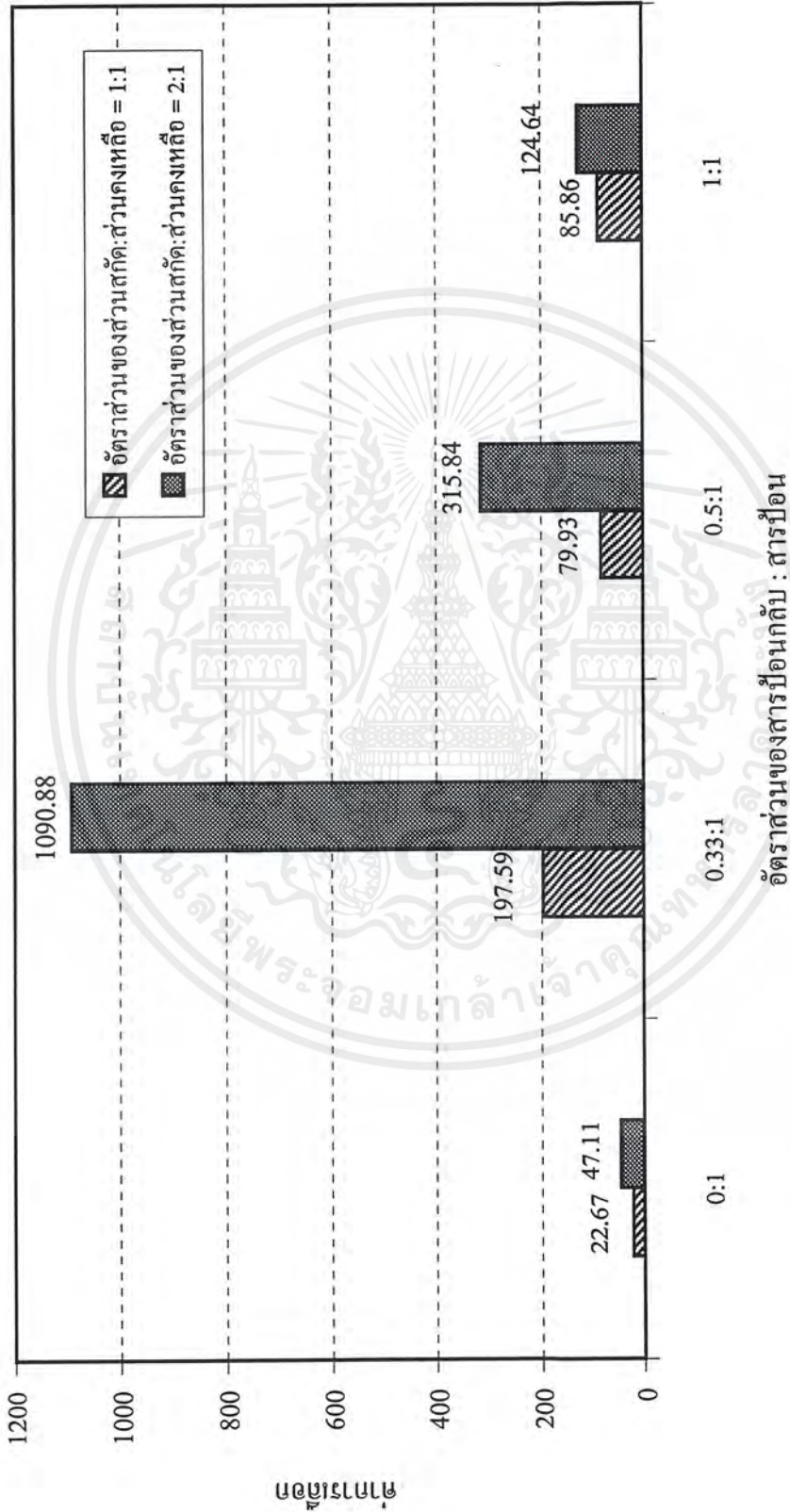
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



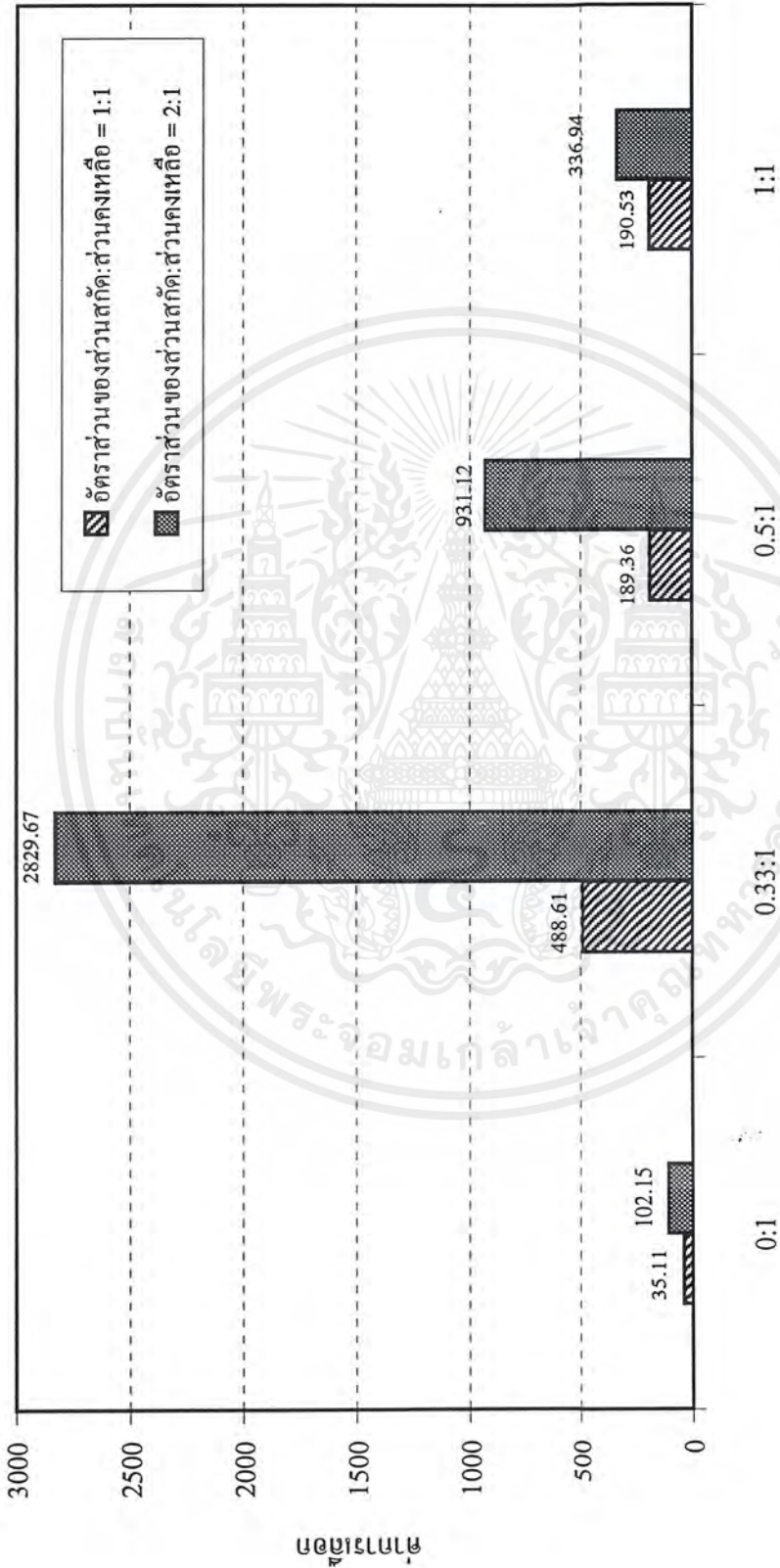
รูปที่ 8.9 เปรียบเทียบค่าการเดือดของ Pr ที่ได้จากการสัคดีโดยใช้แบบจำลองการสัคดีแบบกะ



รูปที่ 8.10 เปรียบเทียบค่าการเลือกของ Nd ที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ



รูปที่ 8.12 เปรียบเทียบค่าการเลือกของ Gd ที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ



อัตราส่วนของสารป้อนกลับ : สารป้อน

รูปที่ 8.13 เปรียบเทียบค่าการเลือกของ Y ที่ได้จากการศักดิ์โดยใช้แบบจำลองการศักดิ์แบบกะ

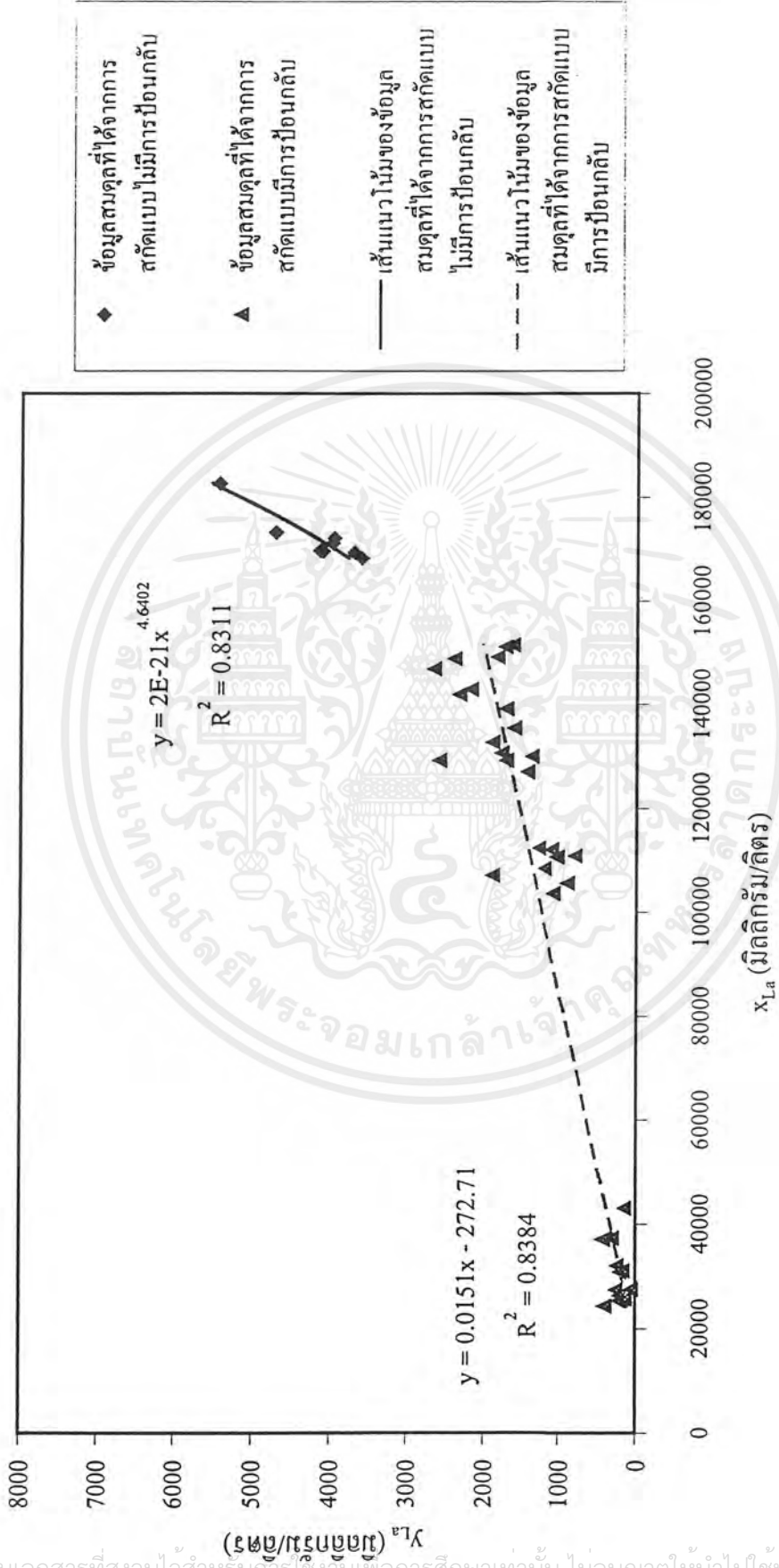
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 ข้อมูลสมดุลของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

ขั้นตอนสมดุล คือ ขั้นตอนใด ๆ ที่ให้เวลาในการสัมผัสระหว่างเฟสสองเฟสจนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในทั้งสองเฟส (แต่ยังมีการถ่ายเทมวลหรือตัวถูกละลายจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งกลับไปกลับมาในปริมาณที่เท่ากัน) แล้วจึงแยกเฟสทั้งสองออกจากกัน [18]

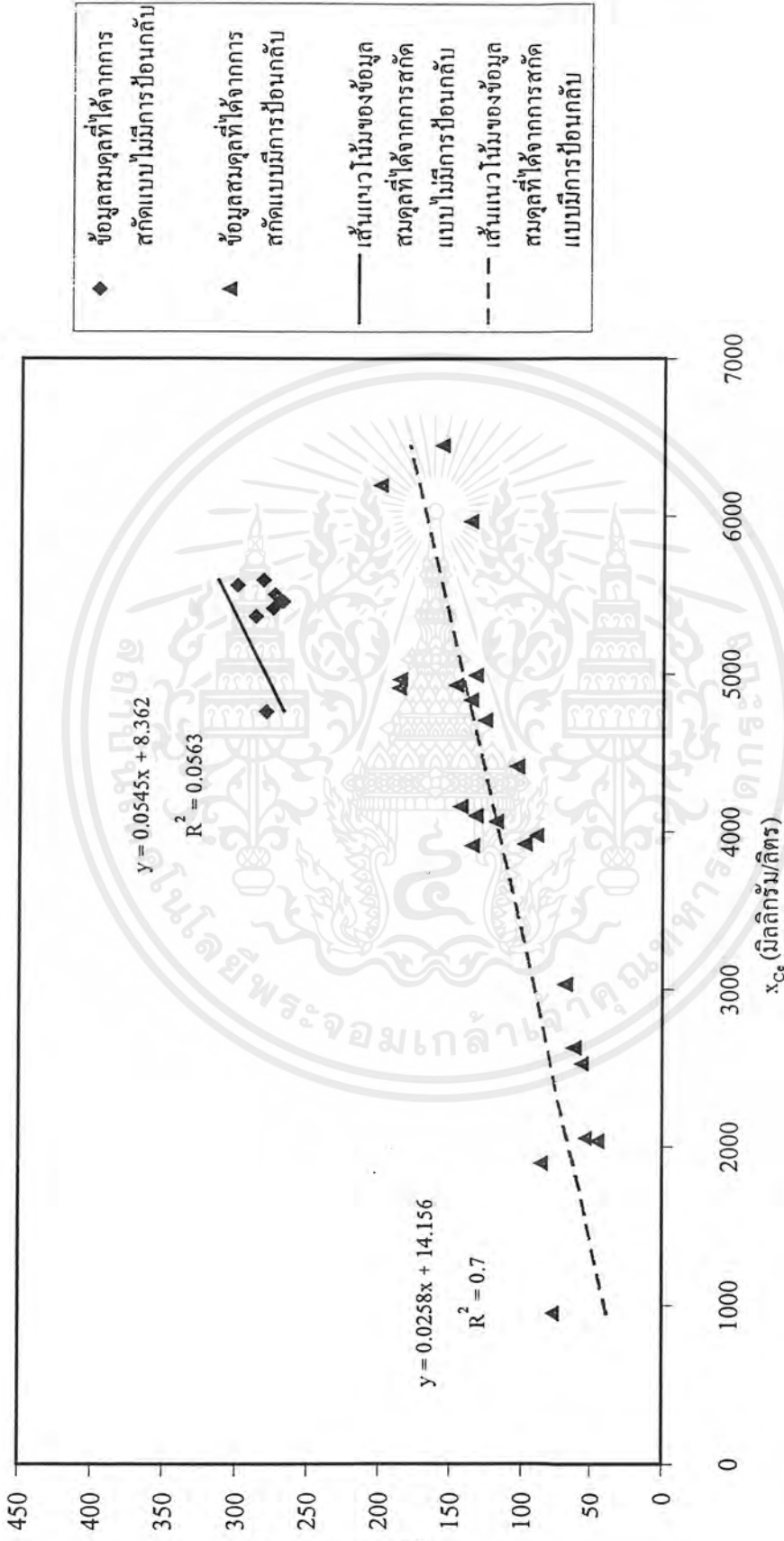
ในการทดลองการสกัดธาตุหายากจากแบบจำลองการสกัดแบบกะนี้ นอกจากจะใช้จำลองกระบวนการสกัดของเหลวด้วยของเหลวแบบต่อเนื่องและไหลสวนทางกันแล้ว ยังสามารถใช้หาข้อมูลสมดุลของธาตุหายากได้จากการวัดความเข้มข้นของธาตุหายากในสารละลายชั้นน้ำและชั้นน้ำมันที่สมดุลซึ่งออกจากกรวยแยกเดียวกันในการสกัดรอบสุดท้ายของแบบจำลองการสกัดแบบกะ

รูปที่ 8.14 ถึง 8.23 แสดงข้อมูลสมดุลของธาตุหายากหรือความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุหายากในเฟสน้ำกับความเข้มข้นของธาตุหายากในเฟสน้ำมัน ณ สภาวะสมดุล ซึ่งพบว่าแนวโน้มของข้อมูลสมดุลสำหรับการสกัดที่ไม่มีการป้อนกลับต่างจากการสกัดที่มีการป้อนกลับ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจาก ในระบบการสกัดเกี่ยวข้องกับสารละลายหลายองค์ประกอบ ซึ่งสมดุลของธาตุหายากแต่ละธาตุอาจมีความสัมพันธ์กันกับธาตุหายากอื่น ๆ ในสารละลาย ดังนั้นการใช้การป้อนกลับซึ่งมีความเข้มข้นของธาตุหายากแต่ละธาตุแตกต่างจากสารป้อน จึงทำให้สมดุลของธาตุแต่ละธาตุแตกต่างจากการสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ นอกจากนี้ยังอาจขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลาย เป็นต้น



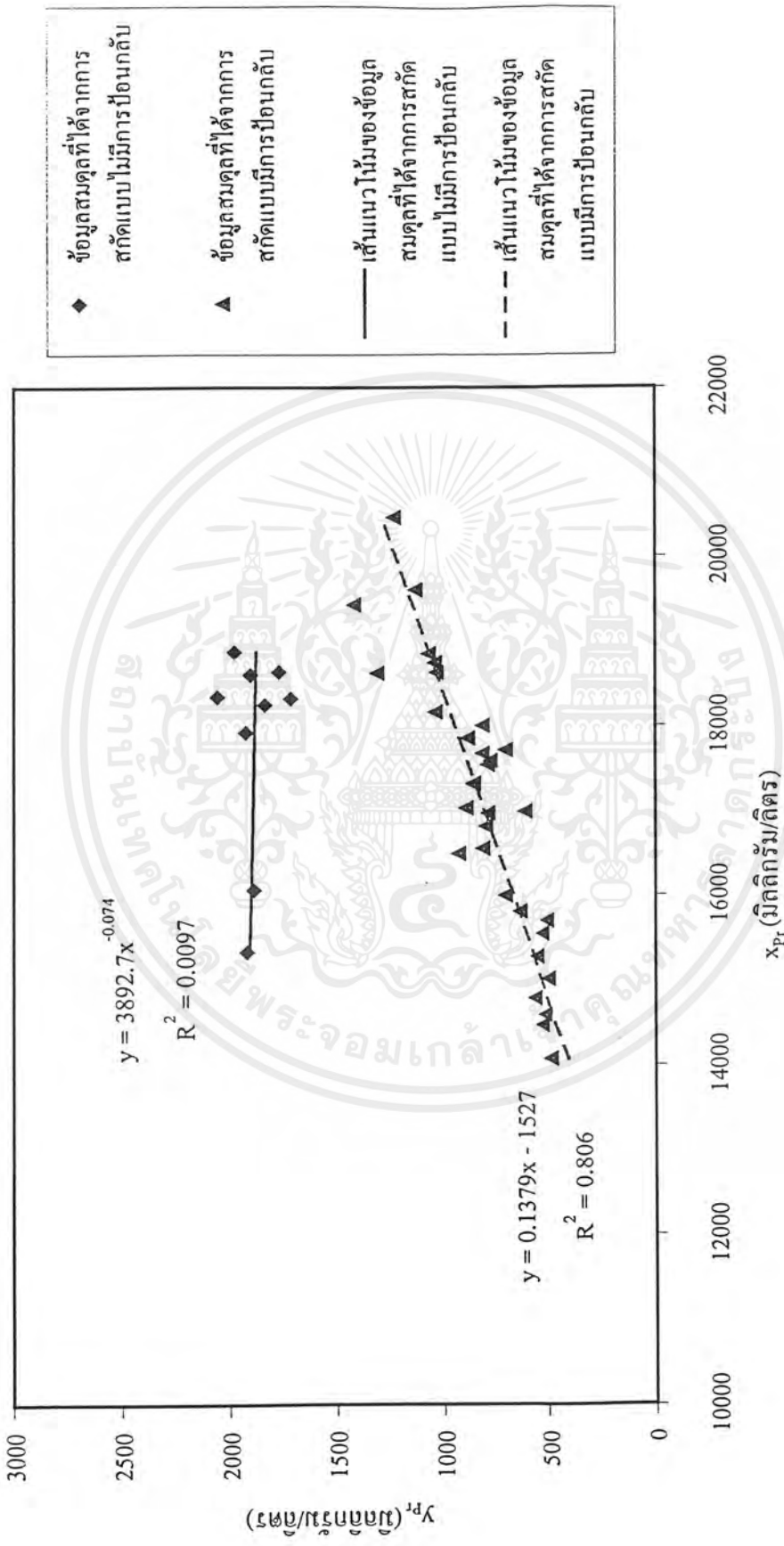
รูปที่ 8.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $x_{L,a}$ กับ $y_{L,a}$ ณ สภาวะสมดุค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม้ว่าใครก็ได้ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



