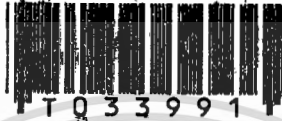


การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการสกัดแร่ธาตุหายากจากแรมโมนาไซต์

โดยหอสกัดแบบพัลส์ เพอร์ฟอเรท-เพลท



นางสาวกษม เชาวจินดา

นางสาวบุญรัตน์ สุฎฐิ

นางสาวปิยฉัตร คุลยเกียรติ

เลขหน้.....

เลขทะเบียน..... 33991

วัน, เดือน, ปี 27 ก.ย. 2542

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่ของการศึกษิตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้วงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปีการศึกษา 2541

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A PRELIMINARY STUDY ON THE RARE-EARTHS EXTRACTION FROM
MONAZITE BY PULSED PERFORATED-PLATE COLUMN**



**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**


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปี 1998 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการสกัดแร่ธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์โดย
หอสกัดแบบพลัส เฟอร์พอเรตท์-เฟลท
โดย นางสาวกษม เซาวนจินดา
นางสาวบุญรัตน์ สุฎาภิ
นางสาวปิยนัตร์ คูลขเกษรติ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข¹


¹สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

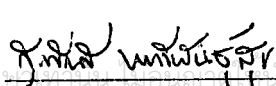
ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลัก
สูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์)

 กรรมการ
(ดร. ประกอบ กิจไชยา)

 กรรมการ
(ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์)

 กรรมการ
(อาจารย์สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและ (อาจารย์สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข) รังที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการสกัดแร่ธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์โดย
หอสกัดแบบพัลส์ เพอร์ฟอเรท-เพลท
โดย นางสาวกษม เชาวจินดา
นางสาวนุญรัตน์ สุฎารี
นางสาวปิยฉัตร คุณเกียรติ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข¹

¹ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

ปริญญาบัตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ด้วยตัวทำละลาย ตัวทำละลายที่ใช้ในการศึกษาคือ สารละลาย 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าด ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารละลายน้ำต่อสารละลายอินทรีย์ และสารที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่องมีความเข้มข้น โดยศึกษาสภาวะการสกัดในหอสกัดแบบพัลส์ เพอร์ฟอเรท-เพลท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.7 เซนติเมตร สูง 343 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่า ควรใช้อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารละลายน้ำต่อสารละลายอินทรีย์น้อยกว่า 1 และใช้ 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title **A PRELIMINARY STUDY ON THE RARE-EARTHS
EXTRACTION FROM MONAZITE BY PULSED
PERFORATED-PLATE COLUMN**

By Miss Kasama Chouwanachinda
Miss Boonyarat Sudaree
Miss Piyachat Dulyakiat

Advisor Mr. Santi Wattanusorn

Co-Advisor Mr. Surasak Pongpansook¹

¹Office 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 is the study of the extraction of rare earths from monazite in continuous phase by using the solvent which is 50% Tri-n-butyl phosphate in kerosene. The variable as the aqueous/organic flow ratio and the substance used in continuous phase is concentrated. The used equipment is a pulsed perforated-plate column having 3.7 cm diameter and 343 cm height. From the experiment, it shows that we ought to use aqueous/organic flow ratio less than 1 and use 50% Tri-n-butyl phosphate in kerosene as continuous phase.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการสกัดซาคูฮาจากแรมโมนาไซต์โดย หอสกัดแบบพัลส์ เพอร์ฟอเรทด์-เพลท (pulsed perforated-plate column) เพื่อเสนอต่อภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จ ล่วงเป็นอันดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย จึงทำให้ปริญญานิพนธ์นี้ สำเร็จสมบูรณ์ขึ้นได้ ผู้เสนอปริญญานิพนธ์จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และนำ ดังนี้คือ

- อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์
- อาจารย์สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมปริญญานิพนธ์
- คุณอารีรักษ์ คำน้อย เจ้าหน้าที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อ
คุณสุมาลี นิลพฤกษ์ สันติให้ความเอื้อเฟื้อด้านการปฏิบัติการ
คุณอุษณีย์ รัตนะพระ ปริญญานิพนธ์และการวิเคราะห์ทางเคมี
และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี

โดยได้รับความร่วมมือให้ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือของสำนักงานพลังงานปรมาณู

เพื่อสันติ

อนึ่ง ยังมีบุคคลที่มีพระคุณอีกหลายฝ่ายนอกเหนือจากที่กล่าวมา ผู้เสนอปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณ ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ณ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
สัญลักษณ์.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ราชอาณาจักร.....	3
3. ทฤษฎีการสกัด.....	9
4. เครื่องมือสกัดของเหลวคั่วของเหลว.....	14
5. การทดลอง.....	33
6. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	38
7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	63
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก	
ก. ข้อมูลจำเพาะของหอสกัดที่ใช้ในการสกัด.....	ก-1
ข. ไตรนิวทิลฟอสเฟต.....	ข-1
ค. ข้อมูลสภาวะสำหรับหอสกัดที่ใช้ในการสกัด.....	ค-1
ง. วิธีการคำนวณ.....	ง-1

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ธาตุหายาก..... 4
4.1	การจำแนกประเภทเครื่องสกัดและการใช้งาน..... 18
6.1	ความเข้มข้นของแเรเอิร์ทในวัฏภาคส่วนที่สกัดได้ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหอสกัด โดยตัวทำละลาย 50% TBP ในน้ำมันก๊าดเป็นเฟสต่อเนื่อง (สกัดครั้งที่ 1)..... 39
6.2	ความเข้มข้นของแเรเอิร์ทในวัฏภาคส่วนที่ไม่ถูกสกัด ณ ตำแหน่งต่างๆบนหอสกัด โดยสารละลาย แเรเอิร์ทในเทอร์คเป็นเฟสต่อเนื่อง (สกัดครั้งที่ 2)..... 41
6.3	ความเข้มข้นของแเรเอิร์ทในวัฏภาคส่วนที่ไม่ถูกสกัด ณ ตำแหน่งต่างๆบนหอสกัด โดยสารละลาย แเรเอิร์ทในเทอร์คเป็นเฟสต่อเนื่อง (สกัดครั้งที่ 3)..... 42
6.4	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่สภาวะคงตัว..... 56
6.5	สมมูลมวลในแต่ละการสกัดที่สภาวะคงตัว..... 61
6.6	ปริมาณของแเรเอิร์ทใดๆที่ได้จากการสกัด..... 62
ก-1	ข้อมูลสำหรับหอสกัดที่ใช้ในการสกัด..... ก-1
ก-2	แสดงข้อมูลสารป้อนที่ใช้ในการสกัด..... ก-2

สารบัญญตาพ

รูปที่	หน้า
3.1	การสกัดของเหลว-ของเหลว หรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย..... 9
4.1	หลักการในการเลือกเครื่องมือสกัดของเหลวด้วยของเหลวของแฮนสัน..... 16
4.2	คอลัมน์แบบแพค (packed column)..... 21
4.3	คอลัมน์แบบแกนกลางหมุน (RDC)..... 22
4.4	คอลัมน์แบบพัลส์ เพอร์ฟอเรต-เพลท..... 26
4.5	หอสกัดแบบพัลส์ เพอร์ฟอเรต-เพลทที่ใช้..... 28
4.6	โครงสร้างหอสกัดแบบพัลส์ เพอร์ฟอเรต-เพลทที่ใช้..... 29
4.7	เครื่องสูบบวมมิเตอร์ริง..... 30
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารเข้าคอลัมน์กับ %stroke length ของเครื่องสูบบวมมิเตอร์ริงที่ความเร็วต่ำ..... 31
5.1	ขั้นตอนการเตรียมสารป้อน..... 35
5.2	การสกัดเมื่อสารละลาย 50% TBP ในน้ำมันก๊าดเป็นเฟสต่อเนื่อง..... 37
5.3	การสกัดเมื่อสารละลายแเรเอิร์ทไนเตรดเป็นเฟสต่อเนื่อง..... 37
6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแเรเอิร์ทที่สกัดได้กับเวลาในการสกัดครั้งที่ 1 ... 47
6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแเรเอิร์ทที่สกัดได้กับเวลาในการสกัดครั้งที่ 2 ... 48
6.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแเรเอิร์ทที่สกัดได้กับเวลาในการสกัดครั้งที่ 3 ... 49
6.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแเรเอิร์ทกับความสูงของหอสกัด ในการสกัดครั้งที่ 1 50
6.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแเรเอิร์ทกับความสูงของหอสกัด ในการสกัดครั้งที่ 2 51
6.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแเรเอิร์ทกับความสูงของหอสกัด ในการสกัดครั้งที่ 3..... 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

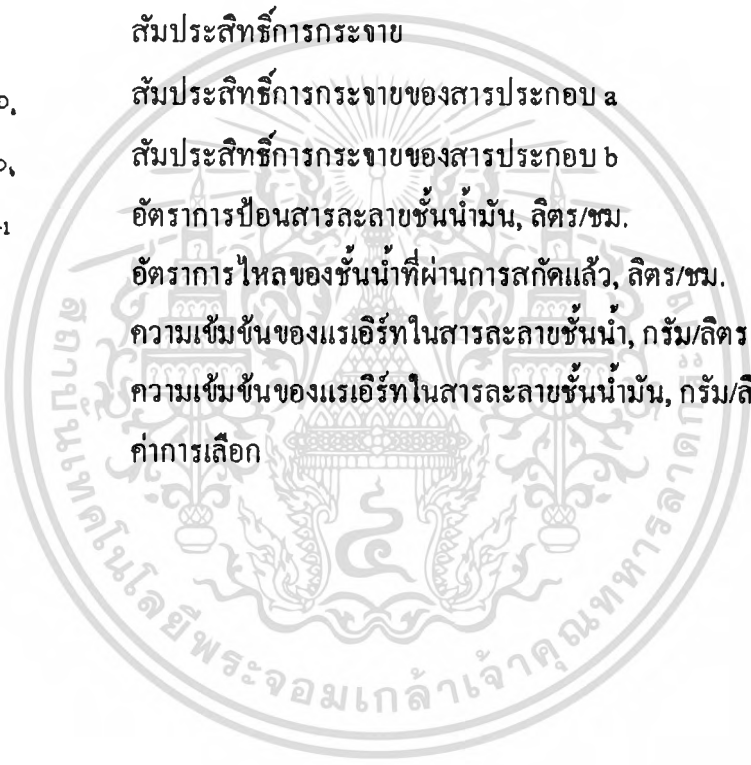
รูปที่

6.7	สัมประสิทธิ์การกระจายกับเวลาในการสกัดครั้งที่ 1	53
6.8	สัมประสิทธิ์การกระจายกับเวลาในการสกัดครั้งที่ 2	54
6.9	สัมประสิทธิ์การกระจายกับเวลาในการสกัดครั้งที่ 3	55
6.10	สัมประสิทธิ์การกระจายของแเรเอิร์ทที่สภาวะคงตัว.....	57
6.11	ค่าการเลือกของการสกัดแเรเอิร์ทที่สภาวะคงตัว (อ้างอิงแลนทานัม).....	58
6.12	ค่าการเลือกของการสกัดแเรเอิร์ทที่สภาวะคงตัว (อ้างอิงเพอร์ซีโอดิเมียม).....	59
6.13	ประสิทธิภาพการสกัดแเรเอิร์ทในการสกัดแต่ละครั้งที่สภาวะคงตัว.....	60
ก-1	โครงสร้างหอสกัดที่ใช้.....	ก-1
ข-1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับ %TBP ในน้ำมันก๊าด.....	ข-2
ข-2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไนตริกในชั้นอินทรีย์กับชั้นน้ำ.....	ข-3
ง-1	กระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางกันหลายชั้น.....	ง-2