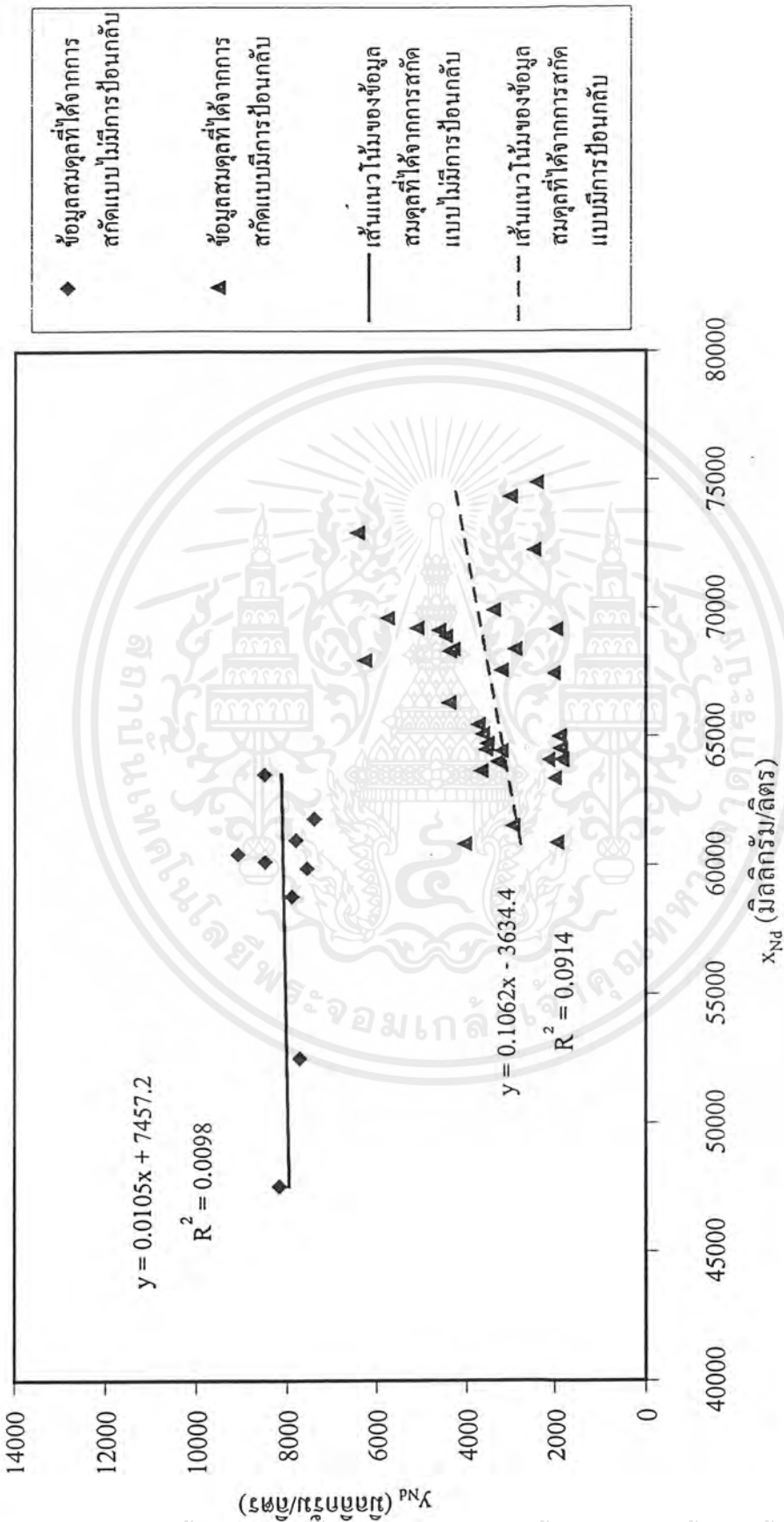
รูปที่ 8.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_c กับ y_c ณ สภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม้ว่าใครก็ได้จะดัดแปลงแก้ไขให้ผิดเพี้ยนเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ไม่ควรแก้ไข



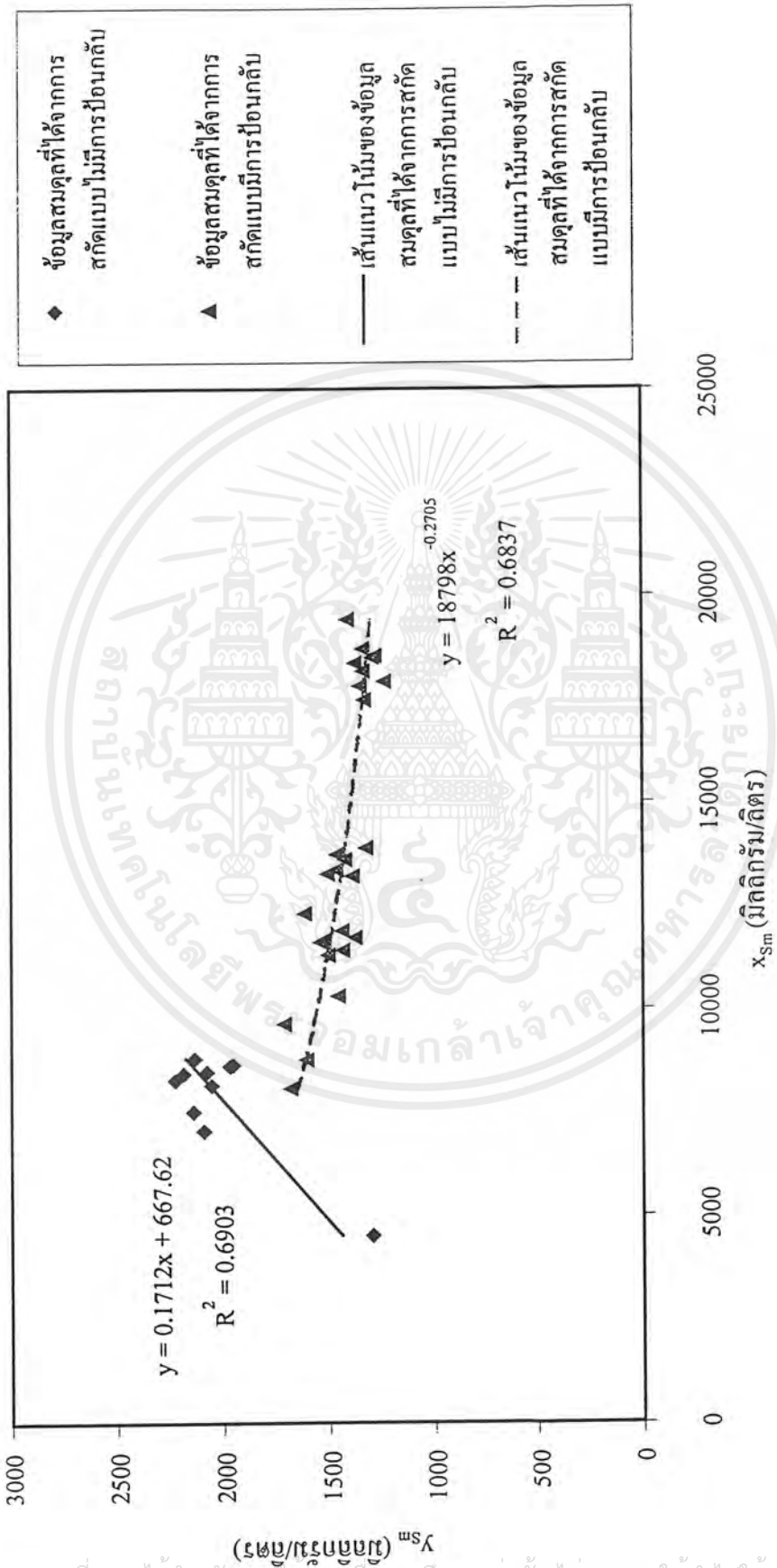
รูปที่ 8.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{pr} กับ y_{pr} ณ สภาวะสมดุค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



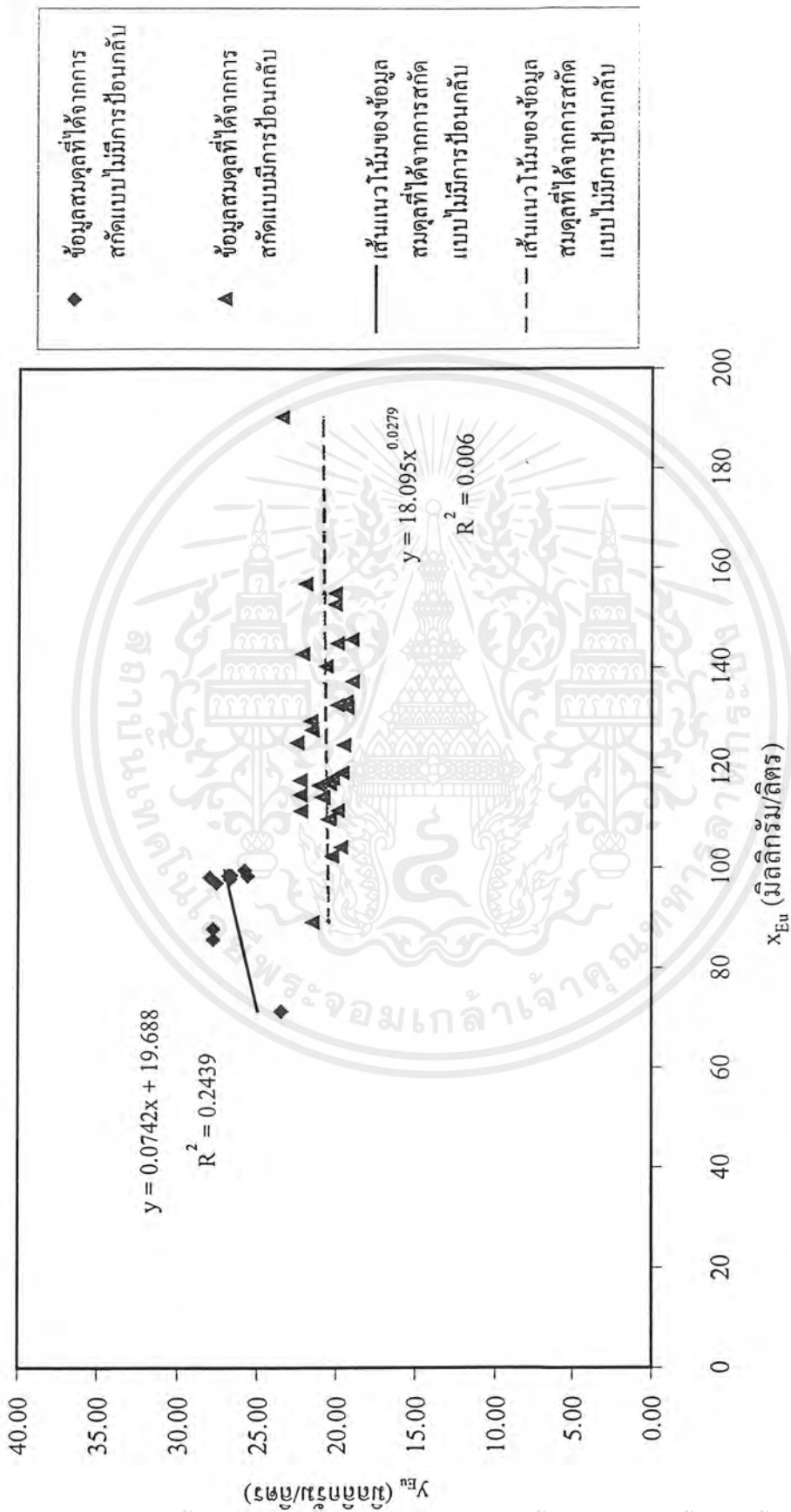
รูปที่ 8.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Nd} กับ y_{Nd} ณ สภาวะสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

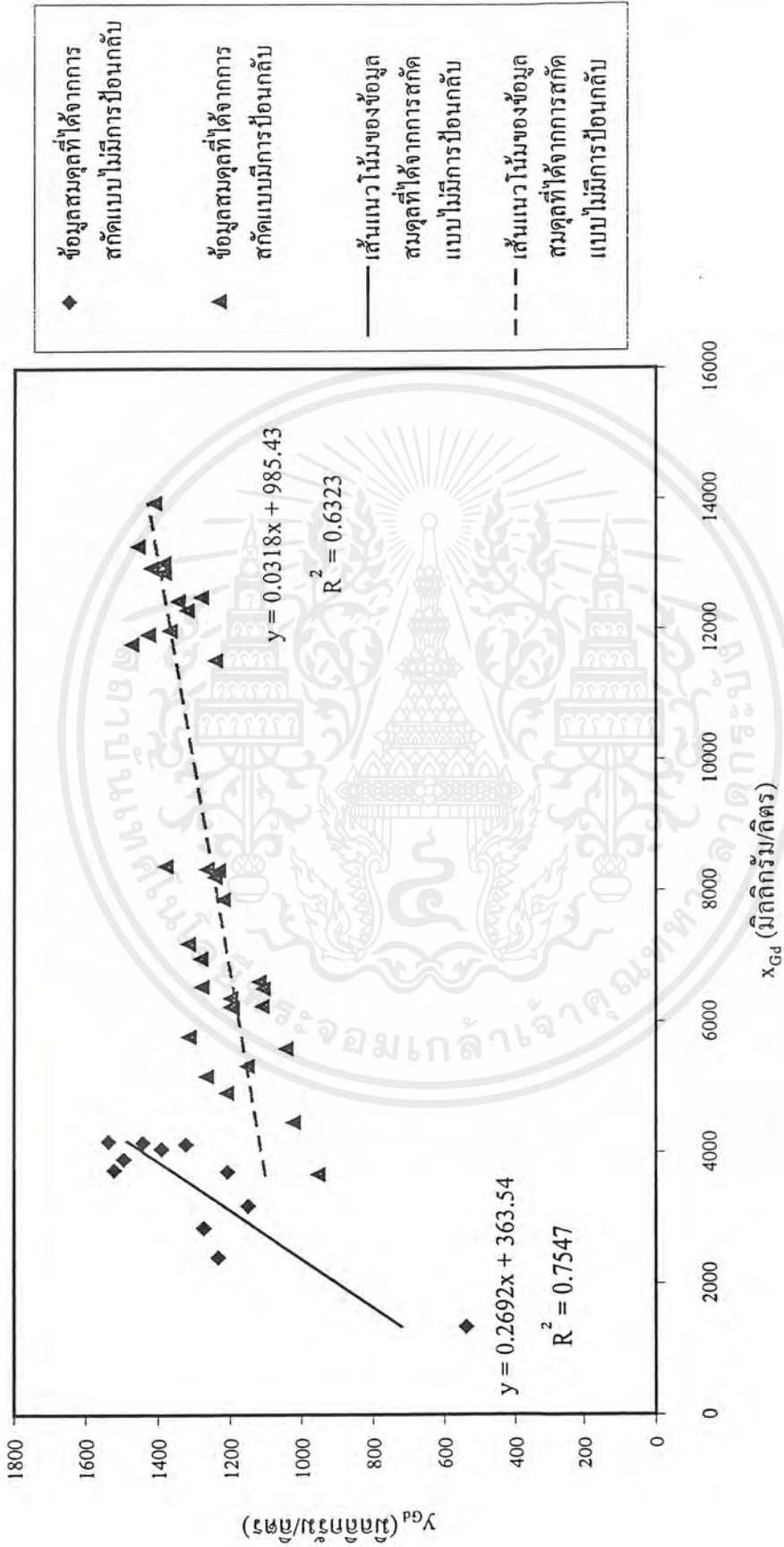


รูปที่ 8.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Sm} กับ y_{Sm} ณ สภาวะสมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

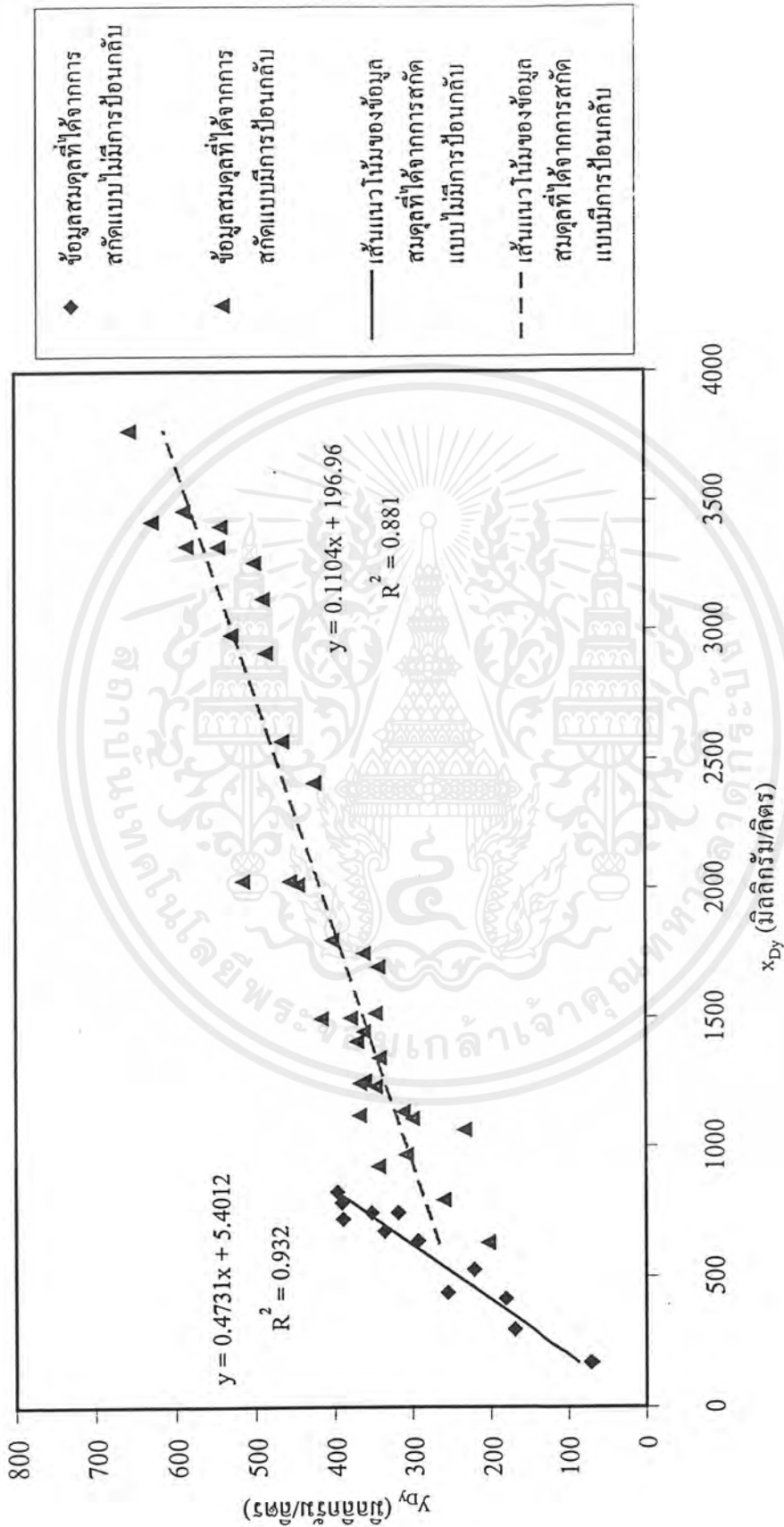


รูปที่ 8.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Eu} กับ y_{Eu} ณ สภาวะสมดุล

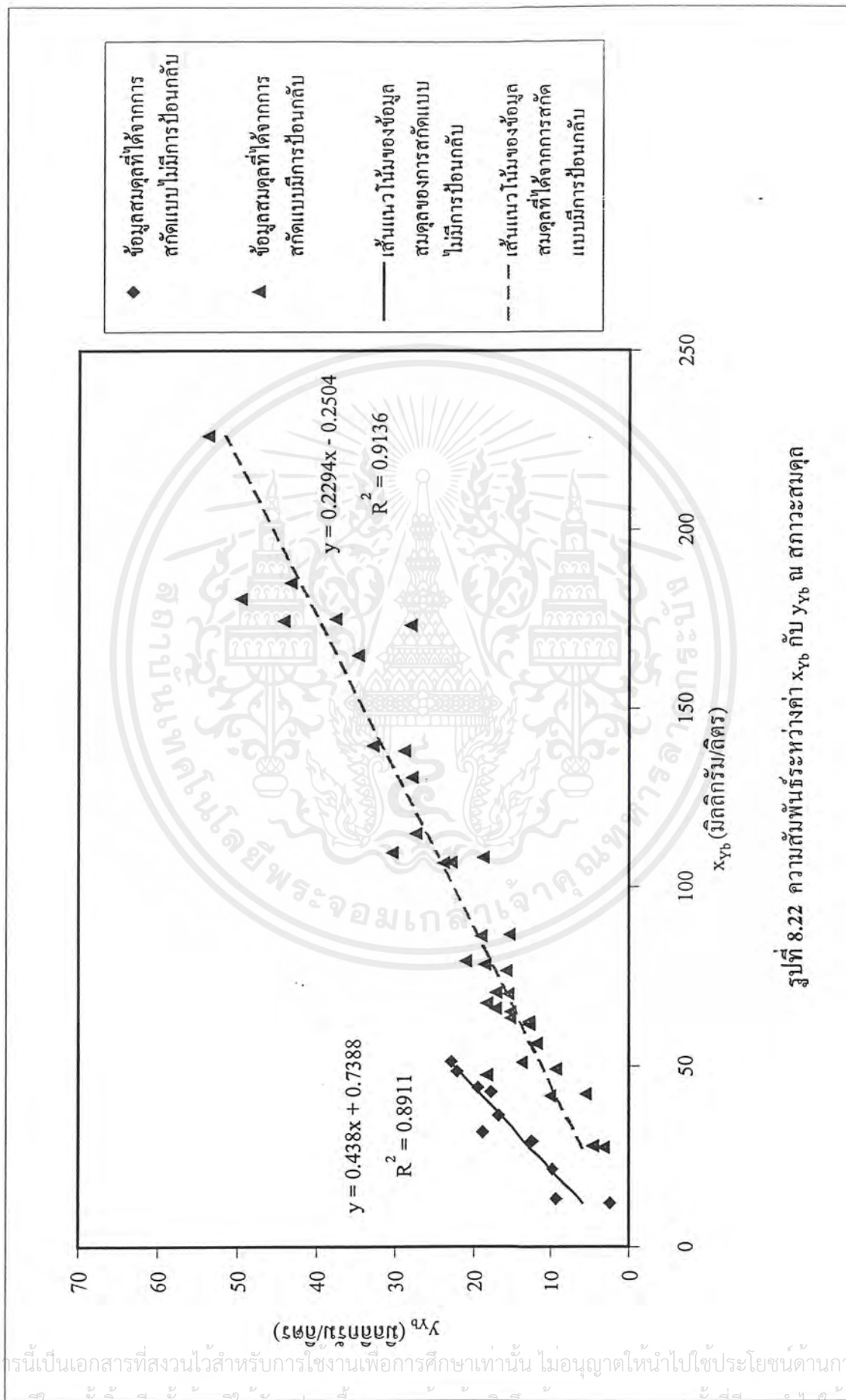


รูปที่ 8.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Gd} กับ y_{Gd} ณ สภาวะสมดุทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

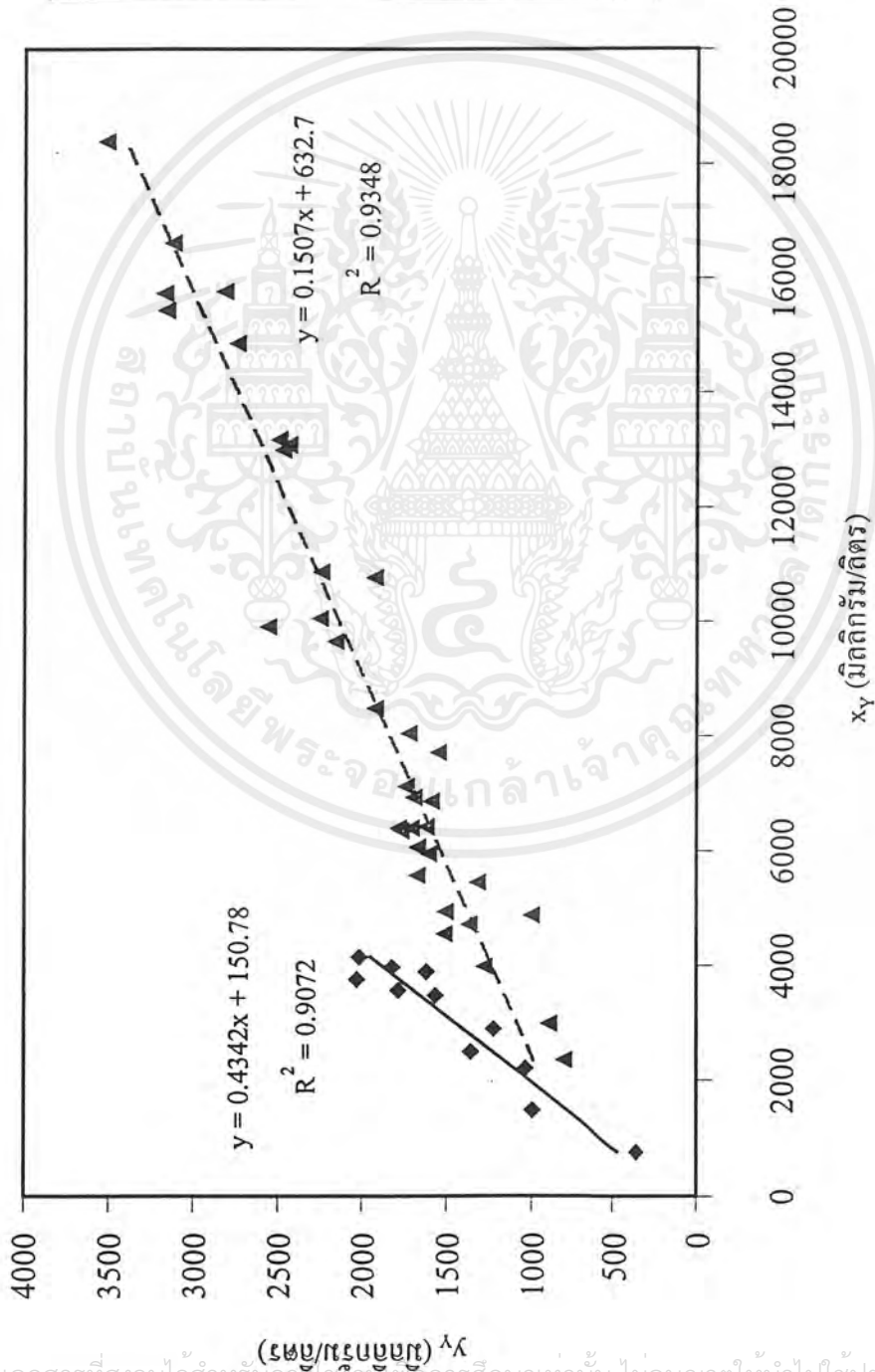


รูปที่ 8.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{Dy} กับ y_{Dy} ณ สภาวะสมมูล



รูปที่ 8.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_{yb} กับ y_{yb} ณ สภาวะสมดุค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x_y กับ y_x ณ สภาวะสมดุล

8.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท

ในการทดลองการสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่มีการป้อนกลับ อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารป้อน สารสกัด และสารป้อนกลับที่ใช้ ได้จากผลการทดลอง ในแบบจำลองการสกัดแบบกะ คือ อัตราส่วนของอัตราการไหลของส่วนสกัดต่อส่วนคงเหลือ เท่ากับ 2:1 และอัตราส่วนของอัตราการไหลของสารป้อนกลับต่อสารป้อน เท่ากับ 0.33:1 ในขณะที่เดียวกันก็ได้ทำการทดลองสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่ไม่มีการป้อนกลับ โดยใช้หอสกัดเดียวกันเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดแยกธาตุหายาก ซึ่งเลือกอัตราส่วนของอัตราการไหลของส่วนสกัดต่อส่วนคงเหลือหรือสารสกัดต่อสารป้อนที่ใช้ในการสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับนี้เป็น 1:1 เนื่องจาก กษม เชาวน์จินดาและคณะ [5] ได้ศึกษาพบว่า อัตราส่วนดังกล่าวการสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่ไม่มีการป้อนกลับ จะมีประสิทธิภาพในการสกัดแยกธาตุหายากได้ดี

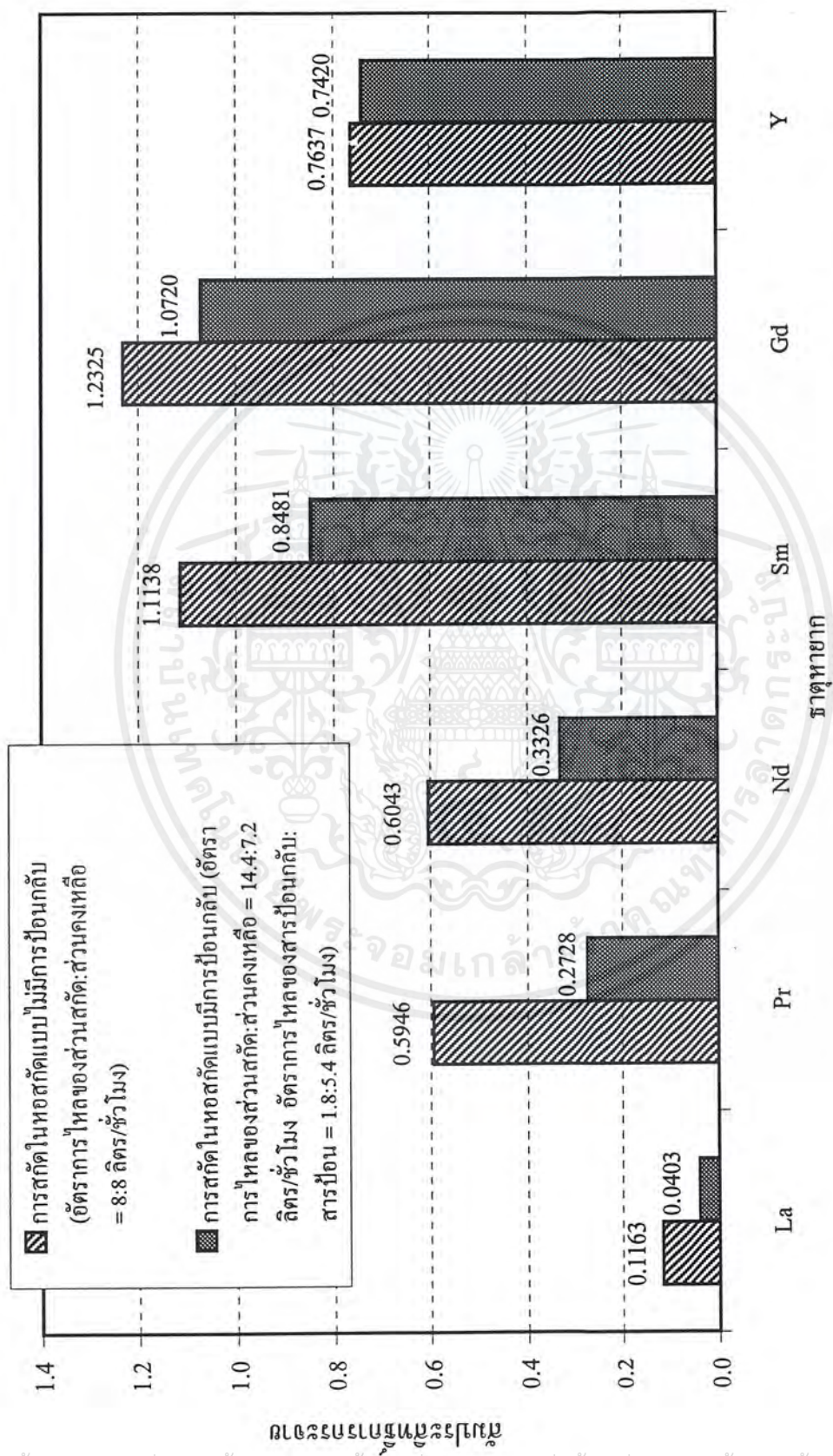
1) จากรูปที่ 8.24 และ 8.25 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกของธาตุหายาก เมื่อเทียบกับ L_a ของการสกัดในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่ไม่มีการป้อนกลับ เปรียบเทียบกับที่มีการป้อนกลับ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกมีแนวโน้มเดียวกันกับการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากสำหรับการสกัดที่ไม่มีการป้อนกลับมีค่าสูงกว่าแบบที่มีการป้อนกลับ และค่าการเลือกของธาตุหายากสำหรับการสกัดที่มีการป้อนกลับมีค่าสูงกว่าแบบที่ไม่มีการป้อนกลับ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าการเลือกของธาตุหายากกลุ่มหนักในรูปที่ 8.25 พบว่าสำหรับการสกัดที่มีการป้อนกลับ ธาตุหายากกลุ่มหนักจะถูกสกัดแยกออกจาก L_a ได้ดี

2) สำหรับ Y ในกรณีนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกของ Y มีค่าต่ำกว่าของ Gd และ Sm ทั้งนี้ Brown and Sherrington [19] ศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกของ Y มีค่าสูงขึ้นตามความเข้มข้นรวมของธาตุหายากในสารละลาย ซึ่งสารป้อนและสารป้อนกลับที่ใช้ในการสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทมี

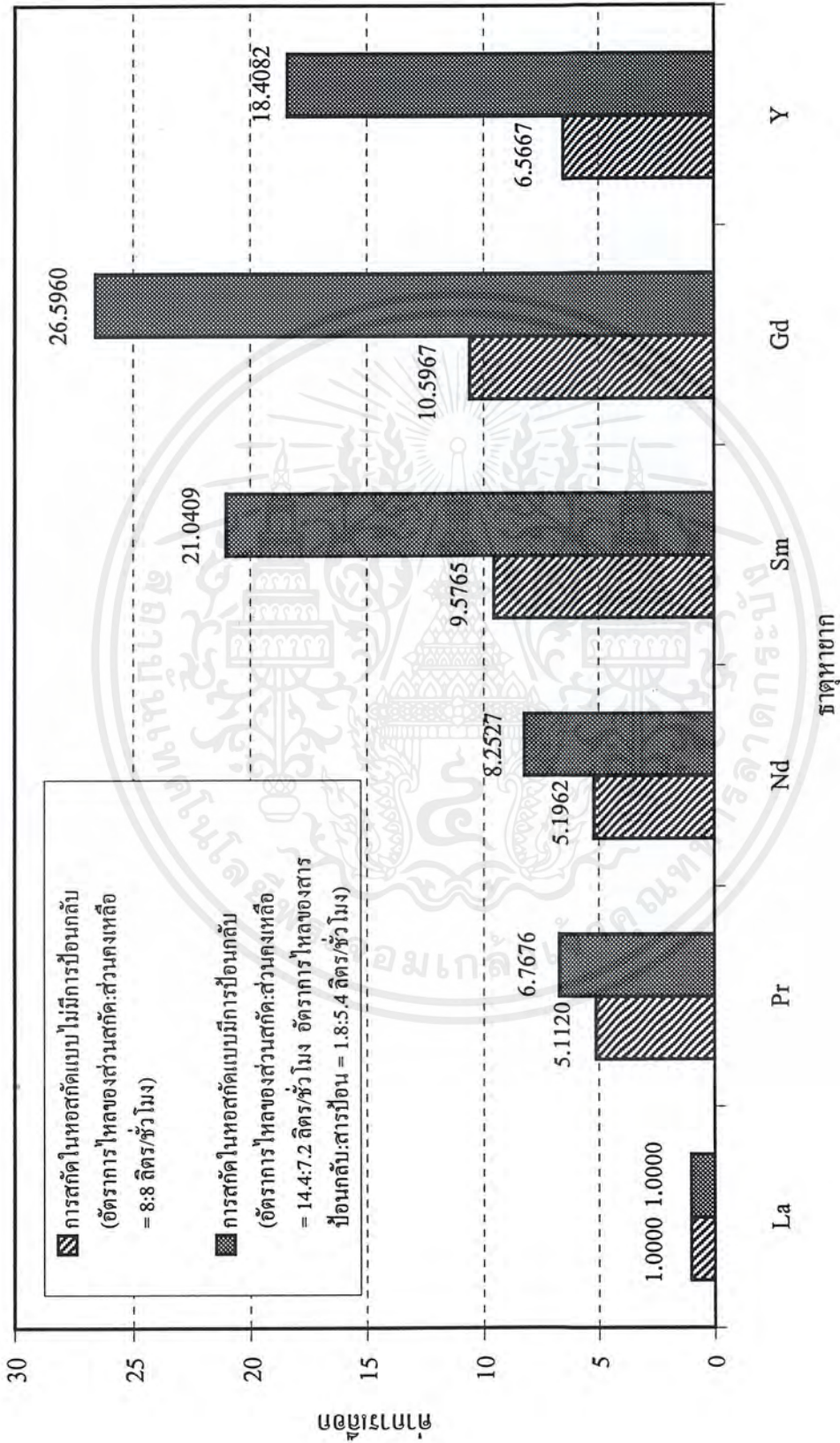
ความเข้มข้นรวมของธาตุหายากน้อยกว่าที่ใช้ในการสกัดธาตุหายากในแบบจำลองการสกัดแบบกะ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกของ Y มีแนวโน้มต่ำลง

3) จากรูปที่ 8.26 แสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุหายากที่เหลืออยู่ในส่วนคงเหลือ เมื่อพิจารณาการสกัดที่มีการป้อนกลับพบว่า ธาตุหายากกลุ่มเบาจะเหลืออยู่ในส่วนคงเหลือเพิ่มขึ้นจากแบบที่ไม่มี การป้อนกลับ และธาตุหายากกลุ่มหนักที่เหลืออยู่ในส่วนคงเหลือจะลดลงจากแบบที่ไม่มี การป้อนกลับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้การป้อนกลับนี้ทำให้การสกัดแยกกลุ่มธาตุหายากได้ดีขึ้น และเมื่อ พิจารณารูปที่ 8.27 ซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์ของธาตุหายากที่ถูกสกัดเข้าไปยังส่วนสกัดพบว่าให้ผลเช่น เดียวกันคือ เมื่อใช้การสกัดแบบป้อนกลับจะทำให้การสกัดธาตุหายากกลุ่มหนักเข้าไปในส่วน-สกัด เพิ่มขึ้นแต่ธาตุหายากกลุ่มเบาน้อยลง ยกเว้น Sm ซึ่งเป็นธาตุหายากกลุ่มเบาซึ่งมีแนวโน้มการสกัด คล้ายกับธาตุหายากกลุ่มหนัก ดังนั้นในระบบการสกัดนี้จะทำให้ธาตุหายากกลุ่มหนักรวมทั้ง Sm สามารถถูกสกัดเข้าไปในส่วนสกัดได้ดี