สัญลักษณ์

C_E	ความเข้มข้นในวัฏภาคส่วนที่สกัดได้
C_R	ความเข้มข้นในวัฏภาคส่วนที่ไม่ถูกสกัด
E	อัตราการไหลของชั้นน้ำมันที่ผ่านการสกัดแล้ว, ลิตร/ชม.
F	อัตราการป้อนสารละลายชั้นน้ำ, ลิตร/ชม.
i	องค์ประกอบแรเอิร์ทใด ๆ
K_D	สัมประสิทธิ์การกระจาย
K_{D_a}	สัมประสิทธิ์การกระจายของสารประกอบ a
K_{D_b}	สัมประสิทธิ์การกระจายของสารประกอบ b
S_{N+1}	อัตราการป้อนสารละลายชั้นน้ำมัน, ลิตร/ชม.
R_N	อัตราการไหลของชั้นน้ำที่ผ่านการสกัดแล้ว, ลิตร/ชม.
x	ความเข้มข้นของแรเอิร์ทในสารละลายชั้นน้ำ, กรัม/ลิตร
y	ความเข้มข้นของแรเอิร์ทในสารละลายชั้นน้ำมัน, กรัม/ลิตร
α	ค่าการเลือก



--

บทที่ 1

บทนำ

แหล่งกำเนิดของธาตุหายากในธรรมชาติคือมักกระจายอยู่ทั่วไปมากกว่าจะเกิดขึ้นรวมกันเป็นหัวแร่ พบว่ามีแร่เกือบ 200 ชนิดที่มีธาตุหายากปนอยู่ มีแร่เพียง 3 ชนิดที่มีปริมาณมากซึ่งประมาณว่าร้อยละ 95 ของธาตุหายากทั้งโลกมีกำเนิดอยู่ในแร่ทั้งสามชนิดนี้ได้แก่ แร่โมนาไซต์ (monazite) แร่บาสเนไซต์ (bastnesite) และแร่ซีโนไทม์ (xenotime) เนื่องจากจำนวนธาตุหายากมีถึง 15 ธาตุ โดยทั่วไปจึงมักแบ่งธาตุหายากออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ ธาตุหายากกลุ่มเบา หรือกลุ่มซีเรียม และธาตุหายากกลุ่มหนัก หรือกลุ่มอิตเทรียม ในการสกัดธาตุหายากนั้นวิธีที่นิยมคือการสกัดด้วยของเหลว (Liquid-Liquid Extraction)

สำหรับการนำธาตุหายากมาใช้ประโยชน์นั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีการนำมาใช้ทั้งในด้านอุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมเคมี-แคตาลิสต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟอสฟอรัส อุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก เป็นต้น

1.1 ความเป็นมาของปัญญานิพนธ์

เนื่องจากธาตุหายากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากทางสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติได้สกัดธาตุยูเรเนียมและทอเรียมออกจากแร่โมนาไซต์ที่ได้จากเหมืองแร่ดิบูกทางภาคใต้ของประเทศไทย กากแร่ที่เหลือยังมีธาตุหายากเป็นปริมาณมากพอที่จะสกัดได้ โดยธาตุหายากที่พบมีทั้งธาตุหายากกลุ่มเบาและธาตุหายากกลุ่มหนัก ซึ่งเป็นธาตุที่มีมูลค่าและมีคุณค่า สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น แลนทานัมนำไปทำไฮโดรเจนเซลล์ ผลสมทำแก้ว ซีเรียมนำไปผสมกับเหล็กเป็นฟลูออโรซีเรียม ชัดเลนส์ เป็นต้น

อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญญานิพนธ์นี้ เนื่องจากการแยกธาตุหายากทำได้โดยการใช้กรรมวิธีการสกัดด้วยของเหลว (Liquid-Liquid Extraction) ซึ่งอาศัยความแตกต่างของค่า

ไม่่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถในการละลายระหว่างของเหลวสองชนิด ซึ่งจะแยกชั้นกันโดยธรรมชาติ สำหรับธาตุหายากซีเรียมนั้นสามารถแยกได้โดยวิธีการตกตะกอนที่ pH ที่เหมาะสม

ดังนั้น จึงได้ศึกษาการแยกธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ โดยใช้กรรมวิธีการสกัดด้วยของเหลว และใช้หอสกัดแบบฟลัส เฟอร์เฟอร์เรต-เพลท

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการสกัด (Extraction)
2. ศึกษาและทดลองกระบวนการสกัดธาตุหายากด้วย 50% Tri-n-butyl phosphate ในน้ำมันก๊าด (50% TBP in kerosene) โดยหอสกัดแบบฟลัส เฟอร์เฟอร์เรต-เพลท รวมทั้งศึกษาสภาวะของการสกัดให้เหมาะสมกับงานสกัดเพื่อให้ได้การสกัดที่มีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. เตรียมสารละลายแร่เอิร์ทไนเตรดที่มีความเข้มข้นต่างๆ
2. สกัดธาตุหายากออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มนีโอดีเมียม ซาแมเรียม และกลุ่มแลนทานัม เพรซีโอดีเมียม
3. นำความรู้เบื้องต้น หลักการสกัดด้วยของเหลว (Liquid-Liquid Extraction) และข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการสกัดแยกธาตุหายากมาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในหอสกัด

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. พัฒนารัฟฟายากรแร่โดยนำทางแร่ที่ไร้ประโยชน์มาทำให้เกิดประโยชน์
2. สามารถแยกธาตุหายากออกจากกันเป็นกลุ่มๆ ได้เพื่อนำไปแยกแต่ละตัวออกจากกันได้อีกเป็นธาตุเดี่ยวๆต่อไป
3. ผลการศึกษาและทดลองที่ได้จากปริญญานิพนธ์ คาดว่าจะเกิดประโยชน์ในการพัฒนากระบวนการสกัดธาตุหายากไปสู่ระดับโรงงานขนาดเล็ก

บทที่ 2

ธาตุหายาก

2.1 นิยามของธาตุหายาก¹

ธาตุหายาก หรือ Rare Earth elements หรือ Rare Earths โดยทั่วไปหมายถึงธาตุในอนุกรม Lanthanide ในบางครั้งจึงเรียกธาตุหายากว่า Lanthanides หรือ Lanthanons หรือ Lanthanoids ชื่อของอนุกรมธาตุนี้มาจากชื่อของธาตุๆแรกของอนุกรมคือธาตุแลนทานัม ซึ่งอนุกรมธาตุนี้ประกอบด้วยธาตุ 15 ธาตุ เรียงลำดับกันตามเลขอะตอมตั้งแต่ 57 ถึง 71 โดยทั่วไปมักแบ่งธาตุหายากออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ ธาตุหายากกลุ่มเบา (light rare earths) หรือกลุ่มซีเรียม หมายถึงธาตุหายากที่มีเลขอะตอม 57 ถึง 63 (รวมทอเรียม เลขอะตอม 90 ด้วย) และธาตุหายากกลุ่มหนัก (heavy rare earths) หรือกลุ่มอิตเทรียม หมายถึง ธาตุหายากที่มีเลขอะตอม 64 ถึง 71 (รวมทั้งแกนเคียมและอิตเทรียม เลขอะตอม 21 และ 39 มีคุณสมบัติคล้ายคลึงมากกับธาตุหายาก จึงนับรวมไว้ในกลุ่มของธาตุหายากด้วย) ดังตารางที่ 2.1

ในปัจจุบันพบว่าแท้จริงแล้ว ธาตุหายากเป็นธาตุที่หาได้ไม่ยาก คือไม่ “Rare” แต่พบมากในธรรมชาติ เช่น ซีเรียม ซึ่งเป็นธาตุหายากที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับธาตุหายากอื่นๆ ธาตุหายากทุกธาตุมีสมบัติเป็นโลหะ ปกติมีเวเลนซ์สาม บางธาตุได้แก่ ซีเรียม สามารถมีเวเลนซ์สี่ได้เมื่อถูกออกซิไดส์ และบางธาตุสามารถมีเวเลนซ์สองได้เมื่อถูกรีดิวซ์ ได้แก่ ยูโรเพียม อิตเทอร์เบียม และซาแมเรียม

มีการพัฒนาเทคนิคการแยกธาตุหายากต่างๆ ที่สำคัญที่มีการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ คือ Ion exchange chromatography และ liquid-liquid extraction

2.2 แหล่งที่พบ¹

ธาตุหายากมักเกิดกระจายอยู่ทั่วไปมากกว่าจะเกิดรวมกันเป็นหัวแร่ มีแร่อยู่ 3 ชนิด ที่มีปริมาณธาตุหายากมาก ซึ่งประมาณร้อยละ 95 ของธาตุหายากทั้งโลกมีกำเนิด อยู่ในแร่เหล่านี้ คือ แร่บาสเนไซต์ (bastnaesite) แร่โมนาไซต์ (monazite) และแร่ซีโนไทม์ (xenotime)

ในประเทศไทย แร่ที่มีธาตุหายากจะพบในแร่โมนาไซต์

ตารางที่ 2.1 ธาตุหายาก³

ธาตุ	Atomic number	Atomic mass	
แลนทานัม	La	57	138.9
ซีเรียม	Ce	58	140.1
พรซีโอดีเมียม	Pr	59	140.9
นีโอดีเมียม	Nd	60	144.2
โพรมิเทียม	Pm	61	ไม่มีในธรรมชาติ
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
ทูลเลียม	Tm	69	168.9
อิตเทอร์เบียม	Yb	70	173.0
ลูทีเชียม	Lu	71	175.0
(อิตเทรียม	Y	39	88.9)

Light Rare Earths

Heavy Rare Earths

2.3 แร่โมนาไซต์ในประเทศไทย²

แร่โมนาไซต์ (Monazite) เป็นแร่กัมมันตรังสี (Radioactive mineral) ชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มแร่ธาตุหายาก (Rare-earths) โดยมีธาตุทอริยมและยูเรเนียมเป็นองค์ประกอบสำคัญ

2.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

เกิดอยู่ในระบบผลึก Monoclinic โดยผลึกที่พบมักมีขนาดเล็ก ส่วนใหญ่ไม่แสดงรูปผลึกหรือแสดงรูปผลึกไม่ชัดเจน มีสีเหลือง น้ำตาลเหลือง น้ำตาลแดง ส่วนใหญ่มีกอมเขียวหรือบางครั้งเกือบขาว ความวาวของผิวแร่คล้ายขี้ผึ้งจนถึงคล้ายแก้ว โปร่งแสง ความถ่วงจำเพาะ 4.6-5.4 โดยเพิ่มขึ้นตามปริมาณธาตุทอริยม ภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตคลื่นสั้นจะให้สีเขียว สามารถตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีได้ด้วยเครื่อง Geiger Counter หรือเครื่อง Survey Meter มีคุณสมบัติติดแม่เหล็กอย่างอ่อนและไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า