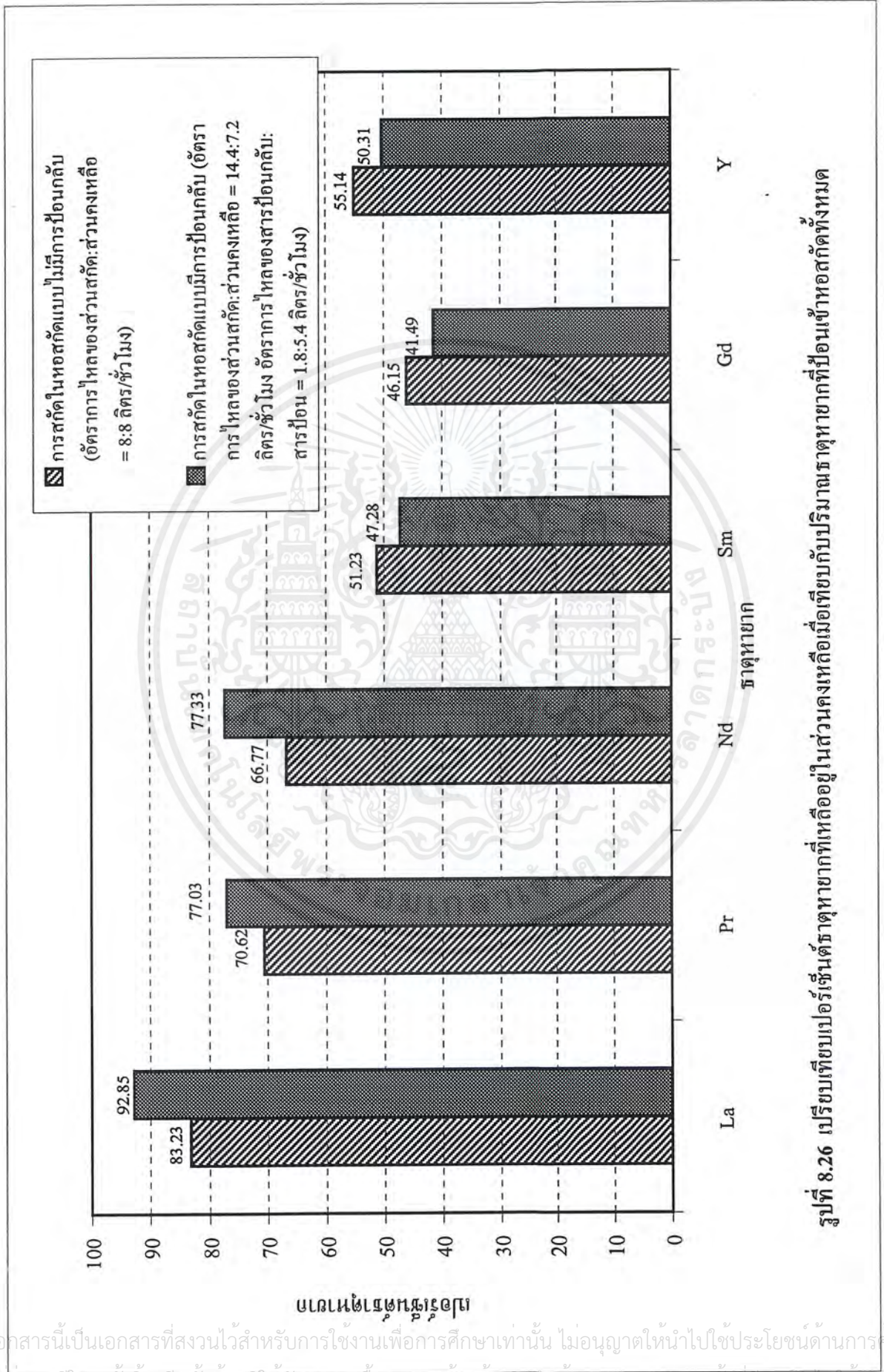
เนื่องจากค่าที่ใช้คำนวณเปอร์เซ็นต์ของธาตุหายากในรูปที่ 8.26 และ 8.27 คือ ค่าความ-เข้มข้นของธาตุหายากที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง ICP ดังนั้นจึงอาจมีความผิดพลาดเนื่องจากการวัด ทำให้ผลรวมของเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากที่เหลืออยู่ในส่วนคงเหลือ และเปอร์เซ็นต์ของธาตุหายากที่ ถูกสกัดเข้าไปยังส่วนสกัด มีค่าไม่เท่ากับ 100



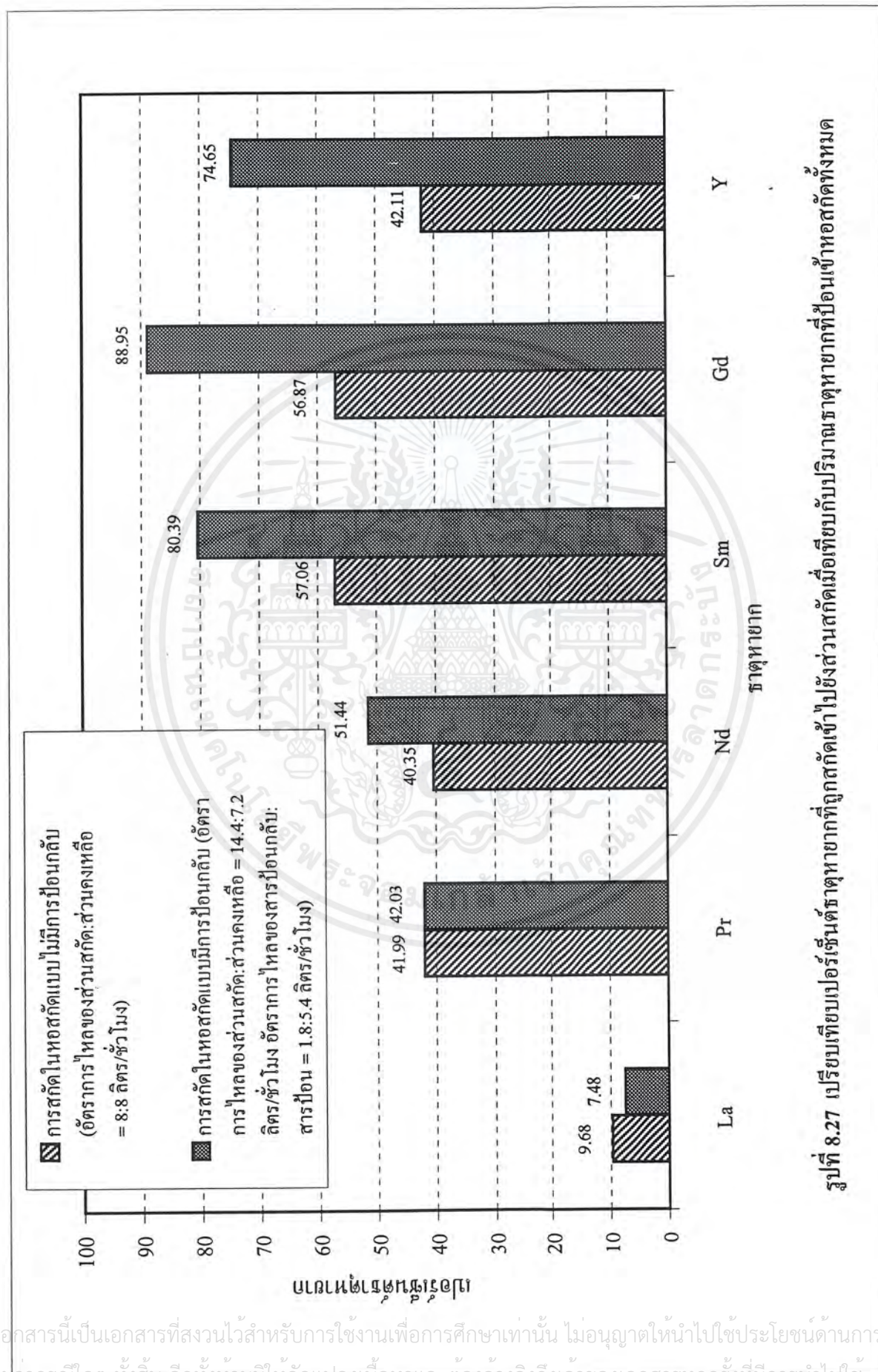
รูปที่ 8.24 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบพัลส์เฟรดเพท



รูปที่ 8.25 เปรียบเทียบค่าการเลือกของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบป้อนกลับเพื่อเรตเฟลท



รูปที่ 8.26 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากที่เหลืออยู่ในส่วนคงเหลือเมื่อเทียบกับปริมาณธาตุหายากที่ป้อนเข้าหลอดสกัดทั้งหมด



รูปที่ 8.27 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากที่ถูกสกัดเข้าไปยังส่วนสกัดเมื่อเทียบกับปริมาณธาตุหายากที่ป้อนเข้าหลอดสกัดทั้งหมด

บทที่ 9

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการทดลอง

1) การสกัดธาตุหายากแบบที่มีการป้อนกลับโดยใช้สารป้อนกลับเป็นสารละลายแเรเอิร์ทไนเทรตที่มีความเข้มข้นของธาตุหายากกลุ่มหนักสูงกว่าสารป้อน จะให้ค่าการเลือกของธาตุหายากกลุ่มหนักเมื่อเทียบกับ La สูงกว่าการสกัดแบบที่ไม่มีการป้อนกลับ นั่นคือ การสกัดแบบมีการป้อนกลับจะทำให้ธาตุหายากกลุ่มหนักและธาตุหายากกลุ่มเบาแยกออกจากกัน ได้ดีกว่าการสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ

2) สำหรับในช่วงของอัตราส่วนของสารป้อน สารสกัด และสารป้อนกลับที่ทำการศึกษาในการสกัดแบบมีการป้อนกลับ อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้เกิดการแยกของธาตุหายากกลุ่มหนักและธาตุหายากกลุ่มเบาออกจากกันได้ดี คือ อัตราส่วนของส่วนสกัดต่อส่วนคงเหลือเท่ากับ 2:1 และอัตราส่วนของสารป้อนกลับต่อสารป้อนเท่ากับ 0.33:1

3) สำหรับการสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท การใช้การป้อนกลับ จะทำให้ธาตุหายากกลุ่มเบาถูกสกัดเข้าไปยังส่วนสกัดได้น้อยลง และธาตุหายากกลุ่มหนักถูกสกัดเข้าไปยังส่วนสกัดได้ดีขึ้น จึงทำให้เกิดการแยกกลุ่มของธาตุหายากกลุ่มหนักและธาตุหายากกลุ่มเบาได้ดีกว่าการสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ

9.2 ข้อเสนอแนะ

1) การสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลทที่มีการป้อนกลับ ควรทำการศึกษาค้นหาตำแหน่งป้อนสารป้อนที่เหมาะสมในหอสกัด คือ ตำแหน่งที่สารละลายเข้มข้นในหอสกัดมี

องค์ประกอบและคุณสมบัติใกล้เคียงกับสารป้อนมากที่สุด สำหรับในโครงการนี้ไม่สามารถทำเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาหาตำแหน่งของสารป้อนที่เหมาะสมได้ เนื่องจากสารป้อนและสารป้อนกลับมีปริมาณน้อย ทำให้ไม่เพียงพอที่จะศึกษาในเรื่องนี้ได้

2) จากผลการทดลองที่อัตราส่วนของส่วนสกัดต่อส่วนคงเหลือเท่ากับ 2 : 1 และสารป้อนกลับต่อสารป้อนเท่ากับ 0.33 : 1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะช่วงข้อมูลที่ศึกษาเท่านั้น คือ ช่วงส่วนสกัดต่อส่วนคงเหลือเท่ากับ 1:1 และ 2:1 สารป้อนกลับต่อสารป้อนเท่ากับ 0.33:1, 0.5:1 และ 1:1 ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมที่อัตราส่วนอื่น ๆ ต่อไป ซึ่งควรศึกษาในช่วงอัตราส่วนของสารป้อนกลับต่อสารป้อนระหว่าง 0:1 ถึง 0.33:1 เพื่อพิจารณาค่าการเลือกของธาตุหายากกลุ่มหนักว่ามีค่าสูงขึ้นหรือไม่ และนำมาพิจารณาร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายเพื่อใช้อัตราส่วนของสารป้อนกลับต่อสารป้อนที่เหมาะสมที่สุดได้

3) ในการสกัดธาตุหายากด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลวในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์-ฟอเรดเพลท เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการสกัดหรือในการถ่ายเทมวลของสารสูงขึ้น สภาวะการทำงานของหอสกัดควรอยู่ในบริเวณอิมัลชัน ดังรูปที่ 6.1 ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงค่าความถี่แอมพลิจูด และอัตราการใช้รวมของสารในกระบวนการสกัดเพื่อหาขอบเขตของสภาวะการทำงานของหอสกัดที่อยู่ในบริเวณอิมัลชัน

4) จากข้อมูลสมมูลที่ได้จากการสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ พบว่าการใช้สารป้อนกลับมีผลต่อแนวโน้มของข้อมูลสมมูล ดังนั้นในการใช้สารป้อนกลับจึงควรคำนึงถึงคุณสมบัติของสารป้อนกลับที่ใช้ด้วย เช่น ความเข้มข้นของกรดไนตริก เนื่องจากความเข้มข้นของกรดไนตริกในเฟสน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายาก นั่นคือ ยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริกในเฟสน้ำเพิ่มขึ้นความสามารถในการสกัดธาตุหายากก็ยิ่งน้อยลง ซึ่งในการทดลองอาจเป็นไปได้ว่าความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารป้อนกลับมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารป้อนจึงทำให้เมื่อใช้สารป้อนกลับ แนวโน้มของข้อมูลสมมูลเปลี่ยนไป

5) การใช้สารป้อนกลับจะทำให้การสกัดแยกธาตุหายากกลุ่มหนักออกจากธาตุหายากกลุ่มเบาดีขึ้น แต่ทั้งนี้ควรศึกษาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ประกอบกันด้วย เนื่องจากการใช้สารป้อนกลับต้องใช้พลังงานความร้อนในการระเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายของธาตุหายากในการเตรียมสารป้อนกลับ

เอกสารอ้างอิง

1. สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข, ฐัจจกษัตราศุหายาก, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาดุหายาก สำนักงานปลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ภัทรวงวิทยาสาตร์ เทคโนโลยี่และลิ่งแวงล้อม, (ม.ป.ท.), 2539.
2. วิชาญ อมตารยกุล, แร้โมนาไซต์ในประเทศไทย, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาดุหายาก สำนักงานปลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ภัทรวงวิทยาสาตร์ เทคโนโลยี่และลิ่งแวงล้อม, (ม.ป.ท.), 2539.
3. ปรารณนา คิ้วสุวรรณ และสุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข, การสกัดอดิเตรียมในแร่ซีโนไทม์, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาดุหายาก สำนักงานปลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ภัทรวงวิทยาสาตร์ เทคโนโลยี่และลิ่งแวงล้อม, (ม.ป.ท.), 2538.
4. สมชาย นาคะศคฺงรัตน์, โมนาไซต์และแร่ในเครือเดียวกัน, (ม.ป.ท., ม.ป.ป.).
5. กษม เขาวนจินดา, บุญรัตน์ สุฎาารี และปิยฉัตร คุลยเกียรติ, การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการสกัดแร่ธาดุหายากจากแร่โมนาไซต์ โดยหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรทท์-เพลท, วิทยานิพนธ์ปริญาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.
6. Seader, J.D. and Henley, E. J., **Separation Process Principles**, John Wiley&Sons, 1998.
7. นงลักษณ์ พลรักษา, ประพจน์ วัฒนการุณวงศ์, พรจันท์ กังแฮ และวิวัฒน์ โษครุ่งรัตนชัย, การศึกษาภาวะการท่วมในคอลัมน์ระบบพัลส์แบบแผ่นในเจาะรู, วิทยานิพนธ์ปริญาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2538.
8. Foust, A.S, Wenzel, L.A., Clump C.W., Maus, L. and Andersen, L.B., **Principles of Unit Operations**, 2nd ed., John Wiley&Sons, 1980.
9. Laddha, G.S. and Degaleesan, T.E., **Transport Phenomena in Liquid Extraction**, Tata McGraw-Hill Publishing Co.Ltd., 1976.
10. Thornton, J.D., **Science and Practice of liquid-liquid extraction**, volume 2, Oxford : Clarendon Press., 1992.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

11. Thornton, J.D., **Science and Practice of liquid-liquid extraction**, volume 1, Oxford : Clarendon Press., 1992.
12. Treybal, R.E., **Liquid extraction**, 2nd ed., N.Y. : McGraw-Hill Book Co., 1963.
13. Lo, T.C., Baird, M.H.I. and Hanson, C., eds., **Handbook of Solvent Extraction**, Wiley-Interscience, 1983.
14. ปฏิภาณ ปานทอง, ศรีพิชัย แซ่เซียว, สลักจิต รอบจันทน์ และสุรพันธ์ โปวอนุสรณ์, การจำลองการสกัดของเหลวแบบไหลสวนทางกันอย่างต่อเนื่อง, วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2538.
15. Bochinski, J., Smutz, M. and Spedding, F.H., **Separation of Individual Rare Earths by Liquid-Liquid Extraction from Multicomponent Monazite Rare Earth Nitrates**.
16. กาญจนา กิตติชนะเจริญ, มานะ วงศ์เกษม และศิริพันธ์ ถิมพงษ์, การศึกษาเกี่ยวกับการสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์โดยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว, วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
17. Weaver, B., Kappleman, F.A. and Topp, A.C., **American Chemical Society Journal**, volume 75, 1953.
18. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม, หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร (หน่วย SI), สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
19. Brown, C. and Sherrington, L.G., **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, volumn 29, 1979.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ไตรบิวทิลฟอสเฟต (Tri-n-butylphosphate หรือ TBP) [9-10]

สูตรโมเลกุล : $[(C_4H_9O)_3P=O]$

คุณสมบัติทางกายภาพ ที่ 25 °C:

- | | |
|-------------------------------|----------------------|
| - จุดวาบไฟ | 145 องศาเซลเซียส |
| - ความหนาแน่น | 0.975 กรัม/มิลลิลิตร |
| - ค่าความหนืด | 3.2 มิลลิพอยต์ |
| - ค่าการละลายได้ของ TBP ในน้ำ | 0.39 กรัม/ลิตร |
| - ค่าการละลายได้ของน้ำใน TBP | 64 กรัม/ลิตร |

TBP เป็นสารประกอบอินทรีย์มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีความเสถียรมากไม่แตกตัวได้ง่ายแม้ในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง การใช้ TBP ในการสกัดโลหะจะมีการใช้ร่วมกับสารอื่น (Diluent) คือ ตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ ได้แก่

- พาราฟินไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันก๊าด (Kerosene)
- อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน
- ตัวทำละลายอินทรีย์ไม่มีขั้ว เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4)

ข้อดีในการใช้สารละลายทำให้เจือจาง

- 1) เพื่อลดแรงยึดเกาะของ TBP ในการสกัด เนื่องจาก TBP จับกับโลหะอย่างแน่นหนา มาก การสกัดกลับจะทำได้ยาก
- 2) ปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น และความหนืด ให้เหมาะสมกับสถานะการสกัด

เนื่องจาก TBP มีความสามารถในการสกัดโลหะได้ดี จึงมีความสำคัญในทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการสกัดแบริลล์ ใช้แยกเซอร์โคเนียมและฮาฟเนียม ใช้เป็นแคตาลิสต์ และเป็นสารป้องกันการกัดกร่อน

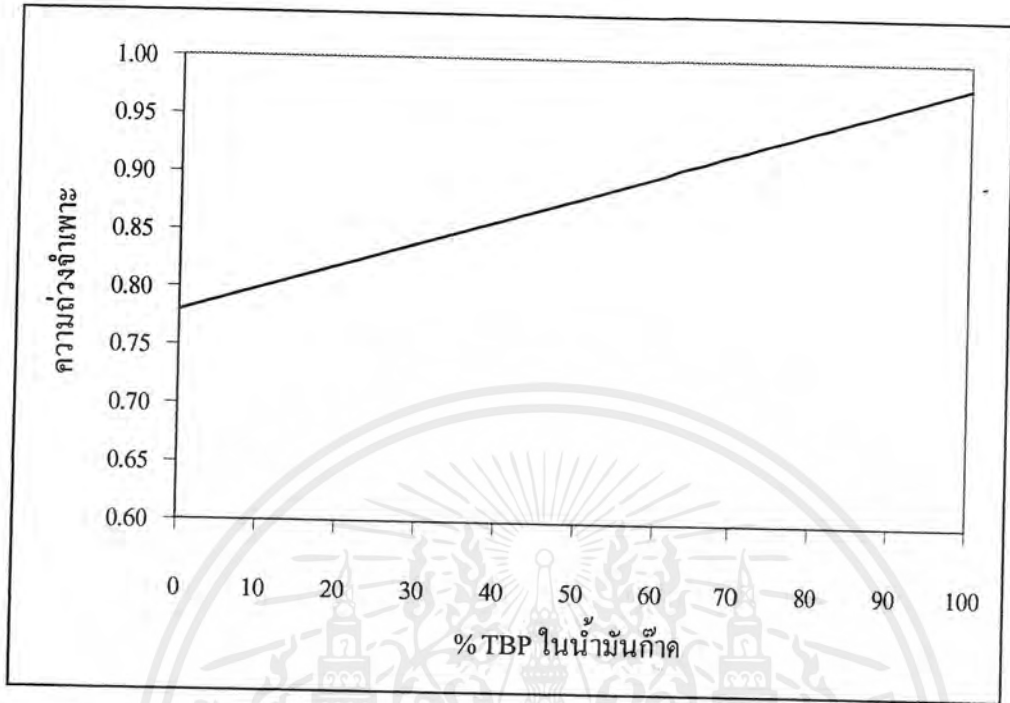
การใช้ TBP เป็นตัวทำละลาย และสกัดแบริลล์จากสารละลายในรูปไนเตรต แสดงได้ดังสมการ



เมื่อ Ln เป็น แลนทาไนด์ (Lanthanide)

เส้นขีดข้างบนแสดงว่า อยู่ในเฟสอินทรีย์

จากความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับ % TBP ในน้ำมันก๊าด ดังรูปที่ ข.1 พบว่าที่ 50% TBP ในน้ำมันก๊าดมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.88 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดแยกแบริลล์ ทั้งประสิทธิภาพของการสกัดและเศรษฐกิจ



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับ % TBP ในน้ำมันก๊าด
(ที่มา : สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข กองเคมี สำนักงานปรมานูเพื่อสันติ)

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดลองการสกัดธาตุหายากโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

ค.1 องค์ประกอบของสารป้อนและสารป้อนกลับที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ความถ่วงจำเพาะและความเข้มข้นของสารป้อนและสารป้อนกลับที่ใช้ในการทดลอง

| สารละลาย | ความถ่วงจำเพาะ | ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-------------|----------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| สารป้อน | 1.661 | 179176 | 18869 | 64233 | 8904 | 4387 | 4524 |
| สารป้อนกลับ | 1.480 | 24725 | 14152 | 61070 | 17750 | 12929 | 18779 |

ค.2 ความเข้มข้นของส่วนคงเหลือจากกรวยแยกที่ 6 (R_6) ของแต่ละรอบ

ตารางที่ ค.2 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 1:1 สารป้อนกลับ:สารป้อน = 0:1

| รอบ | ความเข้มข้นของแรเอิร์ทใน R_6 (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-----|---|-------|-------|------|-------|-------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 1 | 159798 | 9820 | 26532 | 1937 | 477.4 | 366.2 |
| 2 | 190920 | 15902 | 48544 | 4161 | 1211 | 852 |
| 3 | 184925 | 17359 | 56638 | 5542 | 1833 | 1305 |
| 4 | 168270 | 16140 | 54064 | 5800 | 2089 | 1548 |
| 5 | 187160 | 18114 | 60873 | 6923 | 2677 | 2107 |
| 6 | 180463 | 17344 | 58237 | 6784 | 2693 | 2162 |
| 7 | 181240 | 17469 | 58412 | 6854 | 2786 | 2306 |
| 8 | 172546 | 16818 | 52745 | 6676 | 2868 | 2410 |
| 9 | 170285 | 16614 | 52297 | 6626 | 2848 | 2417 |
| 10 | 182576 | 17735 | 60429 | 7051 | 2846 | 2490 |

ตารางที่ ค.3 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 1:1 สารป้อนกลับ:สารป้อน = 0.33:1

| รอบ | ความเข้มข้นของแรเอิร์ทใน R_6 (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-----|---|-------|-------|------|------|------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 1 | 141612 | 14344 | 48269 | 6342 | 3048 | 3158 |
| 2 | 148423 | 17228 | 61158 | 8799 | 4284 | 3982 |
| 3 | 146989 | 17455 | 62568 | 9402 | 4686 | 4294 |
| 4 | 148052 | 17741 | 63649 | 9861 | 4991 | 4592 |
| 5 | 145181 | 17456 | 62863 | 9798 | 4989 | 4603 |
| 6 | 146270 | 17397 | 62249 | 9710 | 4937 | 4555 |
| 7 | 145959 | 17499 | 62712 | 9813 | 5011 | 4633 |
| 8 | 146912 | 17342 | 62145 | 9634 | 4907 | 4546 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 1:1 สารป้อนกลับ:สารป้อน = 0.5:1

| รอบ | ความเข้มข้นของแรเอิร์ทใน R_c (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-----|---|-------|-------|-------|------|------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 1 | 131079 | 15045 | 52714 | 7951 | 4112 | 4524 |
| 2 | 136658 | 17228 | 62469 | 10056 | 5289 | 5163 |
| 3 | 138298 | 17677 | 64654 | 10895 | 5851 | 5687 |
| 4 | 134450 | 17114 | 63301 | 10662 | 5733 | 5560 |
| 5 | 129181 | 16488 | 60810 | 10300 | 5586 | 5448 |

ตารางที่ ค.5 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 1:1 สารป้อนกลับ:สารป้อน = 1:1

| รอบ | ความเข้มข้นของแรเอิร์ทใน R_c (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-----|---|-------|-------|-------|------|------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 1 | 103270 | 14017 | 52079 | 8830 | 4894 | 5504 |
| 2 | 106251 | 16190 | 62132 | 11589 | 6499 | 6709 |
| 3 | 105685 | 15970 | 61446 | 11836 | 6869 | 7233 |
| 4 | 101979 | 15985 | 60750 | 11974 | 7141 | 7563 |
| 5 | 103085 | 15928 | 60877 | 11803 | 6962 | 7517 |
| 6 | 101731 | 15710 | 60135 | 11588 | 6724 | 7320 |
| 7 | 101139 | 15849 | 61254 | 11874 | 6925 | 7528 |
| 8 | 103502 | 15989 | 61510 | 11977 | 7073 | 7699 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 สารป้อนกลับ:สารป้อน = 0:1

| รอบ | ความเข้มข้นของแร่เอิร์ทใน R_6 (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-----|--|-------|-------|------|-------|-------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 1 | 120998 | 5161 | 11039 | 783 | 223.5 | 174 |
| 2 | 169860 | 9240 | 20790 | 1393 | 325.7 | 202.3 |
| 3 | 179988 | 12509 | 30777 | 2116 | 470.8 | 267.5 |
| 4 | 176953 | 14340 | 38548 | 2788 | 631 | 348.1 |
| 5 | 177597 | 15451 | 44404 | 3401 | 806 | 437.8 |
| 6 | 181708 | 16136 | 50347 | 3787 | 1011 | 606 |
| 7 | 182786 | 16233 | 51938 | 4260 | 1093 | 638 |
| 8 | 179776 | 16004 | 51731 | 4428 | 1195 | 693 |
| 9 | 171367 | 15388 | 47697 | 4454 | 1276 | 717 |
| 10 | 171058 | 15332 | 47520 | 4512 | 1331 | 752 |

ตารางที่ ค.7 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 สารป้อนกลับ:สารป้อน = 0.33:1

| รอบ | ความเข้มข้นของแร่เอิร์ทใน R_6 (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-----|--|-------|-------|------|------|------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 1 | 129584 | 9609 | 29355 | 2877 | 1236 | 1397 |
| 2 | 151906 | 14325 | 46939 | 4797 | 1885 | 1667 |
| 3 | 146362 | 15437 | 53123 | 5812 | 2326 | 1829 |
| 4 | 140720 | 15408 | 54277 | 5286 | 2551 | 1924 |
| 5 | 149106 | 18159 | 60247 | 7706 | 3372 | 2227 |
| 6 | 149945 | 18382 | 61067 | 8015 | 3564 | 2311 |
| 7 | 148855 | 18451 | 60890 | 8129 | 3662 | 2367 |
| 8 | 146130 | 18199 | 59719 | 8078 | 3659 | 2345 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

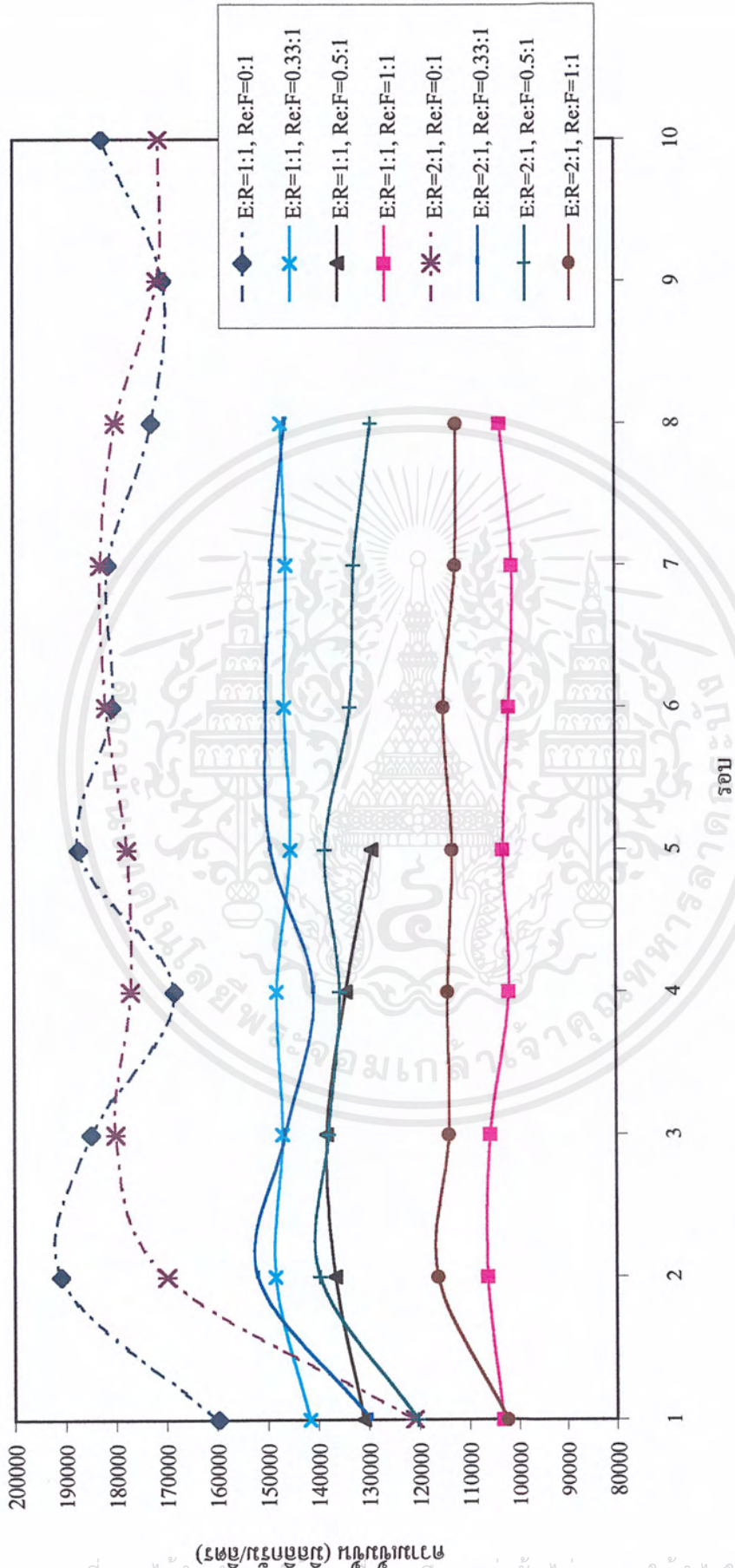
ตารางที่ ค.8 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 สารป้อนกลับ:สารป้อน = 0.5:1

| รอบ | ความเข้มข้นของแรเอิร์ทใน R_6 (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-----|---|-------|-------|------|------|------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 1 | 120314 | 11759 | 33896 | 4217 | 2114 | 2025 |
| 2 | 139676 | 15698 | 51462 | 6498 | 3106 | 2494 |
| 3 | 137915 | 16758 | 57634 | 7618 | 3574 | 2555 |
| 4 | 135584 | 17087 | 59807 | 8414 | 4049 | 2800 |
| 5 | 138455 | 18051 | 60960 | 9212 | 4630 | 3004 |
| 6 | 133372 | 16941 | 58679 | 8831 | 4420 | 2984 |
| 7 | 132624 | 16884 | 58193 | 8892 | 4490 | 3034 |
| 8 | 129202 | 16478 | 56608 | 8768 | 4451 | 2989 |

ตารางที่ ค.9 ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 สารป้อนกลับ:สารป้อน = 1:1

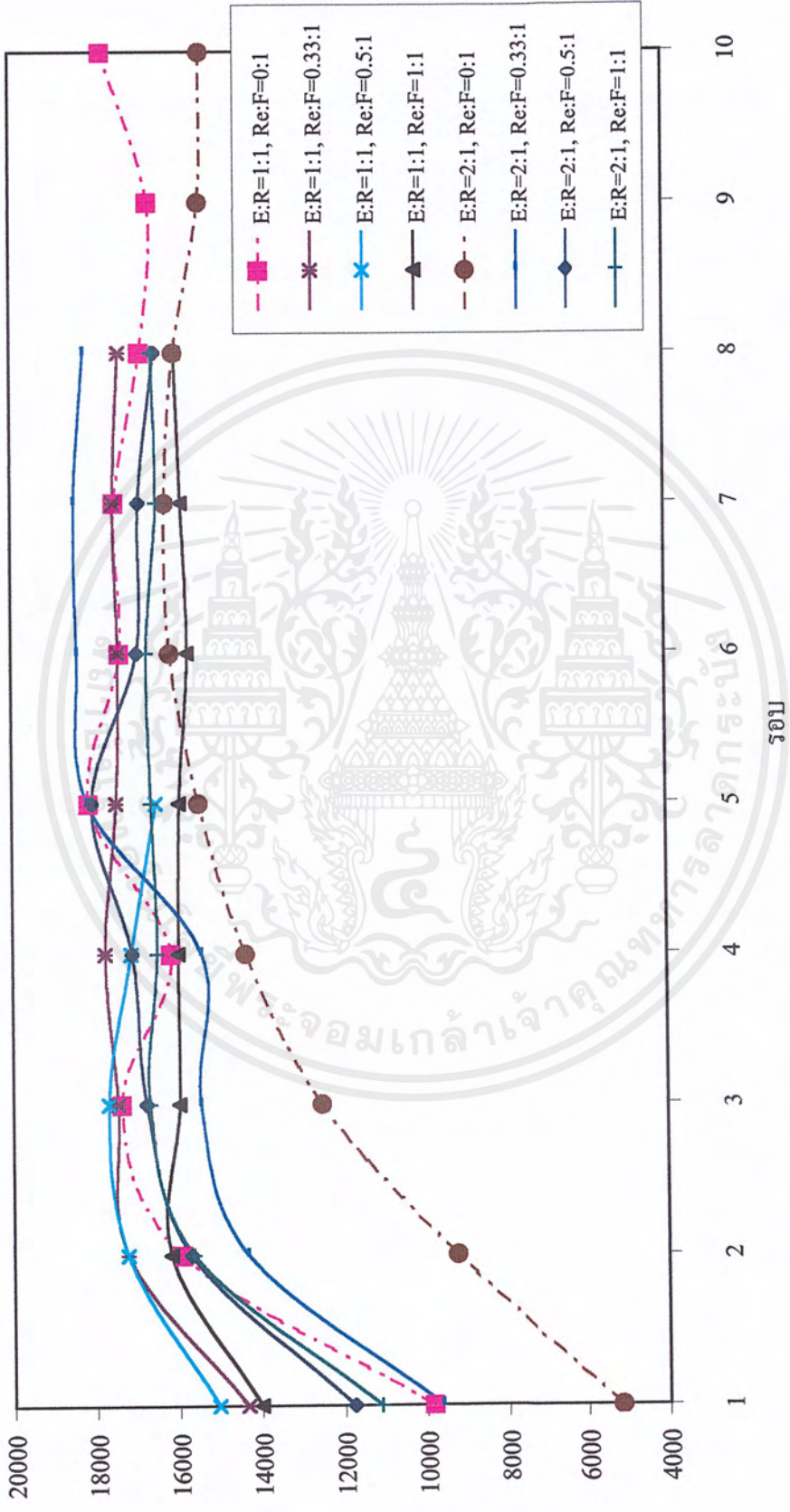
| รอบ | ความเข้มข้นของแรเอิร์ทใน R_6 (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-----|---|-------|-------|-------|------|------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 1 | 102391 | 11106 | 39049 | 5338 | 2622 | 3000 |
| 2 | 116255 | 15646 | 58720 | 8813 | 4282 | 3853 |
| 3 | 114064 | 16676 | 64417 | 10620 | 5301 | 4405 |
| 4 | 114238 | 16479 | 63544 | 10946 | 5582 | 4521 |
| 5 | 113202 | 16605 | 64466 | 11372 | 5850 | 4698 |
| 6 | 114831 | 16706 | 65276 | 11566 | 6066 | 4883 |
| 7 | 112431 | 16460 | 63549 | 11333 | 5908 | 4737 |
| 8 | 112328 | 16549 | 64453 | 11409 | 5977 | 4865 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