2.3.2 คุณสมบัติทางเคมี

ธาตุ Th ที่อยู่ในแร่โมนาไซต์อยู่ในรูป ThO_2 ตั้งแต่ 2-20% อัตราส่วนของ Ce : La ประมาณ 1:1 Th มักแทนที่ Ce และ La ได้เสมอ ตั้งแต่ปริมาณเล็กน้อยไปจนถึง 10-20% ของธาตุ ThO_2 ส่วนธาตุ Y แทนที่ Ce และ La ได้เล็กน้อย ซิลิกา (SiO_2) มักปนอยู่ด้วยและรวมอยู่ในรูป Thorite (ThSiO_4) หิวแร่โมนาไซต์สะอาดจะมีผลวิเคราะห์ของ Rare-earth Oxides + Thoria (REO + Thoria) ตั้งแต่ 55% ขึ้นไป

แร่โมนาไซต์ โดยทั่วไปเกิดเป็นแร่ประกอบหินในหินอัคนีชนิดหินแกรนิตและในหินแปรชนิดหินไนส์ บางครั้งพบแหล่งของแร่โมนาไซต์ในบริเวณที่มีหินดังกล่าวเป็นหินแม่ ซึ่งอาจมีมากพอจนกลายเป็นแหล่งแร่ที่สำคัญ โดยมีแร่อื่นๆที่เกิดร่วม เช่น แร่ซีโนไทม์ (Xenotime) แร่เซอร์คอน (Zircon) แร่อิลเมไนต์ (Ilmenite) เป็นต้น

ในประเทศไทยพบแร่โมนาไซต์อยู่ในแหล่งแร่ดีบุกเกือบทุกแห่ง ทั้งแหล่งแร่บนบก ในทะเล และบนภูเขา โดยแหล่งแร่มักพบปริมาณของแร่โมนาไซต์ค่อนข้างสูง แต่ความสมบูรณ์ของแร่โมนาไซต์จะต่ำกว่าแร่ดีบุกมาก ในปริมาณที่ต่ำกว่า 0.001% ขณะที่แร่ดีบุกมีความสมบูรณ์พอที่จะทำเหมืองได้ตั้งแต่ 0.012% ขึ้นไป

หิวแร่ดีบุกขั้นต้น (Primary Concentrate) ที่ถูกจากเหมืองจะพบแร่โมนาไซต์ในปริมาณที่สูงขึ้นพอสมควร โดยปกติหิวแร่ดีบุกขั้นต้นจะมีแร่ดีบุกอยู่ตั้งแต่ 10%ขึ้นไปจนถึง 70-80% และจะมีแร่โมนาไซต์ตั้งแต่ 0.01% จนถึงสูงกว่า 1% อย่างไรก็ตามในกระบวนการแต่งแร่จะมีการสูญเสียของแร่โมนาไซต์พร้อมแร่อื่นๆ ไปกับหางแร่หรือขี้แร่ (Tailing) หลังจากแต่งแร่ดีบุกสะอาด ออกไปแล้วจะเหลือมูลแร่หนักหรือแร่กละ (Amang) ซึ่งจะประกอบด้วยแร่ที่มีค่าหลายชนิดเป็นแร่ไม่วางกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลอยได้จากแร่ดีบุก ประกอบด้วยแร่ซีโนไทม์ แร่โมนาไซต์ แร่เซอร์คอน แร่รูไทล์ แร่โคลัมไบต์ เป็นต้น

ผลผลิตแร่โมนาไซต์ที่สำคัญได้จากการนำมูลแร่หรือแร่คละดังกล่าวมาผ่านกระบวนการแต่งแร่อีกต่อหนึ่ง ซึ่งโรงงานที่ผลิตแร่โมนาไซต์คือโรงแต่งแร่ต่างๆในท้องที่จังหวัดภูเก็ต พังงา และระนอง แหล่งแร่โมนาไซต์ที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งก็คือ แหล่งแร่ชายหาด (Beach Sand Deposit) ที่จังหวัดชุมพร ซึ่งมีการแต่งแร่เซอร์คอนและแร่โมนาไซต์เป็นแร่สำคัญ โดยแร่ดีบุกมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ปัจจุบันจำนวนเหมืองแร่ดีบุกได้ลดลงมากเนื่องจากสภาวะราคาแร่ดีบุกตกต่ำทำให้ปริมาณแร่โมนาไซต์ที่เป็นผลพลอยได้มีไม่ถึงปีละ 100 ตัน อย่างไรก็ตามยังมีแร่โมนาไซต์ที่ตกค้างอยู่ในแร่คละหรือมูลแร่ตามเหมืองแร่ดีบุก และโรงแต่งแร่ต่างๆอยู่มาก รวมทั้งหัวแร่โมนาไซต์สะอาดที่ยังไม่ได้จำหน่ายคิดเป็นปริมาณไม่น้อยกว่า 1,500 ตัน ส่วนการผลิตแร่โมนาไซต์จากมูลแร่ในอนาคตขึ้นอยู่กับราคาและความต้องการของตลาดไม่ว่าจะเป็นตลาดภายในหรือตลาดต่างประเทศ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปพส.) กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ได้นำแร่โมนาไซต์มาแปรสภาพโดยการบดให้ละเอียด และการบดแร่ จากนั้นจะมีการแยกธาตุวัฏจักรนิวเคลียร์ ได้แก่ ยูเรเนียมและทอเรียม ออก ที่เหลือจะเป็นกลุ่มธาตุหายากที่ยังคงเหลืออยู่ ซึ่งจะถูกนำไปแยกเป็นธาตุหายากเฉพาะกลุ่ม หรือธาตุหายากเฉพาะตัวต่อไป

2.4 การใช้ประโยชน์จากธาตุหายาก¹

2.4.1 อุตสาหกรรมโลหะ

- ใช้มิชเมทัล (misch metal) ได้จากการนำแร่ที่เป็นต้นกำเนิดธาตุหายากมาแปรสภาพให้เป็นสารประกอบคลอไรด์ แล้วนำมาแยกสลายด้วยไฟฟ้าได้เป็นโลหะของธาตุหายากรวมๆกันทั้งกลุ่ม) ผสมกับเหล็กกล้าเพื่อผลิต high strength low alloy steel
- ใช้มิชเมทัลเติมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลที่อุณหภูมิสูงสำหรับผลิตเครื่องยนต์ของเครื่องบิน

2.4.2 อุตสาหกรรมเคมี-แคตตาลิสต์

- ใช้ซีเรียมเป็นส่วนผสมของแคตตาลิสต์ในกระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนีย เพื่อลดอุณหภูมิของปฏิกิริยาจาก 450-550 องศาเซลเซียส เป็น 400-470 องศาเซลเซียส
- ใช้ดีเทอเรียมหรือซีเรียมเป็นส่วนผสมของแคตตาลิสต์ดูดซับของเสียจากการเผาไหม้ของน้ำมันรถยนต์ (catalytic converter) ซึ่งตามปกติจะต้องใช้สารถึง 3 ชนิดคือ แพลททินัม โรเดียม และแพลเลเดียม ผสมกันและมีราคาแพงโดยเฉพาะอย่างยิ่งแพลททินัม การใช้ธาตุหายากมาผสม ช่วยให้สามารถใช้แพลเลเดียมเพียงธาตุเดียวได้ ซึ่งมีราคาถูกกว่า เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายลดลงร้อยละ 30-50
- ใช้ซีเรียมเป็นสารกันน้ำออกแทนสารตะกั่ว ได้ดีและช่วยลดมลพิษ

2.4.3 อุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก

- ใช้ซีเรียมออกไซด์และยูโรเปียมออกไซด์ผสมในเลนส์ที่มีสีเข้มเมื่อถูกแสงแดดและใสเมื่ออยู่ในที่ร่ม (phototropic lens)
- ใช้ซีเรียมออกไซด์ และนีโอเดียมออกไซด์ผสมในแก้วที่ดูดแสงในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต เพื่อทำภาชนะบรรจุเบียร์ อาหาร และยาที่ไวต่อแสงในช่วงคลื่นนี้
- ใช้ซีเรียมออกไซด์ ผสมในแก้วสำหรับผลิตจอโทรทัศน์สี เพื่อป้องกันมิให้ออกเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเนื่องจากถูกอิเล็กตรอน
- ใช้สำหรับทำให้แก้วมีสีตามต้องการ เช่น นีโอเดียมทำให้แก้วเป็นสีม่วงหรือแดง เออร์เบียม ทำให้แก้วเป็นสีชมพู เป็นต้น
- ผงซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) ใช้สำหรับขัดเลนส์โดยไม่เกิดรอยขีดข่วน
- เพอร์ซีโอเดียมหรือนีโอเดียม ใช้ร่วมกับธาตุอื่นๆ เช่น ไทเทเนียม แมงกานีส สำหรับเคลือบเลนส์ทำให้ค่าดัชนีหักเห (refractive index) ของเลนส์สูงขึ้น ช่วยลดการสะท้อนแสงของเลนส์ได้เกือบทั้งหมดทีเดียว

2.4.4 อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟอสฟอรั

- ผลิต Gallium-Gadolinium-Garnet ใช้ทำ bubble memory film ใช้ในระบบโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์ ฟิล์มชนิดนี้สามารถเก็บข้อมูลด้วยความเร็วสูงกว่าแถบแม่เหล็กและจานแม่เหล็ก ประมาณ 10 เท่าตัว แต่ใช้พลังงานน้อยกว่า นอกจากนี้ข้อมูลที่เก็บไว้จะไม่ถูกลบออกเมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าดับ
- ใช้เลนทานัมออกไซด์มากถึงร้อยละ 20 ผสมในใยแก้วนำแสง (optic fiber) ซึ่งต้องเป็นแก้วที่มีค่าดัชนีหักเห (refractive index) สูงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การใช้ธาตุหายากผลิตไส้หลอดไฟเรืองแสงมีการพัฒนาอยู่เรื่อยๆ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานลงกว่าหลอดไฟแบบเก่า เนื่องจากตัดพลังงานบางช่วงที่ไม่จำเป็นต่อสายตาใน สเปกตรัมของแสงสีขาวออกไป เช่น ยูโรเพียมใน Strontium Chlor Apatite ให้แสงในช่วงน้ำเงิน-ม่วง ยูโรเพียมในอิตเทรียมออกไซด์ให้แสงในช่วงส้ม-แดง และซิงค์ซิลิเกตให้แสงในช่วงสีเขียว

- นีโอติเมียมใช้เป็นวัสดุต้นกำเนิดแสงเลเซอร์

2.4.5 อุตสาหกรรมนาฬิกา

เคมเรเดียมซึ่งแผ่รังสีแกมมาในการทำพารายน้ำสำหรับช่วยดูเวลาในที่มืด ปัจจุบันใช้โพรมีเทียมซึ่งแผ่รังสีเบตาแทน

2.4.6 ด้านเทคโนโลยีนิวเคลียร์

ธาตุหายากบางธาตุจัดได้ว่าเป็นธาตุที่มีค่าพื้นที่หน้าตัดสูง สามารถดูดซับนิวตรอนได้มาก แกโดลิเนียมในปริมาณน้อยจึงถูกใช้ผสมในเชื้อเพลิงนิวเคลียร์สำหรับเป็น burnable poison หรือยูโรเพียมใช้สำหรับระบบความปลอดภัยของการควบคุมปฏิกริยานิวเคลียร์ ซึ่งปกติมี control rod เป็นตัวควบคุม