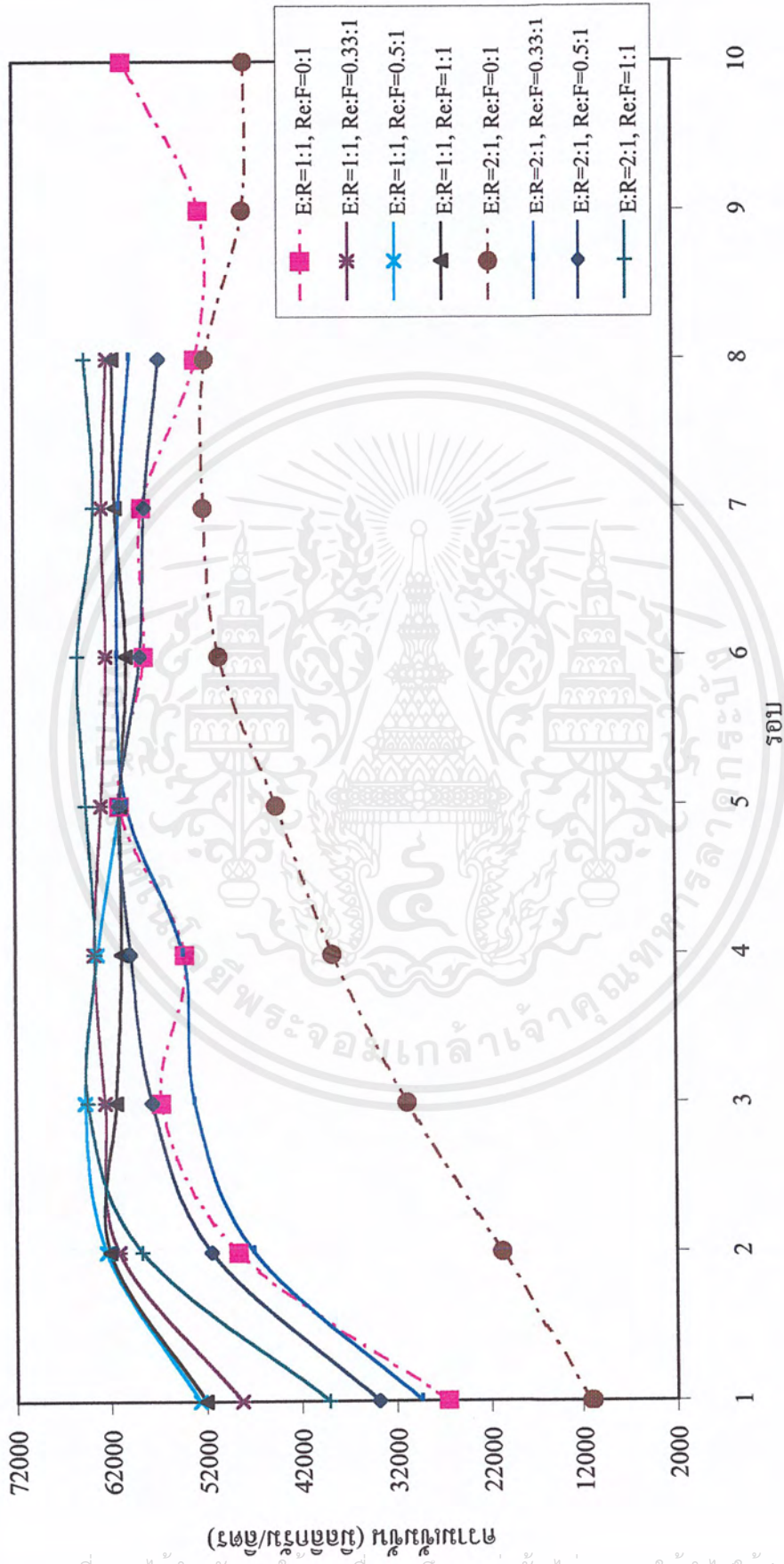
รูปที่ ก.1 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ La ในส่วนคงเหลือจากการรวมแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



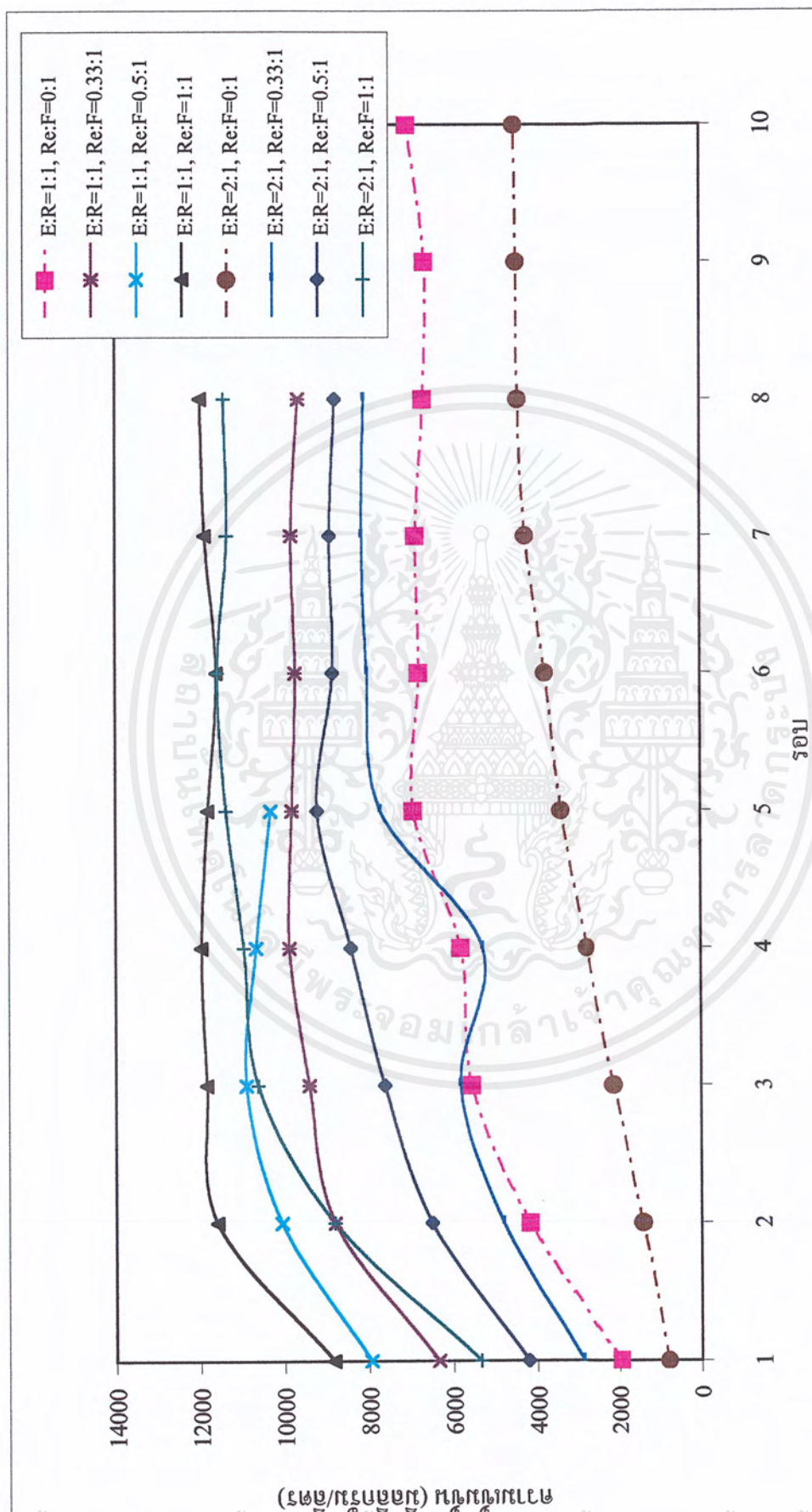
รูปที่ ค.2 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ Pr ในส่วนคงเหลือจากการแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



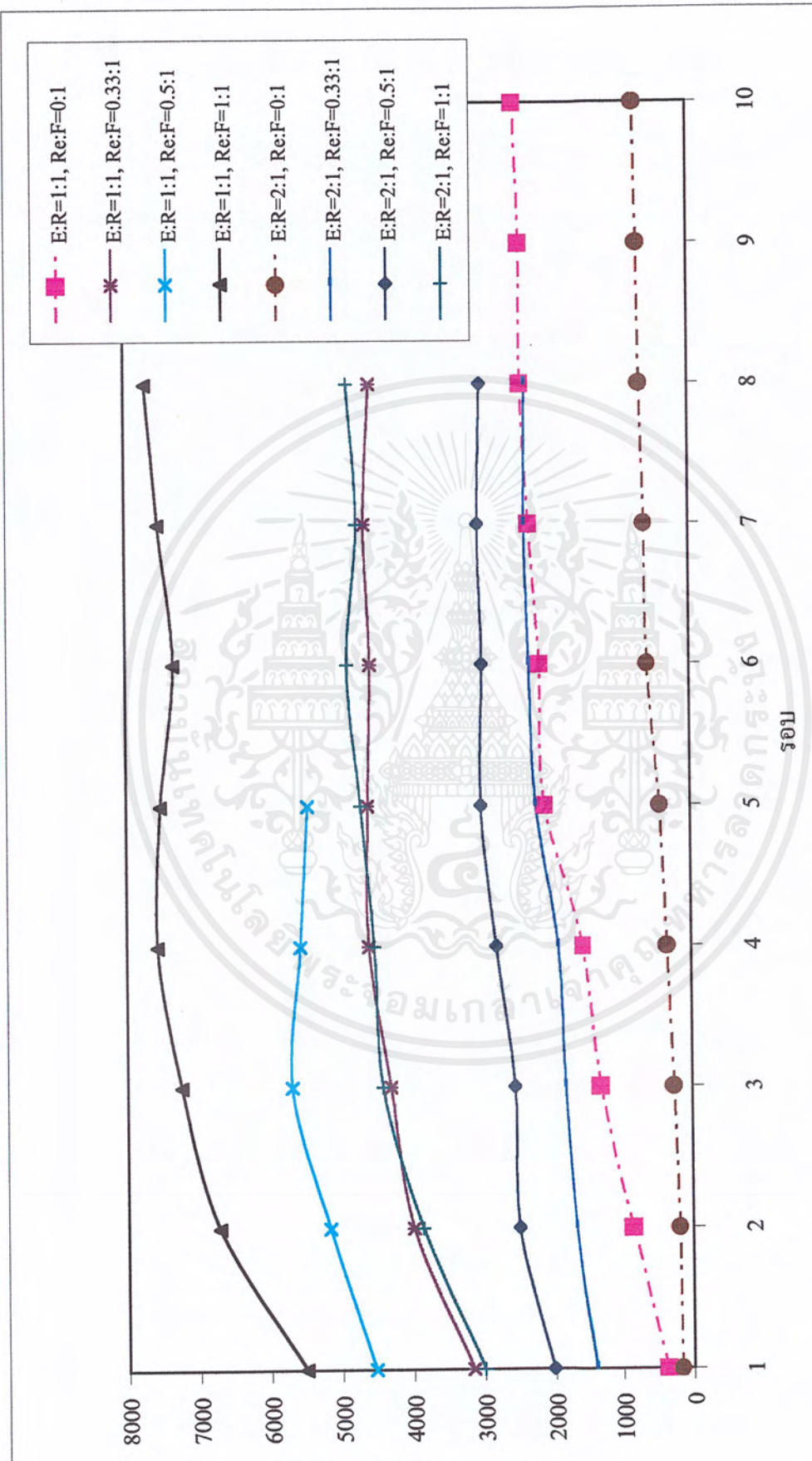
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ Nd ในส่วนคณฑีจากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.4 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ S_m ในส่วนคองเทรียมจากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 เปรียบเทียบความเข้มข้นของ Y ในส่วนคงเหลือจากกรวยแยกที่ 6 ของแต่ละรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในหอสมุดที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกานำไปใช้

ภาคผนวก ง

ข้อมูลสมมูลของธาตุหายากที่ได้จากการทดลองการสกัดธาตุหายาก
โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลสมมูลของ La

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ La (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|------------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ ($x_{i,a}$) | ส่วนสกัด ($y_{i,a}$) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 285874 | 3910 |
| | | 2 | 151933 | 3992 |
| | | 3 | 169561 | 4110 |
| | | 4 | 172047 | 3960 |
| | | 5 | 173186 | 4712 |
| | | 6 | 182576 | 5430 |
| | 0.33:1 | 1 | 26322 | 209.4 |
| | | 2 | 37307 | 304.6 |
| | | 3 | 149221 | 1828 |
| | | 4 | 151183 | 1728 |
| | | 5 | 151466 | 1636 |
| | | 6 | 146912 | 2658 |
| | 0.5:1 | 1 | 24335 | 395.2 |
| | | 2 | 31969 | 233.8 |
| | | 3 | 130571 | 1772 |
| | | 4 | 129932 | 1372 |
| | | 5 | 126956 | 1436 |
| | | 6 | 129181 | 1714 |
| | 1:1 | 1 | 27427 | 247.8 |
| | | 2 | 30835 | 201.8 |
| | | 3 | 108323 | 1194 |
| | | 4 | 105494 | 897.2 |
| | | 5 | 107045 | 1890 |
| | | 6 | 103502 | 1076 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ La (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{La}) | ส่วนสกัด (y_{La}) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 168167 | 3612 |
| | | 2 | 171082 | 3984 |
| | | 3 | 169267 | 3706 |
| | | 4 | 169634 | 4146 |
| | | 5 | 171432 | 6264 |
| | | 6 | 171058 | 5658 |
| | 0.33:1 | 1 | 27460 | 51.62 |
| | | 2 | 43062 | 139 |
| | | 3 | 141897 | 2322 |
| | | 4 | 142867 | 2174 |
| | | 5 | 148869 | 2390 |
| | | 6 | 146130 | 3190 |
| | 0.5:1 | 1 | 25619 | 127.2 |
| | | 2 | 37061 | 417.6 |
| | | 3 | 135401 | 1612 |
| | | 4 | 139179 | 1710 |
| | | 5 | 132717 | 1888 |
| | | 6 | 129202 | 2578 |
| | 1:1 | 1 | 25306 | 213.8 |
| | | 2 | 31070 | 152 |
| | | 3 | 110612 | 1030 |
| | | 4 | 110792 | 797.6 |
| | | 5 | 112044 | 1098 |
| | | 6 | 112328 | 1274 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลสมมูลของ Ce

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Ce (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Ce}) | ส่วนสกัด (y_{Ce}) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 9082 | 265.4 |
| | | 2 | 4758 | 279.8 |
| | | 3 | 5359 | 287.4 |
| | | 4 | 5411 | 275.2 |
| | | 5 | 5498 | 1824 |
| | | 6 | 5350 | 4228 |
| | 0.33:1 | 1 | 2053 | 53.66 |
| | | 2 | 2524 | 56.8 |
| | | 3 | 4831 | 137 |
| | | 4 | 4925 | 147.2 |
| | | 5 | 4986 | 133.6 |
| | | 6 | 4584 | 2244 |
| | 0.5:1 | 1 | 1817 | - ¹ |
| | | 2 | 2199 | - |
| | | 3 | 4474 | - |
| | | 4 | 4411 | 104.2 |
| | | 5 | 4254 | - |
| | | 6 | 4377 | 213.4 |
| | 1:1 | 1 | 4252 | 71.5 |
| | | 2 | 4328 | 45.26 |
| | | 3 | 4157 | 143.8 |
| | | 4 | 3920 | 98.68 |
| | | 5 | 3908 | 135.6 |
| | | 6 | 3632 | 311.6 |

¹ เครื่อง ICP ไม่สามารถวัดความเข้มข้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Ce (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Ce}) | ส่วนสกัด (y_{Ce}) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 5499 | 274.2 |
| | | 2 | 5593 | 282.4 |
| | | 3 | 5457 | 268.6 |
| | | 4 | 5557 | 300.2 |
| | | 5 | 5544 | 454.4 |
| | | 6 | 5100 | 356.2 |
| | 0.33:1 | 1 | 949 | 76.5 |
| | | 2 | 3030 | 68.26 |
| | | 3 | 4908 | 187 |
| | | 4 | 4962 | 186.4 |
| | | 5 | 5178 | 212.2 |
| | | 6 | 6089 | 259.8 |
| | 0.5:1 | 1 | 2033 | 45.1 |
| | | 2 | 2626 | 62.42 |
| | | 3 | 4701 | 126.8 |
| | | 4 | 5966 | 137.8 |
| | | 5 | 6448 | 157.8 |
| | | 6 | 6194 | 200.6 |
| | 1:1 | 1 | 1895 | 85.98 |
| | | 2 | 2178 | 26.64 |
| | | 3 | 3975 | 90.38 |
| | | 4 | 4029 | 66.18 |
| | | 5 | 4099 | 133.2 |
| | | 6 | 4063 | 119 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลสมมูลของ Pr

| ส่วนศักดิ์:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Pr (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|------------------------|---------------------|------------|------------------------------------|----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_p) | ส่วนศักดิ์ (y_p) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 30291 | 1786 |
| | | 2 | 16061 | 1890 |
| | | 3 | 17917 | 1926 |
| | | 4 | 18246 | 1840 |
| | | 5 | 18341 | 2058 |
| | | 6 | 17735 | 2196 |
| | 0.33:1 | 1 | 14583 | 520.4 |
| | | 2 | 16986 | 622.2 |
| | | 3 | 18155 | 1044 |
| | | 4 | 18627 | 1038 |
| | | 5 | 18738 | 1046 |
| | | 6 | 17342 | 1326 |
| | 0.5:1 | 1 | 14064 | 490.8 |
| | | 2 | 15542 | 534.2 |
| | | 3 | 17846 | 893.2 |
| | | 4 | 17666 | 825 |
| | | 5 | 17310 | 866 |
| | | 6 | 16488 | 934.8 |
| | 1:1 | 1 | 14783 | 572.2 |
| | | 2 | 15007 | 504.4 |
| | | 3 | 16967 | 796.4 |
| | | 4 | 16809 | 809.6 |
| | | 5 | 17024 | 901.6 |
| | | 6 | 15989 | 714.4 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Pr (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Pr}) | ส่วนสกัด (y_{Pr}) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 18326 | 1716 |
| | | 2 | 18602 | 1906 |
| | | 3 | 18642 | 1774 |
| | | 4 | 18872 | 1980 |
| | | 5 | 18587 | 2758 |
| | | 6 | 15332 | 1922 |
| | 0.33:1 | 1 | 15801 | 646.2 |
| | | 2 | 19784 | 797 |
| | | 3 | 18397 | 1438 |
| | | 4 | 18617 | 1314 |
| | | 5 | 19428 | 1422 |
| | | 6 | 18199 | 1520 |
| | 0.5:1 | 1 | 15269 | 562.8 |
| | | 2 | 17531 | 800.2 |
| | | 3 | 18847 | 1076 |
| | | 4 | 19602 | 1136 |
| | | 5 | 20461 | 1238 |
| | | 6 | 16478 | 1348 |
| | 1:1 | 1 | 14464 | 532.8 |
| | | 2 | 15697 | 511.6 |
| | | 3 | 17577 | 785.8 |
| | | 4 | 17702 | 714.8 |
| | | 5 | 17992 | 823.6 |
| | | 6 | 16549 | 822.8 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.4 ข้อมูลสมดุลของ Nd

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Nd (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Nd}) | ส่วนสกัด (y_{Nd}) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 98750 | 7854 |
| | | 2 | 52510 | 7724 |
| | | 3 | 58796 | 7894 |
| | | 4 | 59870 | 7560 |
| | | 5 | 60131 | 8486 |
| | | 6 | 60429 | 9092 |
| | 0.33:1 | 1 | 64068 | 1858 |
| | | 2 | 74895 | 2468 |
| | | 3 | 66286 | 4404 |
| | | 4 | 68308 | 4386 |
| | | 5 | 68893 | 4476 |
| | | 6 | 62145 | 5564 |
| | 0.5:1 | 1 | 60854 | 1956 |
| | | 2 | 67427 | 2024 |
| | | 3 | 65445 | 3760 |
| | | 4 | 64712 | 3562 |
| | | 5 | 63659 | 3688 |
| | | 6 | 60810 | 4048 |
| | 1:1 | 1 | 64076 | 2156 |
| | | 2 | 64995 | 1902 |
| | | 3 | 64416 | 3240 |
| | | 4 | 64008 | 3316 |
| | | 5 | 65077 | 3652 |
| | | 6 | 61510 | 2986 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Nd (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Nd}) | ส่วนสกัด (y_{Nd}) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 59753 | 7000 |
| | | 2 | 60964 | 7806 |
| | | 3 | 61808 | 7404 |
| | | 4 | 63525 | 8508 |
| | | 5 | 61872 | 12100 |
| | | 6 | 47520 | 8174 |
| | 0.33:1 | 1 | 72282 | 2530 |
| | | 2 | 89374 | 3464 |
| | | 3 | 67963 | 6280 |
| | | 4 | 69618 | 5768 |
| | | 5 | 72942 | 6446 |
| | | 6 | 59719 | 6910 |
| | 0.5:1 | 1 | 64510 | 1880 |
| | | 2 | 74357 | 3044 |
| | | 3 | 68399 | 4314 |
| | | 4 | 69125 | 4622 |
| | | 5 | 69221 | 5110 |
| | | 6 | 56608 | 5746 |
| | 1:1 | 1 | 63356 | 2004 |
| | | 2 | 69161 | 1980 |
| | | 3 | 67565 | 3240 |
| | | 4 | 68382 | 2944 |
| | | 5 | 69916 | 3424 |
| | | 6 | 64453 | 3586 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 ข้อมูลสมมูลของ Sm

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Sm (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Sm}) | ส่วนสกัด (y_{Sm}) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 14181 | 2038 |
| | | 2 | 7517 | 2140 |
| | | 3 | 8431 | 2184 |
| | | 4 | 8480 | 2076 |
| | | 5 | 8286 | 2224 |
| | | 6 | 7051 | 2090 |
| | 0.33:1 | 1 | 18527 | 1278 |
| | | 2 | 19402 | 1408 |
| | | 3 | 11289 | 1502 |
| | | 4 | 11656 | 1520 |
| | | 5 | 11607 | 1536 |
| | | 6 | 9634 | 1710 |
| | 0.5:1 | 1 | 17450 | 1330 |
| | | 2 | 17792 | 1350 |
| | | 3 | 11881 | 1436 |
| | | 4 | 11706 | 1374 |
| | | 5 | 11412 | 1434 |
| | | 6 | 10300 | 1456 |
| | 1:1 | 1 | 18350 | 1374 |
| | | 2 | 17904 | 1234 |
| | | 3 | 13199 | 1388 |
| | | 4 | 13253 | 1504 |
| | | 5 | 13360 | 1462 |
| | | 6 | 11977 | 1220 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.5 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ S_m (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|---------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Sm}) | ส่วนสกัด (y_{Sm}) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 8644 | 1954 |
| | | 2 | 8804 | 2134 |
| | | 3 | 8612 | 1968 |
| | | 4 | 8158 | 2054 |
| | | 5 | 7046 | 2468 |
| | | 6 | 4512 | 1294 |
| | 0.33:1 | 1 | 20628 | 1536 |
| | | 2 | 20799 | 1746 |
| | | 3 | 11423 | 2026 |
| | | 4 | 11658 | 1886 |
| | | 5 | 11378 | 1952 |
| | | 6 | 8078 | 1682 |
| | 0.5:1 | 1 | 18704 | 1334 |
| | | 2 | 18772 | 1638 |
| | | 3 | 12296 | 1612 |
| | | 4 | 12611 | 1704 |
| | | 5 | 12194 | 1762 |
| | | 6 | 8768 | 1604 |
| | 1:1 | 1 | 18147 | 1334 |
| | | 2 | 18483 | 1292 |
| | | 3 | 13603 | 1422 |
| | | 4 | 13885 | 1322 |
| | | 5 | 13737 | 1460 |
| | | 6 | 11409 | 1286 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลสมมูลของ Eu

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Eu (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Eu}) | ส่วนสกัด (y_{Eu}) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 98.19 | 55.31 |
| | | 2 | 87.74 | 27.76 |
| | | 3 | 96.98 | 27.55 |
| | | 4 | 97.67 | 26.70 |
| | | 5 | 98.02 | 27.98 |
| | | 6 | 85.67 | 27.76 |
| | 0.33:1 | 1 | 144.83 | 19.96 |
| | | 2 | 154.93 | 20.12 |
| | | 3 | 111.32 | 22.26 |
| | | 4 | 114.60 | 22.28 |
| | | 5 | 117.45 | 22.28 |
| | | 6 | 105.79 | 24.16 |
| | 0.5:1 | 1 | 132.05 | 19.33 |
| | | 2 | 137.23 | 19.01 |
| | | 3 | 109.85 | 20.41 |
| | | 4 | 111.41 | 19.95 |
| | | 5 | 109.68 | 20.52 |
| | | 6 | 102.34 | 20.29 |
| | 1:1 | 1 | 140.25 | 20.66 |
| | | 2 | 133.25 | 19.39 |
| | | 3 | 114.08 | 20.83 |
| | | 4 | 114.08 | 20.90 |
| | | 5 | 116.50 | 21.10 |
| | | 6 | 124.53 | 19.55 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Eu (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Eu}) | ส่วนสกัด (y_{Eu}) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 99.49 | 25.80 |
| | | 2 | 98.54 | 26.82 |
| | | 3 | 98.36 | 25.61 |
| | | 4 | 98.54 | 26.63 |
| | | 5 | 92.49 | 31.56 |
| | | 6 | 71.25 | 23.47 |
| | 0.33:1 | 1 | 142.67 | 22.16 |
| | | 2 | 190.34 | 23.49 |
| | | 3 | 133.69 | 27.67 |
| | | 4 | 131.53 | 25.22 |
| | | 5 | 135.59 | 26.17 |
| | | 6 | 98.02 | 25.49 |
| | 0.5:1 | 1 | 152.60 | 20.12 |
| | | 2 | 156.83 | 21.97 |
| | | 3 | 127.55 | 21.56 |
| | | 4 | 129.37 | 21.62 |
| | | 5 | 124.96 | 22.49 |
| | | 6 | 89.12 | 21.52 |
| | 1:1 | 1 | 132.56 | 19.95 |
| | | 2 | 145.60 | 19.03 |
| | | 3 | 116.85 | 20.43 |
| | | 4 | 119.09 | 19.64 |
| | | 5 | 117.88 | 20.26 |
| | | 6 | 104.06 | 19.71 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 ข้อมูลสมดุลของ Gd

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Gd (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Gd}) | ส่วนสกัด (y_{Gd}) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 7065 | 1382 |
| | | 2 | 3727 | 1520 |
| | | 3 | 4165 | 1536 |
| | | 4 | 4149 | 1442 |
| | | 5 | 3895 | 1494 |
| | | 6 | 2846 | 1274 |
| | 0.33:1 | 1 | 12874 | 1382 |
| | | 2 | 12434 | 1344 |
| | | 3 | 6208 | 1194 |
| | | 4 | 6352 | 1198 |
| | | 5 | 6227 | 1198 |
| | | 6 | 4907 | 1210 |
| | 0.5:1 | 1 | 11974 | 1366 |
| | | 2 | 11520 | 1242 |
| | | 3 | 6611 | 1118 |
| | | 4 | 6508 | 1108 |
| | | 5 | 6231 | 1110 |
| | | 6 | 5586 | 1044 |
| | 1:1 | 1 | 13274 | 1454 |
| | | 2 | 12497 | 1280 |
| | | 3 | 8308 | 1232 |
| | | 4 | 8369 | 1378 |
| | | 5 | 8326 | 1264 |
| | | 6 | 7073 | 1024 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Gd (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Gd}) | ส่วนสกัด (y_{Gd}) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 4117 | 1324 |
| | | 2 | 4053 | 1390 |
| | | 3 | 3698 | 1208 |
| | | 4 | 3183 | 1150 |
| | | 5 | 2406 | 1234 |
| | | 6 | 1331 | 539.2 |
| | 0.33:1 | 1 | 13937 | 1410 |
| | | 2 | 11912 | 1426 |
| | | 3 | 5849 | 1422 |
| | | 4 | 5772 | 1314 |
| | | 5 | 5165 | 1266 |
| | | 6 | 3659 | 953.6 |
| | 0.5:1 | 1 | 13015 | 1384 |
| | | 2 | 11766 | 1472 |
| | | 3 | 6961 | 1282 |
| | | 4 | 7188 | 1316 |
| | | 5 | 6531 | 1278 |
| | | 6 | 4451 | 1022 |
| | 1:1 | 1 | 12944 | 1418 |
| | | 2 | 12289 | 1320 |
| | | 3 | 8202 | 1242 |
| | | 4 | 5320 | 1152 |
| | | 5 | 7865 | 1220 |
| | | 6 | 5977 | 948.2 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.8 ข้อมูลสมดุลของ Dy

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Dy (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Dy}) | ส่วนสกัด (y_{Dy}) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 827 | 396 |
| | | 2 | 723 | 388.6 |
| | | 3 | 784 | 390.4 |
| | | 4 | 746 | 351.6 |
| | | 5 | 675 | 335 |
| | | 6 | 438.6 | 254.8 |
| | 0.33:1 | 1 | 3323 | 583.8 |
| | | 2 | 2911 | 485.2 |
| | | 3 | 1244 | 366.6 |
| | | 4 | 1254 | 359.6 |
| | | 5 | 1232 | 346.2 |
| | | 6 | 924 | 342.6 |
| | 0.5:1 | 1 | 3417 | 627.4 |
| | | 2 | 2979 | 528.4 |
| | | 3 | 1496 | 415.6 |
| | | 4 | 1498 | 378 |
| | | 5 | 1406 | 370 |
| | | 6 | 1133 | 310.6 |
| | 1:1 | 1 | 3771 | 655.2 |
| | | 2 | 3321 | 544.4 |
| | | 3 | 2027 | 455.6 |
| | | 4 | 2027 | 514.2 |
| | | 5 | 2014 | 445 |
| | | 6 | 1697 | 342.6 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.8 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Dy (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Dy}) | ส่วนสกัด (y_{Dy}) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 746 | 317.8 |
| | | 2 | 637 | 292.6 |
| | | 3 | 528 | 222.2 |
| | | 4 | 413.4 | 181.6 |
| | | 5 | 296.9 | 170 |
| | | 6 | 171.2 | 69.5 |
| | 0.33:1 | 1 | 3257 | 499.2 |
| | | 2 | 2409 | 424 |
| | | 3 | 1120 | 367.4 |
| | | 4 | 968 | 307 |
| | | 5 | 794 | 259.4 |
| | | 6 | 526 | 40.4 |
| | 0.5:1 | 1 | 3399 | 541.6 |
| | | 2 | 2570 | 464.6 |
| | | 3 | 1445 | 361 |
| | | 4 | 1342 | 341.4 |
| | | 5 | 1107 | 299.4 |
| | | 6 | 628 | 203 |
| | 1:1 | 1 | 3460 | 587.8 |
| | | 2 | 3118 | 488.8 |
| | | 3 | 1800 | 401.8 |
| | | 4 | 1750 | 361.4 |
| | | 5 | 1515 | 345.8 |
| | | 6 | 1064 | 233.2 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๙.๙ ข้อมูลสมดุลของ Yb

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Yb (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Yb}) | ส่วนสกัด (y_{Yb}) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 54.1 | 58.82 |
| | | 2 | 47.16 | 22.92 |
| | | 3 | 51.2 | 22.22 |
| | | 4 | 48.56 | 19.5 |
| | | 5 | 44.11 | 18.9 |
| | | 6 | 31.8 | 13.16 |
| | 0.33:1 | 1 | 174.3 | 44.18 |
| | | 2 | 130.6 | 27.88 |
| | | 3 | 67.4 | 18.4 |
| | | 4 | 65.9 | 17.26 |
| | | 5 | 63.3 | 15.34 |
| | | 6 | 47.42 | 18.36 |
| | 0.5:1 | 1 | 180.6 | 49.58 |
| | | 2 | 139.5 | 32.84 |
| | | 3 | 79.2 | 21.06 |
| | | 4 | 78.2 | 18.64 |
| | | 5 | 70.4 | 17.22 |
| | | 6 | 56.2 | 11.88 |
| | 1:1 | 1 | 226.1 | 53.66 |
| | | 2 | 174.8 | 37.6 |
| | | 3 | 114.8 | 27.42 |
| | | 4 | 109.4 | 30.38 |
| | | 5 | 106.6 | 23.92 |
| | | 6 | 86.5 | 15.46 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.9 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Yb (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_{Yb}) | ส่วนสกัด (y_{Yb}) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 49.74 | 17.88 |
| | | 2 | 42.82 | 16.88 |
| | | 3 | 36.37 | 12.46 |
| | | 4 | 29.25 | 9.748 |
| | | 5 | 21.51 | 9.258 |
| | | 6 | 13.21 | 2.526 |
| | 0.33:1 | 1 | 173.1 | 28.1 |
| | | 2 | 108.1 | 18.88 |
| | | 3 | 65 | 15.34 |
| | | 4 | 51 | 13.66 |
| | | 5 | 41.67 | 9.992 |
| | | 6 | 27.8 | 4.572 |
| | 0.5:1 | 1 | 164.7 | 34.7 |
| | | 2 | 106.8 | 22.94 |
| | | 3 | 70 | 15.6 |
| | | 4 | 62.2 | 12.82 |
| | | 5 | 48.99 | 9.262 |
| | | 6 | 27.39 | 3.298 |
| | 1:1 | 1 | 185 | 43.24 |
| | | 2 | 138 | 28.86 |
| | | 3 | 86.1 | 19.08 |
| | | 4 | 76.5 | 15.86 |
| | | 5 | 61.5 | 12.76 |
| | | 6 | 42.21 | 5.482 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.10 ข้อมูลสมมูลของ Y

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Y (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|-----------------------------------|--------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_Y) | ส่วนสกัด (y_Y) |
| 1:1 | 0:1 | 1 | 7235 | 1872 |
| | | 2 | 3758 | 2030 |
| | | 3 | 4145 | 2016 |
| | | 4 | 3969 | 1824 |
| | | 5 | 3563 | 1786 |
| | | 6 | 2490 | 1360 |
| | 0.33:1 | 1 | 15725 | 3166 |
| | | 2 | 13073 | 2436 |
| | | 3 | 6394 | 1782 |
| | | 4 | 6345 | 1768 |
| | | 5 | 6055 | 1670 |
| | | 6 | 4546 | 1512 |
| | 0.5:1 | 1 | 15428 | 3156 |
| | | 2 | 12987 | 2468 |
| | | 3 | 7108 | 1738 |
| | | 4 | 6917 | 1692 |
| | | 5 | 6410 | 1622 |
| | | 6 | 5448 | 1318 |
| | 1:1 | 1 | 18375 | 3512 |
| | | 2 | 15758 | 2816 |
| | | 3 | 10044 | 2248 |
| | | 4 | 9899 | 2556 |
| | | 5 | 9649 | 2154 |
| | | 6 | 7699 | 1550 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.10 (ต่อ)

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | กรวยแยกที่ | ความเข้มข้นของ Y (มิลลิกรัม/ลิตร) | |
|----------------------|---------------------|------------|-----------------------------------|--------------------|
| | | | ส่วนคงเหลือ (x_Y) | ส่วนสกัด (y_Y) |
| 2:1 | 0:1 | 1 | 3881 | 1622 |
| | | 2 | 3478 | 1568 |
| | | 3 | 2895 | 1222 |
| | | 4 | 2201 | 1036 |
| | | 5 | 1482 | 993 |
| | | 6 | 752 | 361.6 |
| | 0.33:1 | 1 | 16944 | 2344 |
| | | 2 | 10762 | 1924 |
| | | 3 | 5566 | 1674 |
| | | 4 | 4938 | 1504 |
| | | 5 | 3976 | 1274 |
| | | 6 | 2345 | 803 |
| | 0.5:1 | 1 | 14839 | 2740 |
| | | 2 | 10853 | 2240 |
| | | 3 | 6397 | 1708 |
| | | 4 | 5949 | 1606 |
| | | 5 | 4709 | 1364 |
| | | 6 | 2989 | 894.4 |
| | 1:1 | 1 | 16601 | 3120 |
| | | 2 | 13166 | 2490 |
| | | 3 | 8478 | 1922 |
| | | 4 | 8032 | 1724 |
| | | 5 | 6843 | 1590 |
| | | 6 | 4865 | 998.4 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

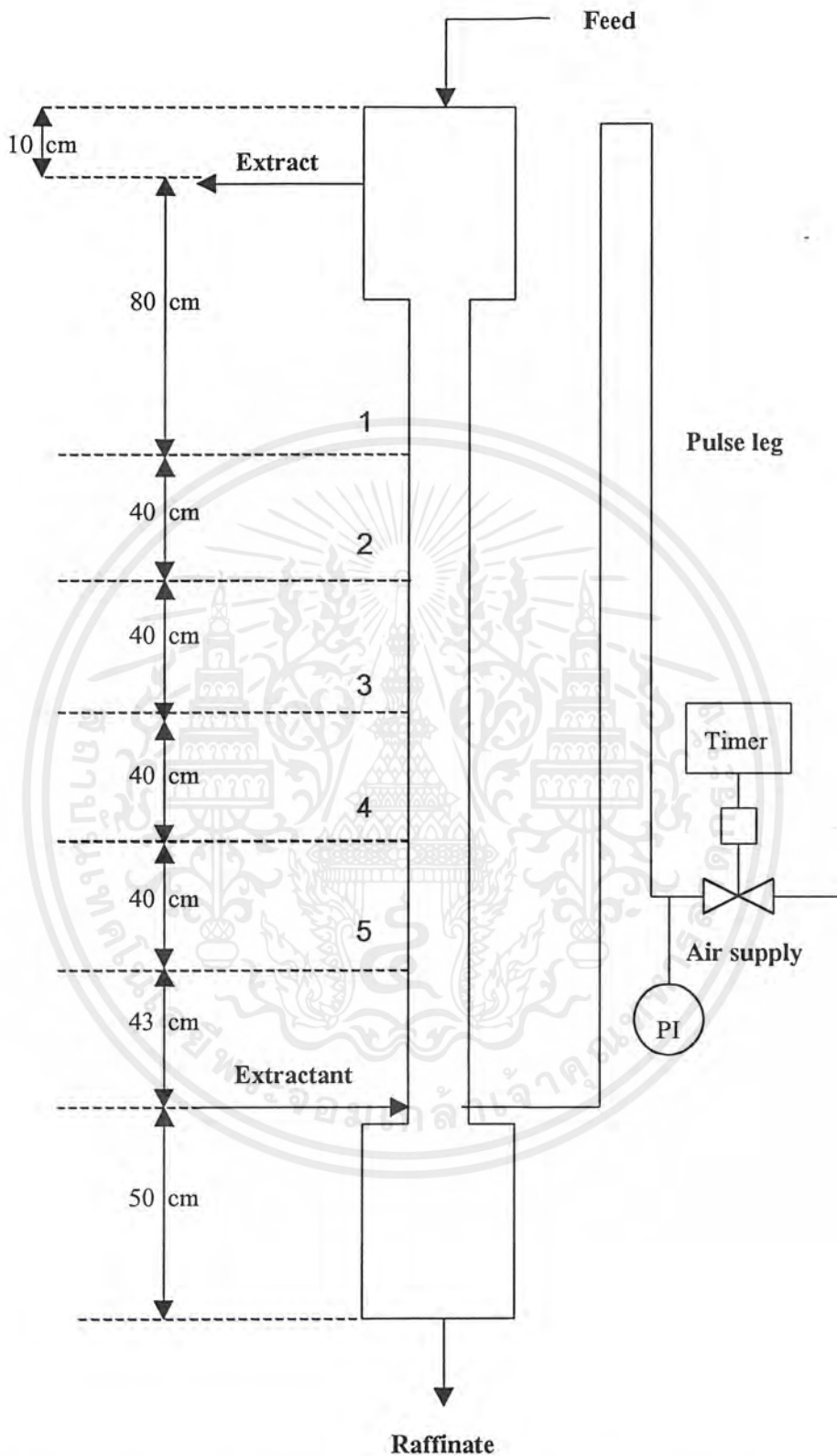
ข้อมูลสถานะที่ใช้ในการทดลองสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอร์เมตเพลท

จ.1 การสกัดธาตุหายากในหอสกัดที่ไม่มีการป้อนกลับ

ตารางที่ จ.1 ข้อมูลสถานะสำหรับการสกัดในหอสกัดที่ไม่มีการป้อนกลับ

| สถานะ | ปริมาณที่ใช้ในการทดลอง |
|--|------------------------|
| ความดัน (ปอนด์/ตารางนิ้ว) | 7 |
| ความถี่ (รอบ/นาที) | 11 |
| แอมพลิจูด (เซนติเมตร) | 4 |
| ความถี่จําเพาะของสารป้อน | 1.50 |
| ความถี่จําเพาะของสารสกัด | 0.912 |
| อัตราส่วนของสารละลายชั้นน้ำมัน : สารละลายชั้นน้ำ | 1:1 |
| อัตราการไหลของสารป้อน (ลิตร/ชั่วโมง) | 8.0 |
| อัตราการไหลของสารสกัด (ลิตร/ชั่วโมง) | 8.0 |
| อัตราการไหลรวม (ลิตร/ชั่วโมง) | 16.0 |
| เวลาที่ใช้ในการสกัด (นาที) | 120 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.1 ข้อมูลจำเพาะของหอสกัดแบบพัลส์เฟอร์โฟเรตเพลทที่ไม่มีการป้อนกลับ
ที่ใช้ในการทดลอง