2.4.7 ด้านอุตสาหกรรมสี

การใช้ในผลิตภัณฑ์เซรามิก สีทาอาคาร และสีเคลือบ เป็นสีแดงซึ่งผลิตจากซีเรียม (Cerium Sulfide, Ce_2S_3) สำหรับทดแทนแม่สีสีแดงที่ใช้ในปัจจุบันมากกว่าปีละ 2 พันตัน ซึ่งผลิตจากโลหะหนัก 2 ชนิดคือ แคดเมียม (cadmium sulfoselenide) และตะกั่ว (lead molybdate)

2.4.8 การผลิตพลังงานสำหรับอนาคต

ไฮโดรเจนนับเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูง เพราะมีอยู่ทั่วไปและเมื่อเผาไหม้ก็ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ แต่อุปสรรคสำคัญอยู่ที่การเก็บกักไฮโดรเจนมีปัญหาทั้งอันตรายจากความดันสูงและการติดไฟได้ง่ายจนอาจเกิดการระเบิดแต่จากการพัฒนาโลหะผสมแลนทานัม-นิกเกิลอัลลอย ($LaNi_5$) ขึ้นมา พบว่าสามารถดูดซับและคายไฮโดรเจนเป็นปริมาณมากๆ ได้ในอุณหภูมิและความดันที่ไม่สูงนัก และยังดูดซับและคายไฮโดรเจนด้วยอัตราที่สูงมาก นับเป็นความหวังทางด้านพลังงานบริสุทธิ์อีกทางหนึ่ง

บทที่ 3

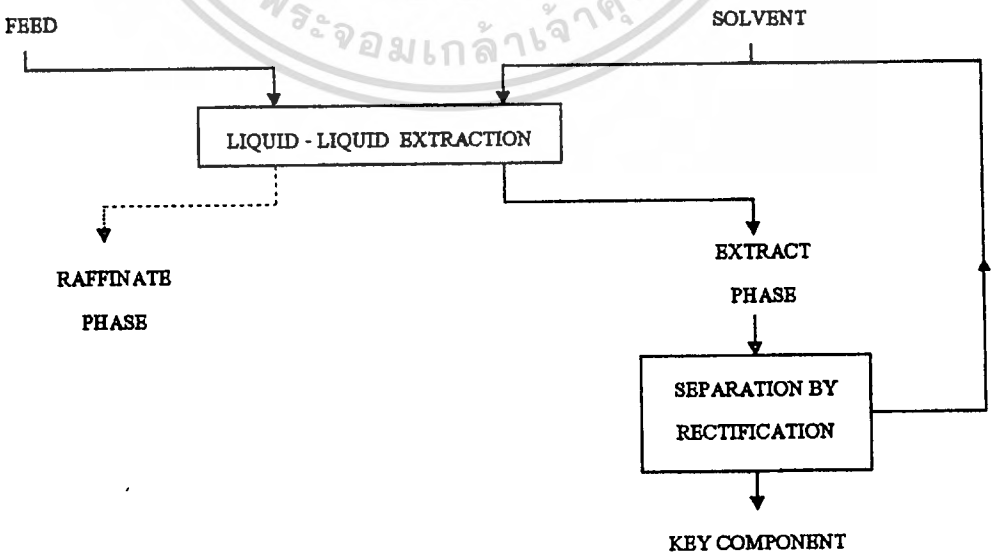
ทฤษฎีการสกัด

3.1 การสกัดและการสกัดของเหลวด้วยของเหลว

การสกัด (Extraction) เป็นการเลือกการละลาย (dissolution) การล้าง (washing) หรือการชะล้าง (leaching) สารจากของเหลวผสมหรือของแข็งผสม โดยใช้ของเหลวเป็นตัวทำละลาย

การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid - liquid extraction) หรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลโดยสารป้อน (feed) ที่เป็นสารละลายของเหลวจะสัมผัสกับของเหลวอีกชนิดที่ไม่ผสมกัน (immiscible) หรือผสมกันเพียงเล็กน้อย เพื่อสกัดสารที่ต้องการ (solute) หลังสกัดแล้วจะได้สิ่งสกัด (extract) ที่มีสารถูกสกัด (solute) ที่ต้องการอยู่มากและส่วนแรฟไฟเนต (raffinate) ซึ่งเป็นสารป้อนที่เหลือจะมีสารถูกสกัดเหลืออยู่เพียงเล็กน้อย

ดังรูป 3.1



รูป 3.1 การสกัดของเหลว - ของเหลว หรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นหากมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การประยุกต์ใช้

การสกัดของเหลวด้วยของเหลวมีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากใช้พลังงานน้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการกลั่น โดยสารที่มักใช้วิธีสกัดของเหลวด้วยของเหลว อาทิ

- สารผสมที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน หรือเท่ากัน (azeotrope)
- สารประกอบที่จะแยกมีปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ไม่ต้องการ
- สารหลักหรือของเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ หากแยกด้วยการกลั่นจะเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่า

3.3 การกระจาย (Distribution) และค่าการเลือก (Selectivity)

เนื่องจากการสกัดของเหลวด้วยของเหลวเป็นกระบวนการถ่ายเทมวล ดังนั้นสมดุลทางเคมีจึงมีผลต่อการสกัดพารามิเตอร์สมดุล คือ สัมประสิทธิ์ของการกระจาย (distribution coefficient หรือ partition coefficient)

$$m = y_a / x_a \quad (3.3-1)$$

- เมื่อ m เป็นสัมประสิทธิ์ของการกระจาย
 y_a เป็นความเข้มข้นของสารประกอบ a ในสิ่งสกัด
 x_a เป็นความเข้มข้นของสารประกอบ a ในแรฟฟิเนต

ในกรณีการพิจารณาการใช้ตัวทำละลายเฉพาะในการแยกสารประกอบ 2 ชนิดในสารละลายของเหลวโดยใช้การสกัดของเหลวด้วยของเหลว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงด้วยคือค่าการเลือก α_{ab} (selectivity)

$$\alpha_{ab} = m_a / m_b \quad (3.3-2)$$

- เมื่อ α_{ab} เป็นค่าการเลือกของตัวทำละลายที่พิจารณา
 m_a เป็นสัมประสิทธิ์ของการกระจายของสารประกอบ a ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและสายสารป้อน
 m_b เป็นสัมประสิทธิ์ของการกระจายของสารประกอบ b ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ a พิจารณาเป็นสารถูกสกัดที่ต้องการสกัดออกจากสารป้อนโดยวิธีสกัด ส่วนสารประกอบ b เป็นสารที่ต้องการให้เหลืออยู่ในแรฟฟิเนต

สำหรับการสกัดด้วยตัวทำละลาย α_{m} ต้องมากกว่าหนึ่ง เพราะเมื่อค่าการเลือกสูงจะทำให้การสกัดที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นด้วย

3.4 การเลือกตัวทำละลาย

การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัด ต้องพิจารณาหลายปัจจัยด้วยกัน คือ

- * ค่าการเลือกสูง เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด และเลือกตัวทำละลายที่มีสัมประสิทธิ์การกระจายของสารถูกสกัดที่ต้องการสูง

- * ง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ปัจจัยนี้สำคัญพอๆกับค่าการเลือก

- * ความสามารถในการละลาย (miscibility) กับสารป้อนมีค่าต่ำ การเลือกตัวทำละลายที่มีค่าการเลือกสูงเพื่อลดปริมาณสารที่ไม่ต้องการที่จะเข้าไปในสารสกัดให้น้อยที่สุด จึงต้องเลือกตัวทำละลายที่ละลายกับสารป้อนต่ำเพื่อแรฟฟิเนตจะได้มีตัวทำละลายปนอยู่น้อยที่สุด ตัวทำละลายจะถูกนำกลับไปใช้ใหม่อีกโดยผ่านการกลั่นหรือการสตริบ (stripping) เพื่อลดค่าใช้จ่ายและปัญหาสิ่งแวดล้อม

- * ความหนาแน่นแตกต่างจากสารป้อน ในการสกัดมักผสมของเหลว 2 เฟสเข้าด้วยกันแล้วทิ้งให้แยกกัน สิ่งที่ทำให้เกิดการแยก (settling) คือความแตกต่างของความหนาแน่นซึ่งมีความสำคัญ ควรมีความแตกต่างกันมากกว่า 2 % ซึ่งจะใช้เวลาในการทิ้งไว้ให้แยกชั้น (settling time) น้อยลง

- * แรงตึงผิว (interfacial tension) แรงตึงผิวมีความสำคัญต่อการผสม ถ้าแรงตึงผิวน้อยจะใช้พลังงานในการกระจายหยดน้อย ถ้ามีค่าต่ำมากๆ เช่น ต่ำกว่า 1 dyne/cm อาจเกิดอิมัลชัน (emulsion) ทำให้การแยกชั้นไม่เกิดหรือใช้เวลานาน ในทางกลับกัน ถ้ามีค่ามากคือ ประมาณ 50 dynes/cm จะทำให้ใช้พลังงานมากในการสร้างหยด ซึ่งหยดมีแนวโน้มจะรวมกันอีกครั้งเป็นหยดที่ใหญ่ (re-coalesce)

- * ความหนืดต่ำ ปกติมักทำการสกัดที่ความหนืดต่ำกว่า 10 cp ซึ่งจะทำการบวกรวมการสกัดมีการถ่ายเทมวลสารดี และมีความจุ (throughput capacity) สูง ความหนืดที่กำหนดไว้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิการสกัด หากตัวทำละลายมีคุณสมบัติต่างๆเหมือนกัน ควรเลือกตัวทำละลายที่มีความหนืดต่ำกว่า

- * การกักร้อนต่ำ ควรเลือกตัวทำละลายที่มีการกักร้อนต่ำกว่าสารป้อน
- * ความไวไฟและความเป็นพิษต่ำ หากไม่สามารถเลือกตัวทำละลายที่มีความไวไฟต่ำได้ ต้องเลือกอุปกรณ์และภาวะที่เหมาะสม ถ้าตัวทำละลายที่เลือกมีความเป็นพิษสูง ต้องพิจารณาให้ดี ในการกำจัดออกหลังจากผ่านออกมาจากกระบวนการ
- * ราคาถูกและหาง่าย

3.5 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการสกัดแยกธาตุหายากดังนี้

โบชินสกี และคณะ¹²(Julius Bochinski, Morton and F.H.Spedding, 1958) ได้เสนอข้อมูล สมดุลสำหรับแเรเอิร์ทไนเตรด-น้ำ-ไตรบิวทิลฟอสเฟต ซึ่งคำนวณด้วยวิธีทางพีชคณิตตามสภาวะที่กำหนดโดยสารละลายแเรเอิร์ทไนเตรดจะเข้าไปสัมผัสกับไตรบิวทิลฟอสเฟต ในการสกัดแบบแบตช์ ความเข้มข้นรวมของแเรเอิร์ทไนเฟสของไตรบิวทิลฟอสเฟตขึ้นอยู่กับปริมาณกรดไนตริก และความเข้มข้นรวมของสารละลายแเรเอิร์ทไนเตรดในชั้นน้ำมีความเป็นกรดต่ำๆ เส้นสมดุลเส้นหนึ่งจะแสดงข้อมูลสมดุลของการผสมเส้นโค้งเฉลี่ยของโมนาไซต์แเรเอิร์ทไนเตรดรวมและเส้นโค้งสำหรับธาตุหายากเดี่ยวๆจะต่างจากเส้นโค้งเฉลี่ยเพียงเล็กน้อย

โบชินสกี สมุทซและสเปดดิ้ง¹³(J.Bochinski, M.Smutz and F.H. Spedding) ได้ศึกษาการสกัดแเรเอิร์ทแต่ละตัวด้วยการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว จากแเรเอิร์ทในรูปสารละลายแเรเอิร์ทไนเตรดด้วยไตรบิวทิลฟอสเฟตเข้มข้น(ไม่มีกรดไนตริก) พบว่า แฟกเตอร์การสกัดอาจเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแเรเอิร์ทเพิ่มขึ้น แต่จะไม่ขึ้นกับองค์ประกอบของส่วนผสมของสารละลายแเรเอิร์ทไนเตรด และที่สมดุล สัดส่วนของสารละลายแเรเอิร์ททั้งหมดในไตรบิวทิลฟอสเฟตกับแเรเอิร์ททั้งหมดในส่วนเฟสน้ำจะเป็นฟังก์ชันของปริมาณของธาตุหายากที่มี และไม่ขึ้นกับองค์ประกอบส่วนผสมในธาตุหายาก ถ้าความเข้มข้นของแเรเอิร์ทในหอสกัดสูงขึ้นโดยการรีฟลักซ์สารละลายแเรเอิร์ทในสายผลิตภัณฑ์ซึ่งจะน่าสนใจถ้าหากทำให้ชั้นในการสกัดน้อยลง ภายใต้สภาวะเหล่านี้ความเข้มข้นทั้งหมดของสารละลายที่มีในแต่ละชั้นยังคงคงที่และใช้การคำนวณง่ายๆ ในการหาเงื่อนไขในการทำงานสูงสุดได้

แพรด และคณะ¹⁴(H.R.Clive Pratt, Leanne M.Prvcie and Geoffrey W.Stevens, 1989)ได้ศึกษาการกระจายตามแกนนอนของหอสกัดแบบพัลส์ เพอร์ฟอเรทด์-เพลท และสัมประสิทธิ์การผสมกลับของหอสกัดแบบพัลส์ เพอร์ฟอเรทด์-เพลทที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์เป็น 72 152 และ300 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยศึกษาทั้งเฟสเดี่ยว(น้ำ) และสองเฟส(น้ำมันก๊าด-น้ำ) กำหนดให้

น้ำเป็นเฟสต่อเนื่องพบว่า สัมประสิทธิ์การผสมกลับเพิ่มขึ้นตามเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับเฟสเดียว แต่ไม่ขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์เมื่อเป็นสองเฟส

ควอน, เลวิน และเชลลีย์¹⁵ (C.H. Quan, D.Levins and P.Shelley, 1992) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวสกัด(extractant) และค่า diluent ของสัมประสิทธิ์การกระจายระหว่างเฟสน้ำและเฟสอินทรีย์ และค่าแฟกเตอร์การแยกระหว่างแรเอิร์ท เมื่อใช้ di-2-ethyl-hexyl phosphoric acid (D2EHPA) ความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร หรือ 2-ethyl-hexyl phosphoric acid (Ionquest® 801) เป็นตัวสกัด และสารละลายแรเอิร์ทคลอไรด์ โดยใช้ Shellsol2037 และ 2358 เป็น diluent พบว่า D2EHPA ให้ค่าการสกัดแรเอิร์ทสูงสุดแต่ค่าการเลือกต่ำกว่า Ionquest และค่าแฟกเตอร์การแยกของ Ionquest คีกว่า D2EHPA ด้วย จากพฤติกรรมของอิตเทรียม (Y) สามารถจัดอยู่ในกลุ่มของแรเอิร์ท กลุ่มหนักโดยมีสัมประสิทธิ์การกระจายอยู่ระหว่าง Ho และ Er ทำให้สามารถทำนายลักษณะได้จาก ionic radius ของมัน

เซงและเลวิน¹⁶ (H.Y.Cheng and D.M.Levins., 1992) ได้ศึกษาการสกัดแรเอิร์ทด้วยตัวทำละลายโดยใช้ระบบพัลส์คอลัมน์ มีสารป้อนเข้าคอลัมน์เป็นสารละลายผสมแรเอิร์ทคลอไรด์ที่มีปริมาณ RE 10 กรัม/ลิตร สารสกัดใช้ Ionquest® 801 5% ใน Shellsol 2037 ซึ่งเป็นตัวเจือจางอิตเทรียมและแรเอิร์ทกลุ่มหนักถูกสกัดออกด้วยประสิทธิภาพสูง การสกัดอิตเทรียมอยู่ในพิสัย 83-99.2% และ HTU จะอยู่ในพิสัย 17-92 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในพิสัยของค่ารายงานของธาตุที่ไม่ใช่แรเอิร์ทของระบบพัลส์คอลัมน์

นางสาวนงลักษณ์ พลรัักษ์ และคณะ¹⁷ (2538) ได้ศึกษาสภาวะการทำมในคอลัมน์ระบบพัลส์แบบเพลทเจอร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกสูงขึ้น ค่าความจุสูงสุดของคอลัมน์แบบเพลทเหล็ก ไร์สนิมเบอร์ 304 มากขึ้น ส่วนค่าความจุสูงสุดของคอลัมน์แบบเพลทเทฟลอนมีค่าลดลง ที่ความดัน ความถี่ และของเหลวชนิดเดียวกันพบว่าค่าแอมพลิจูดของของเหลวในคอลัมน์ทั้งสองใกล้เคียงกัน ในกรณีที่เฟสกระจายหรือเฟสต่อเนื่องเหมือนกัน คอลัมน์แบบเพลทเทฟลอนจะให้ค่าความจุสูงสุดมากกว่าคอลัมน์แบบเพลทเหล็ก ไร์สนิมเบอร์ 304

บทที่ 4

เครื่องมือสกัดของเหลวด้วยของเหลว

4.1 การเลือกเครื่องมือในการสกัด^{8,9,10}

ในการออกแบบและเลือกใช้เครื่องสกัดในอุตสาหกรรม ควรคำนึงถึงความต้องการพื้นฐาน ดังนี้

1. ประสิทธิภาพในการสกัด
2. ปริมาตรของเครื่องสกัดต่ำและใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย
3. ประหยัด

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสกัด คือ

1. องค์ประกอบในเฟส
2. อัตราส่วนของเฟส
3. คุณสมบัติของเฟส
4. อุณหภูมิ
5. พลังงานที่ป้อนเข้าไป
6. การสกัดย้อนกลับ

การเลือกเครื่องมือในการสกัดโดยทั่วไปมักพิจารณาจากประสิทธิภาพและหลักเศรษฐกิจ โดยต้องพิจารณาตัวถูกละลายถึงคุณสมบัติทางด้านอัตราการไหล คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์และเคมีของระบบที่จะสกัด บางครั้งอาจเกิดความยุ่งยากขึ้นคือ สารอาจเป็นของแข็ง อิมัลชัน (emulsion) หรือวัสดุที่ย่อยสลายง่าย ซึ่งต้องนำมาพิจารณา รวมทั้งพิจารณาพื้นที่ที่จะวางเครื่องมือในการสกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

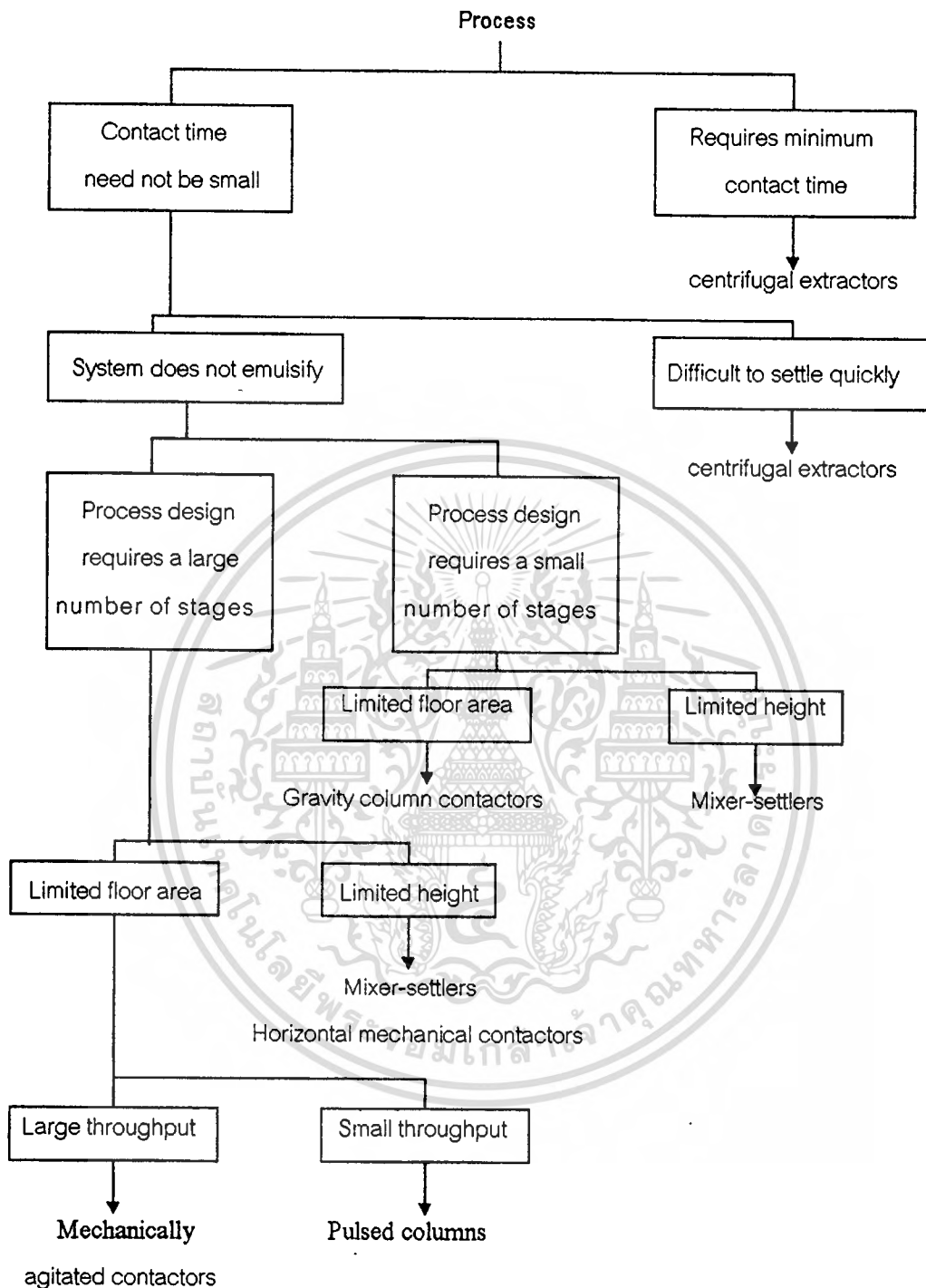
ด้วย สูดทำขี้อราคาค่าติดตั้ง ค่าบำรุงรักษาและการเดินเครื่อง โดยประมาณจากเครื่องมือในการ สกัดซึ่งต้องมีการพิจารณาทั้งหมด ส่วนคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องนั้นจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการ เลือกเครื่องมือสกัด