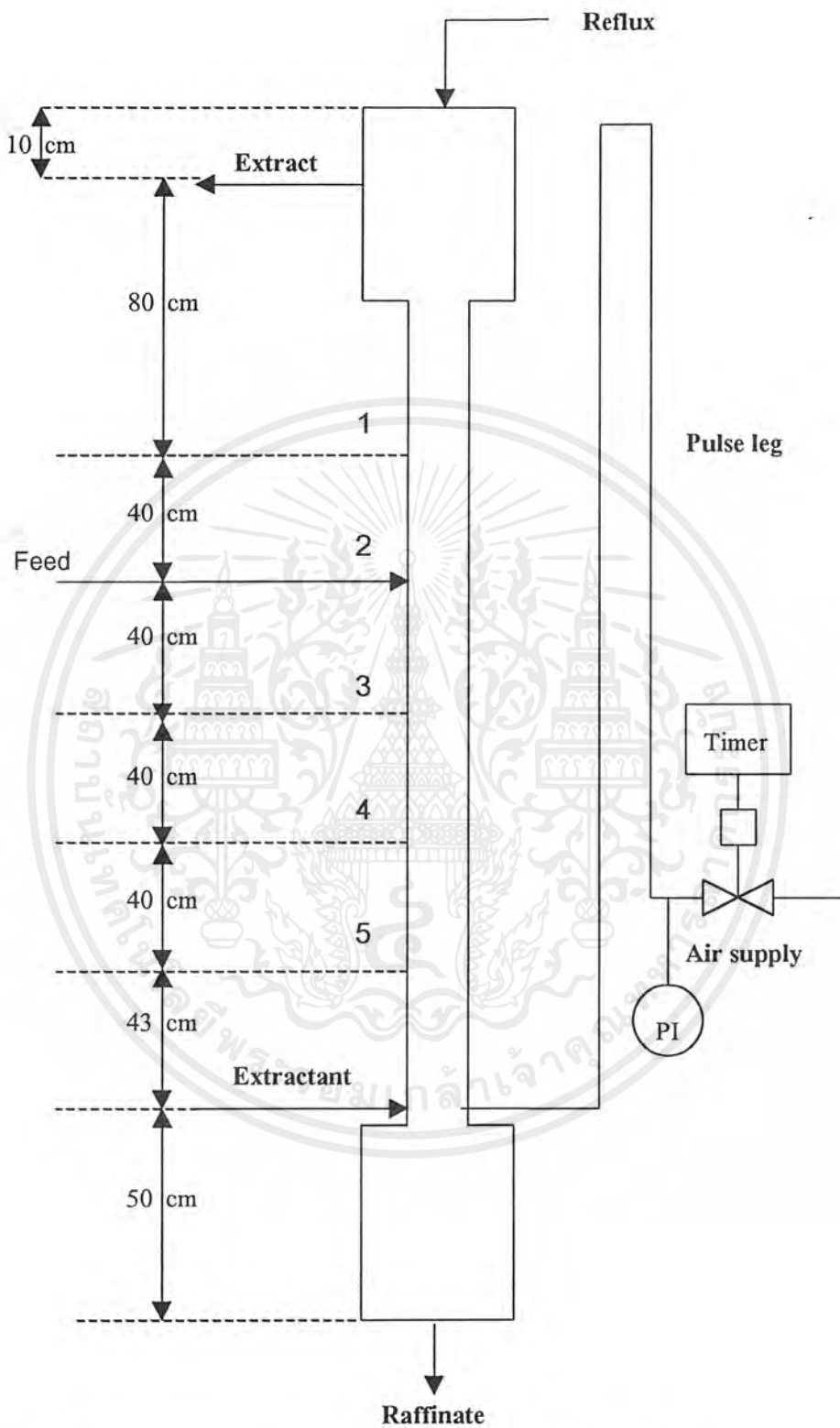
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.2 การสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบมีการป้อนกลับ

ตารางที่ จ.2 ข้อมูลสภาวะสำหรับการสกัดในหอสกัดแบบที่มีการป้อนกลับ

| สภาวะ | ปริมาณที่ใช้ในการทดลอง |
|--|------------------------|
| ความดัน (ปอนด์/ตารางนิ้ว) | 7 |
| ความถี่ (รอบ/นาที) | 11 |
| แอมพลิจูด (เซนติเมตร) | 4 |
| ความถ่วงจำเพาะของสารป้อน | 1.421 |
| ความถ่วงจำเพาะของสารป้อนกลับ | 1.395 |
| ความถ่วงจำเพาะของสารสกัด | 0.912 |
| อัตราส่วนของสารละลายชั้นน้ำมัน : สารละลายชั้นน้ำ | 2:1 |
| อัตราส่วนของสารป้อนกลับ : สารป้อน | 0.33:1 |
| อัตราการไหลของสารป้อน (ลิตร/ชั่วโมง) | 5.4 |
| อัตราการไหลของสารป้อนกลับ (ลิตร/ชั่วโมง) | 1.8 |
| อัตราการไหลของสารสกัด (ลิตร/ชั่วโมง) | 14.4 |
| อัตราการไหลรวม (ลิตร/ชั่วโมง) | 21.6 |
| เวลาที่ใช้ในการสกัด (นาที) | 120 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.2 ข้อมูลจำเพาะของหอสกัดแบบพัลส์เฟอร์พอเรตเพลทที่มีการป้อนกลับ
ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการทดลองการสกัดธาตุหายากโดยใช้หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท

จ.1 การสกัดธาตุหายากแบบไม่มีการป้อนกลับ

ตารางที่ จ.1 ความเข้มข้นของสารป้อนที่ใช้ในการทดลองในการสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ

| สารละลาย | ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|----------|------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| สารป้อน | 104544 | 17700 | 62704 | 12573 | 7877 | 10025 |

ตารางที่ จ.2 ความเข้มข้นของธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัดในการทดลองสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ ที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที

| เวลา (นาที) | สารละลายที่ออกจากหอสกัด | ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-------------|-------------------------|------------------------------|-------|-------|------|------|------|
| | | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 30 | ส่วนสกัด | 10338 | 8032 | 25176 | 6942 | 4208 | 3840 |
| | ส่วนคงเหลือ | 81740 | 11754 | 40002 | 6434 | 3705 | 5499 |
| 60 | ส่วนสกัด | 9844 | 7898 | 24762 | 6750 | 4136 | 3776 |
| | ส่วนคงเหลือ | 85996 | 11925 | 39894 | 5995 | 3404 | 5240 |
| 90 | ส่วนสกัด | 10034 | 7864 | 25130 | 6918 | 4236 | 3904 |
| | ส่วนคงเหลือ | 80409 | 11302 | 37663 | 5669 | 3194 | 4910 |
| 120 | ส่วนสกัด | 10120 | 7432 | 25304 | 7174 | 4480 | 4222 |
| | ส่วนคงเหลือ | 87012 | 12500 | 41870 | 6441 | 3635 | 5528 |

ฉ.2 การสกัดธาตุหายากแบบมีการป้อนกลับ

ตารางที่ ฉ.3 ความเข้มข้นของสารป้อนและสารป้อนกลับที่ใช้ในการทดลองในการสกัดแบบที่มีการป้อนกลับ

| สารละลาย | ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| สารป้อน | 94068 | 11176 | 38148 | 6188 | 3396 | 5495 |
| สารป้อนกลับ | 18359 | 12348 | 54125 | 16604 | 10301 | 10755 |

ตารางที่ ฉ.4 ความเข้มข้นของธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัดในการทดลองสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบที่มีการป้อนกลับ ที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที

| เวลา (นาที) | สารละลายที่ออกจากหอสกัด | ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร) | | | | | |
|-------------|-------------------------|------------------------------|------|-------|------|------|------|
| | | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| 30 | ส่วนสกัด | 4298 | 2562 | 11348 | 3264 | 2064 | 2434 |
| | ส่วนคงเหลือ | 77868 | 7763 | 26130 | 2860 | 1406 | 2790 |
| 60 | ส่วนสกัด | 3132 | 2328 | 10362 | 3276 | 2106 | 2406 |
| | ส่วนคงเหลือ | 74801 | 8484 | 30052 | 3647 | 1823 | 3226 |
| 90 | ส่วนสกัด | 1416 | 1378 | 6230 | 2054 | 1310 | 1410 |
| | ส่วนคงเหลือ | 71068 | 8807 | 32125 | 4032 | 2079 | 3408 |
| 120 | ส่วนสกัด | 2812 | 2410 | 10840 | 3534 | 2278 | 2542 |
| | ส่วนคงเหลือ | 69765 | 8835 | 32588 | 4167 | 2125 | 3426 |

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกของธาตุหายาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลี้ยวของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบการจำลองการสกัดแบบกะ

ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากที่ได้จากการสกัด โดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารบ่อนกถิ:สารบ่อน | สัมประสิทธิ์การกระจาย (k) | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|
| | | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y | | |
| 1:1 | 0:1 | 0.0214 | 0.1007 | 0.1300 | 0.2890 | 0.4856 | 0.7518 | | |
| | 0.33:1 | 0.0014 | 0.0300 | 0.0299 | 0.1327 | 0.2816 | 0.6964 | | |
| | 0.5:1 | 0.0031 | 0.0298 | 0.0322 | 0.1291 | 0.2445 | 0.5793 | | |
| | 1:1 | 0.0024 | 0.0358 | 0.0351 | 0.1147 | 0.2056 | 0.4562 | | |
| 2:1 | 0:1 | 0.0211 | 0.1119 | 0.1473 | 0.4331 | 0.9947 | 2.1569 | | |
| | 0.33:1 | 0.0004 | 0.0355 | 0.0424 | 0.1901 | 0.3854 | 0.9996 | | |
| | 0.5:1 | 0.0010 | 0.0342 | 0.0332 | 0.1521 | 0.3109 | 0.9167 | | |
| | 1:1 | 0.0019 | 0.0322 | 0.0311 | 0.1169 | 0.2372 | 0.6413 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ค่าการเลือกของธาตุหายากที่ได้จากการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัดแบบกะ

| ส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ | สารป้อนกลับ:สารป้อน | ค่าการเลือก (α_{nLa}) | | | | | | |
|----------------------|---------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|--|
| | | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y | |
| 1:1 | 0:1 | 1.00 | 4.70 | 6.07 | 13.50 | 22.67 | 35.11 | |
| | 0.33:1 | 1.00 | 21.05 | 20.98 | 93.07 | 197.59 | 488.61 | |
| | 0.5:1 | 1.00 | 9.73 | 10.51 | 42.21 | 79.93 | 189.36 | |
| | 1:1 | 1.00 | 14.95 | 14.64 | 47.92 | 85.86 | 190.53 | |
| 2:1 | 0:1 | 1.00 | 5.30 | 6.98 | 20.51 | 47.11 | 102.15 | |
| | 0.33:1 | 1.00 | 100.52 | 119.93 | 538.28 | 1090.88 | 2829.67 | |
| | 0.5:1 | 1.00 | 34.69 | 33.73 | 154.54 | 315.84 | 931.12 | |
| | 1:1 | 1.00 | 16.92 | 16.34 | 61.43 | 124.64 | 336.94 | |

ข.2 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าการเลือกของธาตุหายากสำหรับการสกัดธาตุหายากโดยใช้หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท

ตารางที่ ข.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของธาตุหายากที่ได้จากการทดลองการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท

| ชนิดของการสกัด | สัมประสิทธิ์การกระจาย (k) | | | | | |
|---------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| แบบไม่มีการป้อนกลับ | 0.1163 | 0.5946 | 0.6043 | 1.1138 | 1.2325 | 0.7637 |
| แบบมีการป้อนกลับ | 0.0403 | 0.2728 | 0.3326 | 0.8481 | 1.0720 | 0.7420 |

ตารางที่ ข.4 เปรียบเทียบค่าการเลือกของธาตุหายากสำหรับการทดลองการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบพัลส์เพอร์ฟอเรตเพลท

| ชนิดของการสกัด | ค่าการเลือก ($\alpha_{a/La}$) | | | | | |
|---------------------|---------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| แบบไม่มีการป้อนกลับ | 1.0000 | 5.1120 | 5.1962 | 9.5765 | 10.5967 | 6.5667 |
| แบบมีการป้อนกลับ | 1.0000 | 6.7676 | 8.2527 | 21.0409 | 26.5960 | 18.4082 |

ข.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย [5]

นิยามให้ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการถ่ายเทขององค์ประกอบ a เข้าไปยังสารสกัด หรือแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

1) สำหรับการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัด :

$$\text{สัมประสิทธิ์การกระจาย} = \frac{\text{ความเข้มข้นขององค์ประกอบ a ใน } E_1}{\text{ความเข้มข้นขององค์ประกอบ a ใน } R_6} \quad (\text{ข.1})$$

2) สำหรับการสกัดโดยใช้หอสกัด :

$$\text{สัมประสิทธิ์การกระจาย} = \frac{\text{ความเข้มข้นขององค์ประกอบ a ในส่วนสกัด}}{\text{ความเข้มข้นขององค์ประกอบ a ในส่วนคงเหลือ}} \quad (\text{ข.2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวอย่างการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระจาย

- 1) สำหรับการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัด

กรณีที่อัตราส่วนของส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 และสารป้อนกลับ:สารป้อน = 1:1
จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{สัมประสิทธิ์การกระจายของ } L_a &= \frac{\text{ความเข้มข้นของ } L_a \text{ ใน } E_1}{\text{ความเข้มข้นของ } L_a \text{ ใน } R_6} \\ &= \frac{213.8}{112328} \\ &= 0.0019 \end{aligned}$$

- 2) สำหรับการสกัดโดยใช้หอสกัด

กรณีทดลองสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{สัมประสิทธิ์การกระจายของ } L_a &= \frac{\text{ความเข้มข้นของ } L_a \text{ ในส่วนสกัด}}{\text{ความเข้มข้นของ } L_a \text{ ในส่วนคงเหลือ}} \\ &= \frac{10120}{87012} \\ &= 0.1163 \end{aligned}$$

ข.4 การคำนวณค่าการเลือก [5]

ค่าการเลือกคำนวณได้จาก

$$\text{ค่าการเลือก} = \frac{\text{สัมประสิทธิ์การกระจายขององค์ประกอบ a}}{\text{สัมประสิทธิ์การกระจายขององค์ประกอบ b}} \quad (\text{ข.3})$$

ในที่นี้จะทำการคำนวณค่าการเลือกของธาตุหายากแต่ละธาตุโดยเทียบกับ L_a จะได้ว่า

$$\alpha_{a/L_a} = \frac{k_a}{k_{L_a}} \quad (\text{ข.4})$$

• ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการเลือกโดยใช้ La เป็นธาตุอ้างอิง

1) สำหรับการสกัดโดยใช้แบบจำลองการสกัด

กรณีที่อัตราส่วนของส่วนสกัด:ส่วนคงเหลือ = 2:1 และสารป้อนกลับ:สารป้อน = 1:1

จะได้ว่า ค่าการเลือกของ Pr เทียบกับ La คือ

$$\begin{aligned}\alpha_{Pr/La} &= \frac{k_{Pr}}{k_{La}} \\ &= \frac{0.0322}{0.0019} \\ &= 16.947\end{aligned}$$

2) สำหรับการสกัดโดยใช้หอสกัด

กรณีทดลองสกัดธาตุหายากในหอสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ จะได้ว่า ค่าการเลือกของ Pr เทียบกับ La คือ

$$\begin{aligned}\alpha_{Pr/La} &= \frac{k_{Pr}}{k_{La}} \\ &= \frac{0.5946}{0.1163} \\ &= 5.1126\end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัดเมื่อเทียบกับ ธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมดสำหรับการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบ ฟิลล์เฟอร์พอเรตเพลท

ข.1 การคำนวณสำหรับการสกัดในหอสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ

ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัดเมื่อเทียบกับธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมดสำหรับการสกัดในหอสกัดแบบไม่มีการป้อนกลับ

| สารละลายที่ออก จากหอสกัด | เปอร์เซ็นต์ธาตุหายาก | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| ส่วนคงเหลือ | 83.23 | 70.62 | 66.77 | 51.23 | 46.15 | 55.14 |
| ส่วนสกัด | 9.68 | 41.99 | 40.35 | 57.06 | 56.87 | 42.11 |

- ตัวอย่างการคำนวณ

1) สำหรับส่วนคงเหลือ จะได้ว่า

เปอร์เซ็นต์ของธาตุ a ในส่วนคงเหลือ

$$= \frac{\text{อัตราการไหลของส่วนคงเหลือ} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในส่วนคงเหลือ}}{\text{อัตราการไหลของสารป้อน} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในสารป้อน}} \times 100$$

เช่น สำหรับ La จะได้

เปอร์เซ็นต์ของ La ในส่วนคงเหลือเมื่อเทียบกับ La ที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมด

$$= \frac{8 (\text{ลิตร/ชั่วโมง}) \times 87012 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})}{8 (\text{ลิตร/ชั่วโมง}) \times 104544 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})} \times 100 = 83.23\%$$

2) สำหรับในส่วนสกัด จะได้ว่า

เปอร์เซ็นต์ของธาตุ a ในส่วนสกัด

$$= \frac{\text{อัตราการไหลของส่วนสกัด} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในส่วนสกัด}}{\text{อัตราการไหลของสารป้อน} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในสารป้อน}} \times 100$$

เช่น สำหรับ La จะได้

เปอร์เซ็นต์ของ La ในส่วนสกัดเมื่อเทียบกับ La ที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมด

$$= \frac{8 (\text{ลิตร/ชั่วโมง}) \times 10120 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})}{8 (\text{ลิตร/ชั่วโมง}) \times 104544 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})} \times 100 = 9.68\%$$

ข.2 การคำนวณสำหรับการสกัดในหอสกัดแบบที่มีการป้อนกลับ

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์ธาตุหายากในส่วนคงเหลือและส่วนสกัดเมื่อเทียบกับธาตุหายากที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมดสำหรับการสกัดในหอสกัดแบบที่มีการป้อนกลับ

| สารละลายที่ออก จากหอสกัด | เปอร์เซ็นต์ธาตุหายาก | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | La | Pr | Nd | Sm | Gd | Y |
| ส่วนคงเหลือ | 92.85 | 77.03 | 77.33 | 47.28 | 41.49 | 50.31 |
| ส่วนสกัด | 7.48 | 42.03 | 51.44 | 80.39 | 88.95 | 74.65 |

ตัวอย่างการคำนวณ

1) สำหรับส่วนคงเหลือ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \text{เปอร์เซ็นต์ของธาตุ a ในส่วนคงเหลือ} \\ &= \frac{\text{อัตราการไหลของส่วนคงเหลือ} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในส่วนคงเหลือ}}{(\text{อัตราการไหลของสารป้อน} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในสารป้อน}) + (\text{อัตราการไหลของสารป้อนกลับ} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในสารป้อนกลับ})} \times 100 \end{aligned}$$

เช่น สำหรับ La จะได้

$$\begin{aligned} & \text{เปอร์เซ็นต์ของ La ในส่วนคงเหลือเมื่อเทียบกับ La ที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมด} \\ &= \frac{7.2 (\text{กิโลกรัม/ชั่วโมง}) \times 69765 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})}{[5.4 (\text{กิโลกรัม/ชั่วโมง}) \times 94068 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})] + [1.8 (\text{กิโลกรัม/ชั่วโมง}) \times 18359 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})]} \times 100 = 92.85\% \end{aligned}$$

2) สำหรับในส่วนสกัด จะได้ว่า

$$\begin{aligned} & \text{เปอร์เซ็นต์ของธาตุ a ในส่วนสกัด} \\ &= \frac{\text{อัตราการไหลของส่วนสกัด} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในส่วนสกัด}}{(\text{อัตราการไหลของสารป้อน} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในสารป้อน}) + (\text{อัตราการไหลของสารป้อนกลับ} \times \text{ความเข้มข้นของ a ในสารป้อนกลับ})} \times 100 \end{aligned}$$

เช่น สำหรับ La จะได้

$$\begin{aligned} & \text{เปอร์เซ็นต์ของ La ในส่วนสกัดเมื่อเทียบกับ La ที่ป้อนเข้าหอสกัดทั้งหมด} \\ &= \frac{14.4 (\text{กิโลกรัม/ชั่วโมง}) \times 2812 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})}{[5.4 (\text{กิโลกรัม/ชั่วโมง}) \times 94068 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})] + [1.8 (\text{กิโลกรัม/ชั่วโมง}) \times 18359 (\text{มิลลิกรัม/ลิตร})]} \times 100 = 7.48\% \end{aligned}$$