แพรด (Pratt, 1954) เสนอรายละเอียดกระบวนการเพื่อใช้เลือกเครื่องมือในการสกัด ซึ่งเป็นพื้นฐานในการออกแบบต่างๆ แต่กระบวนการยังมีข้อเสียคือ เครื่องมือที่อยู่ในระดับการเลือกที่ เท่ากัน จะมีตัวแปรมากมายที่ต้องพิจารณา

โอลิเวอร์ (Oliver, 1966) เสนอการเลือกเครื่องมือสกัด โดยเลือกในช่วงกลางของกำลังไฟ ฟ้าที่ต้องการสำหรับการกระจายระหว่าง 2 เฟส ทางเลือกที่ดีที่สุดคือ ใช้คอลัมน์ที่มีการกวนด้วย โรเตอร์ (rotor) ขกเว้นกรณีมีอิมัลชันที่เสถียร ควรเลือกเครื่องสกัดชนิดอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal extractor) เครื่องสกัดแบบร่นนึ่ง บักเก็ต (raining bucket หรือ Graesser RTL) หรือ เครื่องสกัดตามแนวนอนแบบแกนกลางหมุน (horizontal rotary disc contactor) แทน ส่วนคอลัมน์ ที่ไม่มีการ กวนสามารถใช้ได้หากต้องการพลังงานไฟฟ้าไม่มาก

แฮนสัน¹⁰ (Hanson, 1968) เสนอการเลือกเครื่องมือในการสกัดโดยใช้แผนภาพ นับเป็น วิธีการเลือกที่รวดเร็ว อีกทั้งยังรวมปัจจัยที่ช่วยในการเลือกเครื่องมือในการสกัดอีกด้วย ดังรูป 4.1

วิธีของ โอลิเวอร์และแฮนสันจัดได้ว่าเป็นการเลือกเครื่องมือในการสกัดที่ดี อย่างไรก็ตาม ยังต้องพิจารณาถึงหลักทางเศรษฐกิจเป็นสำคัญก่อนการตัดสินใจ โดยทั่วไปมักเริ่มจากตัวเลือกของ เครื่องมือในการสกัดที่ครอบคลุมถึงคุณสมบัติของระบบเฉพาะ รวมทั้งประสิทธิภาพในการบำรุง รักษา และการทำงานที่แน่นอน



รูป 4.1 หลักการในการเลือกเครื่องมือสกัดของเหลวด้วยของเหลวของแฮนสัน

4.2 ประเภทของเครื่องสกัด^{8,9,10}

เครื่องสกัดสามารถแบ่งได้หลายประเภท ในที่นี้จะกล่าวถึงการแบ่งประเภทเครื่องมือ ลักษณะใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท คือ

4.2.1 แบ่งตามลักษณะการใช้งานในอุตสาหกรรม

1) แบบสเตจไวส์ (Stagewise) เครื่องสกัดจะมีจำนวนขั้นตอนสมดุลแบ่งแยกให้เห็นอย่างชัดเจน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนสมดุลนั้นจะมีประสิทธิภาพในการสกัดแยกสารสูง

2) แบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) เครื่องสกัดแบบนี้จะมีการถ่ายเทมวลตลอดความยาวของเครื่อง ของเหลวจะไหลสวนทางกันเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของเหลว 2 เฟส เครื่องสกัดนี้จะไม่มีการแบ่งแยกอย่างชัดเจนและจะเกิดการแยกเฟสที่ปลายเครื่องเท่านั้น

4.2.2 แบ่งตามลักษณะการใช้พลังงานกลจากภายนอก ดังตาราง 4.1

1) ประเภทไม่ใช้พลังงานกลภายนอก

ข้อดี - ค่าใช้จ่ายต่ำ

ข้อเสีย - เกิดการผสมน้อย

- พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนมวลต่ำ

- ประสิทธิภาพการสกัดของคอลัมน์ต่ำ

ตัวอย่าง - คอลัมน์แบบสเปรย์ (Spray column)

- คอลัมน์แบบแพค (Packed column)

2) ประเภทใช้พลังงานกลภายนอก

ข้อดี - พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนมวลสูง

- ประสิทธิภาพการสกัดของคอลัมน์ดี

ข้อเสีย - ค่าใช้จ่ายสูง

- ถ้ากวนมากเกินไป อาจทำให้เกิดการผสมย้อนกลับ (Backmixing) ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสารลดลง

- มีการผสมตามแนวแกน

ตัวอย่าง - การกวน (Agitated) ได้แก่ คอลัมน์แบบแกนกลางหมุน

- การเขย่า (Pulsation) ได้แก่ คอลัมน์แบบพัลส์แพค (pulsed packed)

ตาราง 4.1 การจำแนกประเภทเครื่องสกัดและการใช้งาน^๑

Classification and type	Industrial applications*
A. Gravity-separated extractors	
a. Continuous-contact (i.e. differential)	
1. Non-mechanical columns	
(i) Spray columns	CR
(ii) Baffle-plate columns	C, P
(iii) Packed columns	C, P, N
2. Mechanically-agitated columns	
(i) Pulsed packed columns	C, P
(ii) Raining bucket (Graesser RTL) contactor	C
b. Discontinuous (i.e. stagewise) contact, no interstage settling	
1. Rotary agitated columns	
(i) Rotary disc column (RDC)	C, P
(ii) Multi-impeller columns	C, P, M
2. Reciprocating types	
(i) Pulsed perforated plate column	C, P, Ph, M, N
(ii) Oscillating plate (Karr) column	C, P, Ph
c. Discontinuous (stagewise) contact, with interstage settling	
1. Partial Settling	
(i) Scheibel column	C, Ph
(ii) Asymmetric rotary disc column (ARDC)	C, Ph
2. Total Settling	
(i) Perforated plate column (with downcomers or riser)	P, C
(ii) Rotary film extractor	M
(iii) Vertical mixer-settlers	P, C, M
(iv) Horizontal mixer-settlers	P, C, M, N
B. Centrifugally-separated extractors	
a. Continuous contact	
1. Perforated plate (Podbaniak)	C, Ph, (N)
2. Film-flow (de Laval)	C, Ph, (N)
b. Mixer-settler	
1. Luwesta	C, Ph
2. Robatel	C, Ph

*Key to applications: C = chemical manufacture; CR = fast homogeneous chemical reaction only; P = petroleum refining, petrochemicals; Ph = pharmaceutical; M = hydrometallurgy; N = Nuclear

4.2.3 แบ่งตามลักษณะการวางตัวของคอลัมน์ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) คอลัมน์ตามแนวตั้ง (Vertical column type extractors)

การใช้คอลัมน์ตามแนวตั้งจะประหยัดพื้นที่ติดตั้งมากกว่า และไม่มีส่วนพัก (Settler) ระหว่างสเตรง ทำให้เกิดการกักเก็บตัวทำละลายในกระบวนการน้อยลง

ตัวอย่าง คอลัมน์แบบสเปรย์ (Spray column)

2) คอลัมน์ตามแนวนอน (Horizontal extractors)

- มิกเซอร์เซทเทเลอร์ (Mixer-settlers)

- เครื่องสกัดแบบใช้แรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal extractors)

- เครื่องสกัดแบบแกนกลางหมุนตามแนวนอน (Horizontal rotating disc

contactor)

- เครื่องสกัดแบบเรนนิ่ง บัคเก็ต (Raining bucket extractors)



4.3 ตัวอย่างเครื่องสกัดที่ใช้ในอุตสาหกรรม^๑

4.3.1 คอลัมน์แบบแพค (Packed column)

คอลัมน์แบบแพคพัฒนามาจากคอลัมน์แบบเดิม โดยลดการหมุนเวียนของเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) ด้วยการบรรจุวัสดุขนาดเล็กหรือแพกกิง คอลัมน์ประเภทนี้เป็นแบบที่ง่าย ราคาถูกและสามารถขยายเส้นผ่านศูนย์กลางได้โดยไม่มีปัญหาในการเดินเครื่อง

การจัดคอลัมน์แสดงดังรูป 4.2(ก) เพลท (Plate) ที่รองรับการบรรจุควรมีพื้นที่ว่างอย่างน้อยเท่ากับแพกกิง(packings) รวมทั้งมีตะแกรง (bar grid) ดังรูป 4.2(ข) แฮมิลตันและแพรต (Hamilton and Pratt, 1984) สตีเวนและแพรต (Stevens and Pratt, 1986) ได้เสนอว่าเฟสกระจายที่ปั่นเข้าไปผ่านท่อขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-7 มิลลิเมตร ขณะที่หยดเกิดการกระจายอย่างรวดเร็วจนกระทั่งกระจายขนาดที่สถานะคงตัว (steady state) อัตราการถ่ายเทมวลจะต่างจากคอลัมน์แบบสเปรย์ เนื่องจากเส้นทางที่คดเคี้ยว รวมทั้งการลดความเร็ว การเพิ่มความเร็ว การรวมตัวและการกระจาย

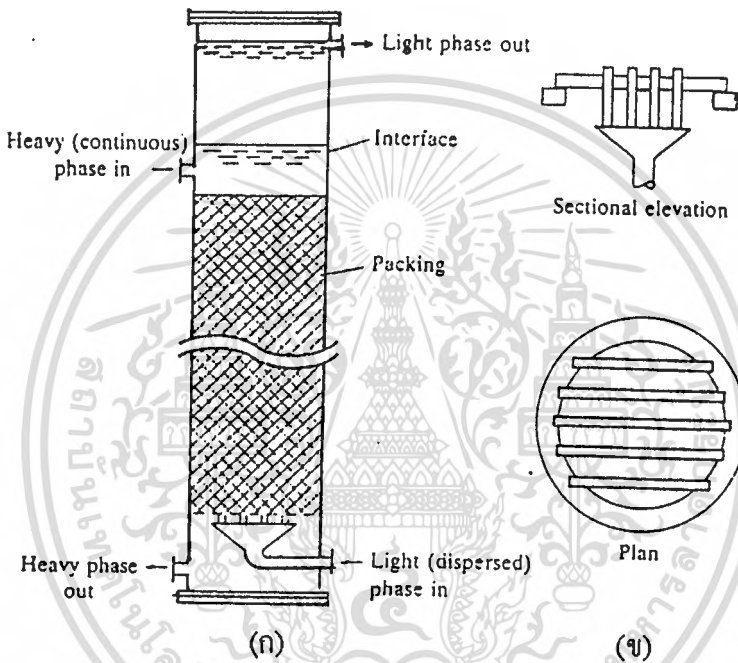
ส่วนมากคอลัมน์ประเภทนี้เมื่อใช้กับระบบที่สะอาดคงเช่นระบบน้ำ จะใช้เซรามิกหรือโลหะเมื่อเฟสอินทรีย์ (Organic phase) เป็นเฟสกระจาย อีกทางเลือกหนึ่งคือใช้พลาสติก เช่น โพลีเอทิลีน หรือโพลีโพรไพลีนเมื่อเฟสน้ำ (aqueous phase) เป็นเฟสกระจาย หากใช้วัสดุสลับกัน เช่น ใช้เซรามิกหรือโลหะบรรจุเมื่อเฟสน้ำเป็นเฟสกระจาย เฟสกระจายจะไหลบนแพกกิงเหมือนฟิล์มซึ่งแม้มีความหนาเพียงเล็กน้อยก็ทำให้การทำงานลดลง

4.3.2 คอลัมน์แบบแกนกลางหมุน (Rotary disc column หรือ RDC)

เครื่องสกัดประเภทนี้ได้รับการพัฒนาในห้องทดลองของรอยดัลด์ช/เชล (Royal Dutch/Shell laboratories) อัมสเตอร์ดัม เมื่อค.ศ.1948-1952 ดังรูป 4.3(ก) RDC ประกอบด้วยช่องว่างตามแนวตั้งที่แบ่งเป็นส่วนๆโดยวงแหวนสเตเตอร์ (Stator ring) และมีแกนตามแนวตั้ง ขยับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าภายนอก ซึ่งมีชุดของโรเตอร์คิสก์อยู่ตรงตำแหน่งถึงกลางส่วนที่แบ่งไว้ เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์คิสก์จะน้อยกว่าส่วนเปิดของสเตเตอร์ ดังนั้นโรเตอร์ทั้งหมดสามารถใส่หรือถอดออกเพื่อทำการบำรุงรักษาได้ ในขณะที่เครื่องสกัดกำลังทำงาน สารทั้งหมดที่อยู่ในคอลัมน์จะหมุนและเกิดเป็นคู่กระแสวนตามแนววนอน (vortex) ซ้อนทับกันระหว่างโรเตอร์แต่ละคู่ ซึ่งอยู่คร่อมสเตเตอร์คิสก์ทั้งสองที่อยู่ติดกัน ดังรูป 4.3(ข) การเกิดกระแสวนนี้จะช่วยทำให้เฟสกระจายมีขนาดหยดเล็กลงเมื่อการไหลสุทธิของสารประกอบในแนวตั้งซึ่งไหลสวนทางกับเฟสต่อเนื่อง

^๑ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

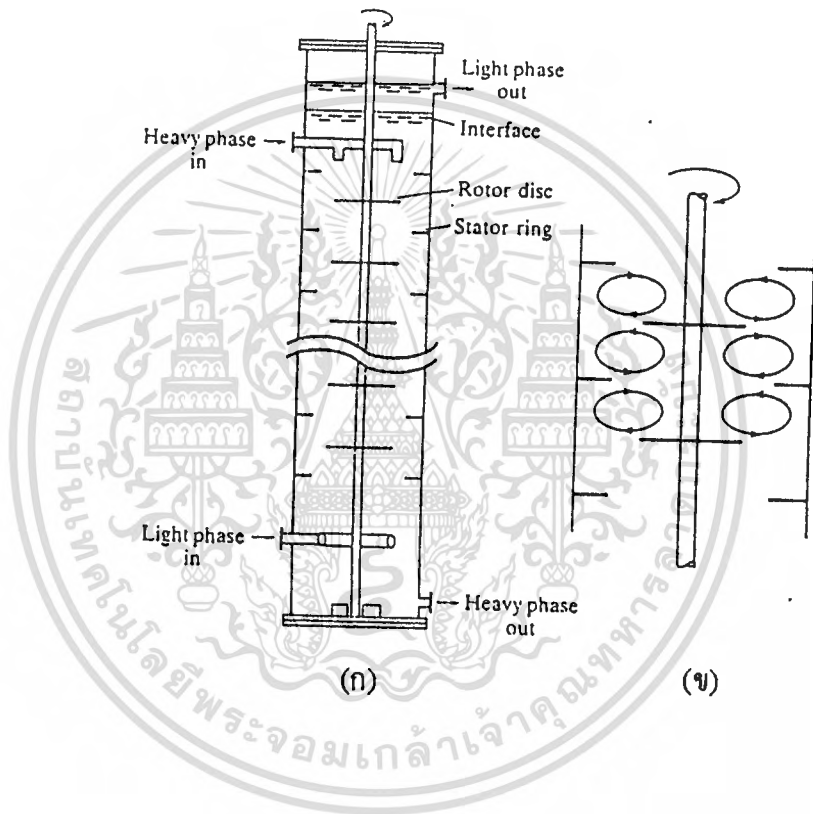


รูปที่ 4.2 คอลัมน์แบบแพค (packed column)⁸

(ก) รูปแบบทั่วไปของคอลัมน์

(ข) การแพค เป็นเหมือนตะแกรง

และช่วยให้เฟสเบาถูกกระจาย



รูปที่ 4.3 คอลัมน์แบบแกนกลางหมุน (RDC)⁸

(ก) รูปแบบทั่วไปของคอลัมน์

(ข) รูปแบบของการไหลในแต่ละสเตจ

จากการศึกษาของคอสเตอร์ (Kosters (ค.ศ. 1983) พบว่า ส่วนมาก RDC ที่ใช้มักมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงต่ำกว่า 1 เมตรจนถึง 4.5 เมตร และมักใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เนื่องจาก RDC มีโครงสร้างเปิดจึงเกิดความสกปรกน้อยกว่าเครื่องสกัดชนิดอื่น จึงสามารถใช้ได้กับระบบที่มีของแข็ง เช่น การทำผลึกให้บริสุทธิ์ การล้างของแข็ง

ความอยู่ตัวของกระแสน้ำเกิดได้จากผลกระทบของมวลสารในระหว่างโรเตอร์คิสก์และวงแหวนสเตเตอร์ที่เหมาะสม นอกจากนี้ควรมีพื้นที่ว่างเพียงพอในการไหลตามแนวตั้ง การเลือกระยะความสูงของแต่ละส่วนควรทำอย่างระมัดระวัง หากสูงเกินไปจะทำให้เกิดกระแสน้ำที่ไม่เสถียร หากน้อยไปจะลดการเกิดกระแสน้ำ ผลจากการขยายขนาดของเครื่องจะมากกว่าผลจากการเพิ่มความสูงของเครื่องสกัด โดยจะทำให้การถ่ายเทมวลต่อสเตรจเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาที่สารอยู่ในเครื่อง(residence time)เพิ่มขึ้น ในการขยายขนาด ควรใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์อย่างน้อย 7.5 เซนติเมตร นิยมใช้ 10 - 15 เซนติเมตร รวมทั้งควรแบ่งคอลัมน์ไม่น้อยกว่า 15 ส่วน ขณะโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่อเนื่อง

4.3.3 เครื่องสกัดแบบพัลส์ (Pulsed Extractor)

จากข้อมูลที่ผ่านมาพบว่า คอลัมน์แบบพัลส์สามารถควบคุมการทำงานง่าย มีความทนทานสูง และปริมาตรต่ำกว่าคอลัมน์ที่มีการกวน แม้ว่าแบบมีเครื่องกวนจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบไม่มีเครื่องกวน พลังงานที่ใช้ในระบบจะนำไปใช้ในการเคลื่อนที่ไปมาของพัลส์ เช่น ชั้นส่วนของเพลทที่เจาะรูซึ่งมีการเคลื่อนที่ไปมา ขณะที่เพลทของเหลวทั้งสองสัผัสกัน เมื่อมีการไหลสวนทางกันในคอลัมน์

แวน (Van Dijk, 1935) เสนอลักษณะการทำงานของคอลัมน์ที่มีการพัลส์ 2 แบบ คือ

1. การใช้เพลทที่มีการเจาะรู โดยจะเคลื่อนที่ไปตามแนวตั้งของคอลัมน์เมื่อมีของเหลวไหลผ่าน
2. โครงสร้างภายในของการสกัด เช่น แปกกิงและซีฟเพลท (Sieve plate) ทุคหนึ่งขณะที่ของเหลวถูกพัลส์ด้วยไฮโดรลิกโคบอลไกของการพัลส์ภายนอก พลังงานที่ใช้ในการพัลส์จะเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนมวลโดยการเพิ่มพื้นที่สัมผัส หรือจะสร้างเกิดความปั่นป่วนสูงขึ้นในระบบ โดยการให้ความเร่งและความหน่วงกลับไปกลับมาในของเหลว

ตัวอย่างของคอลัมน์แบบพัลส์

4.3.3.1 คอลัมน์แบบพัลส์สเปรย์ (Pulsed spray column)

คอลัมน์แบบสเปรย์เป็นเครื่องสกัดที่มีลักษณะเป็นท่อยาวว่างเปล่ามีของเหลว 2 เฟสไหลสวนทางกัน โดยเฟสกระจายถูกฉีดกระจายผ่านของเหลวชนิดที่สอง ซึ่งเรียกว่าเฟสหลัก โดยที่หยดอาจจะไหลผ่านขึ้นหรือผ่านลงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเฟสกระจายเมื่อเปรียบเทียบกับเฟสหลัก เครื่องสกัดประเภทนี้นิยมใช้เพราะสามารถใช้ได้กับของเหลวที่มีความสกปรกและมีการกัดกร่อน ซึ่งไหลผ่านด้วยอัตราการไหลสูง นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ง่าย ราคาถูก และมีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง ดังนั้นประสิทธิภาพของคอลัมน์แบบสเปรย์สามารถเพิ่มขึ้นได้หากเพิ่มอัตราการไหล

สำหรับการขยายขนาดและการออกแบบลูริก (Luric and Sharer) กล่าวว่า การพัลส์มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกของคอลัมน์แบบสเปรย์เพียงเล็กน้อย โดยเฉพาะที่ความถี่การพัลส์ต่ำๆ O'Brien (ค.ศ. 1954) รายงานว่า ประสิทธิภาพของเครื่องจะสูงขึ้นเมื่อความถี่พัลส์สูงขึ้น

4.3.3.2 คอลัมน์แบบพัลส์แพค (Pulsed packed column)

เนื่องจากคอลัมน์แบบสเปรย์มีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของคอลัมน์แบบสเปรย์สามารถทำได้โดยการใส่แพกกิงในคอลัมน์แบบสเปรย์ ชนิดของแพกกิง ได้แก่ Rachig rings และ Beryl saddles นอกจากนี้ยังเพิ่มการพัลส์เข้าไปในคอลัมน์แบบแพคนี้ด้วย เรียกว่า คอลัมน์แบบพัลส์แพค ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวล เนื่องจากการกระจายตัวของแบบที่มีการพัลส์จะดีกว่าแบบที่ไม่มีการพัลส์ เฟลทที่มีรูจะถูกติดไว้ที่ส่วนบนเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่และการปรับแนวของแพกกิงเนื่องจากพัลส์

เครื่องกำเนิดพัลส์ (Pulsation generator) ต้องแข็งแรงและมีคุณภาพสูงเพียงพอที่จะทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ หน่วยกระตุ้นทางกลจะอยู่ในรูปเครื่องสูบลม (pump) ที่มีลูกสูบซึ่งจะยกขึ้นโดยตรงจากพื้นของคอลัมน์ หรือลูกเป่าลม หรือเบลโลว์ (bellow)

Thronton (ค.ศ. 1954) ได้เสนอว่า แพกกิงที่ทำจากโพลีเอทิลีนจะไม่เปียกในสารละลายน้ำ (Aqueous) ซึ่งจะมีความจุและอัตราการแลกเปลี่ยนมวลสูงกว่าแพกกิงที่ทำจากเซรามิก การพัลส์จะเป็นการลดขนาดหยดของเฟสกระจาย เพิ่ม holdup และเพิ่มพื้นที่ระหว่างผิวหน้า สำหรับการแลกเปลี่ยนมวล การพัลส์จะทำให้เกิดอิมัลชันเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการไหลต่อพื้นที่ (Throughput) สูงสุดลดลง

4.3.3.3 คอลัมน์แบบพัลส์ เพอร์ฟอเรตด์ เพลท (Pulsed perforated-plate column)

การพัลส์จะเป็นแบบมีการรวมตัวกันแล้วกระจายตัวใหม่ซ้ำไปซ้ำมา (Coalescence-redispersion recycle) ในของเหลวทั้งสองเฟส การเคลื่อนตัวของเฟสกระจายจากเพลทหนึ่ง ไปอีกเพลทหนึ่ง ซึ่งจะมีการรวมตัวขึ้นไปเหนือหรือต่ำกว่าของอีกเพลทหนึ่ง ขึ้นอยู่กับว่าของเหลวหนักหรือเบาเป็น เฟสกระจาย ชั้นที่ถูกรวมตัวนี้ไม่มีแรงเพียงพอที่จะทำให้ของเหลวผ่านแผ่นรูพรุนได้ เพราะจะมีแรงดึงระหว่างผิวหน้าจนกระทั่งจะมีการพัลส์ขึ้นไปหรือลงมาอีกซึ่งจะเป็นแรงดันให้เฟสกระจายผ่านแผ่นเจาะรูพรุนขึ้นไปในเพลทต่อไป ดังนั้นในการทำงานที่มีประสิทธิภาพของคอลัมน์แบบพัลส์ เพลททั้งสองจะไหลจากเพลทหนึ่งไปอีกเพลทหนึ่งโดยจะมีการกระจายตัวและรวมตัวกัน คอลัมน์แบบพัลส์ เพอร์ฟอเรตด์-เพลทแสดงดังรูปที่ 4.4

ข้อดีของคอลัมน์แบบพัลส์ เพอร์ฟอเรตด์-เพลท

รูปแบบ

(1) การทำงานมีการขีดหุ่นดี จะมีลักษณะของพัลส์ เปลี่ยนแปลงได้หลาย

เพียงเล็กน้อย

(2) สามารถใช้ได้กับกระบวนการที่มีความแตกต่างของความหนาแน่น

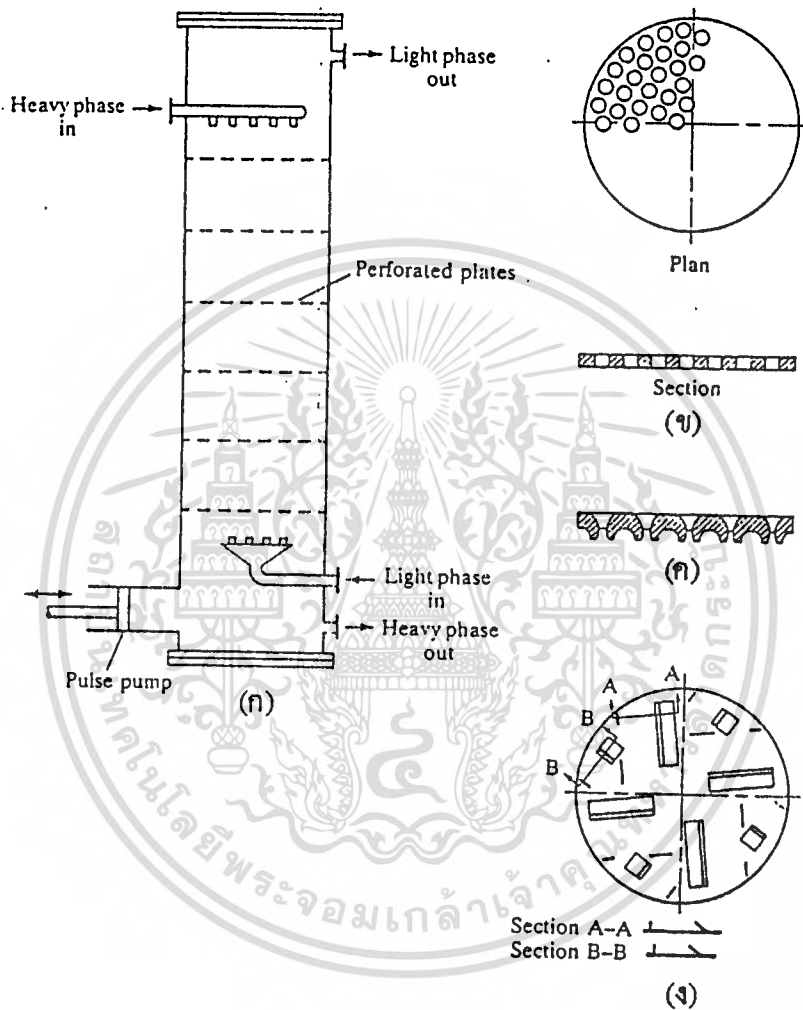
(3) สามารถขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ง่าย

ข้อเสียของคอลัมน์แบบพัลส์ เพอร์ฟอเรตด์-เพลท

(1) การพัลส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดอิมัลชัน

(2) มีข้อจำกัดต่อจำนวนชั้นคอนตามทฤษฎี ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่ม

พลังงานในการพัลส์ เมื่อเพิ่มขนาดของการพัลส์ ทำให้เกิดการผสมย้อนกลับ (backmixing) ในทางตรงข้ามคือ ถ้าความสูงของของเหลวถูกพัลส์ด้วยอัตราเร็วสูงขึ้น ความดันที่หน่วยการพัลส์จะน้อยกว่าความดันของกระบวนการ ในกรณีนี้จะทำให้เกิด cavitation อย่างไรก็ตามผลกระทบนี้จะไม่เกิดกับระบบพัลส์ด้วยอากาศ (air-pulsed)



รูปที่ 4.4 คอลัมน์แบบพัลส์ เพอร์โฟเรทด์-เพลท⁸

(ก) รูปแบบของคอลัมน์โดยทั่วไป

(ข) เพลทแบบแผ่นราบ (flat plate)

(ค) เพลทแบบมีรูยื่นออกมา (plate with protruded holes)

(ง) เพลทแบบหมุน (swirl plate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ชุดพัลส์คอลลัมน์ สำหรับติดตั้งแรอ์ทที่ใช้ในการทดลอง

ประกอบด้วยคอลลัมน์แบบเพอร์ฟอเรทด์-เพลท เครื่องสูบบแบบมิเตอร์ริง (Metering pump) และเครื่องช่วยกำเนิดพัลส์

4.4.1 คอลลัมน์

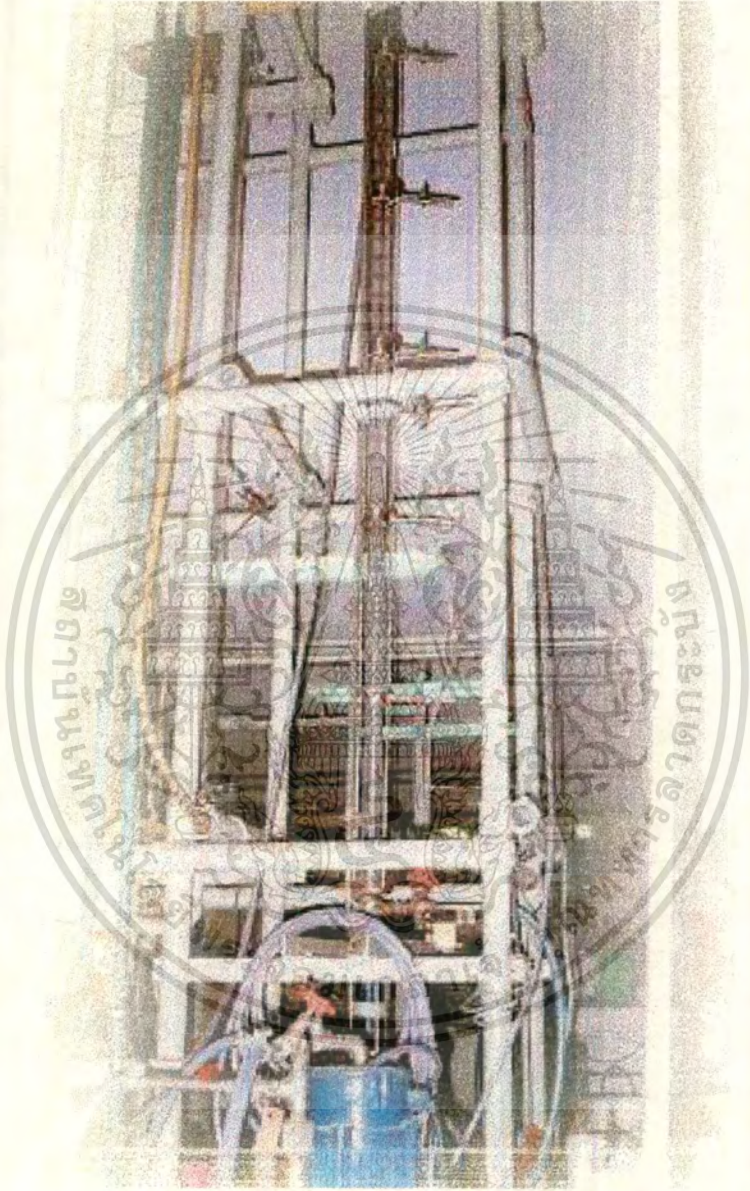
ทำด้วยท่อแก้วหนา 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 37 มิลลิเมตร ยาวท่อนละ 40 เซนติเมตร จำนวน 6 ท่อน วางต่อกันในแนวตั้ง ปิดท่อแก้วแต่ละท่อนให้ต่อกันด้วยหน้าแปลนโลหะสแตนเลสและลวดสามแหรง หน้าแปลนที่รองรับปลายท่อแก้วแต่ละด้านทำเป็นบ่า มีปะเกน PTFE (เทฟลอน) หนา 6 มิลลิเมตร เซาะร่องลึก 3 มิลลิเมตร รองรับปลายท่อแก้ว กับบ่าหน้าแปลน ส่วนปลายบนสุดและล่างสุดของคอลลัมน์ ใช้ท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 70 มิลลิเมตร ยาว 40 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร รวมความสูงของตัวคอลลัมน์และปลายบน-ล่าง ประมาณ 3.43 เมตร ภายในตัวคอลลัมน์ มีแผ่นโลหะสแตนเลส หนา 0.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร พื้นที่เจาะรู 30 % จำนวน 50 แผ่น แต่ละแผ่นวางเรียงห่างกันแผ่นละ 5 เซนติเมตร คอลลัมน์มีปริมาตรประมาณ 5 ลิตร คอลลัมน์แสดงผังรูปที่ 4.5 และ 4.6

4.4.2 เครื่องสูบบแบบมิเตอร์ริง (Metering pump)

ใช้สำหรับสูบบส่งของเหลวเข้าสู่คอลลัมน์ เครื่องสูบบที่ใช้เป็นชนิด 2 หัว (Double head) หัวหนึ่งของเครื่องสูบบจะถูกใช้สำหรับส่งของเหลวชั้นน้ำและอีกหัวหนึ่งของเครื่องสูบบจะใช้สำหรับส่งของเหลวชั้นน้ำมัน ดังรูปที่ 4.7

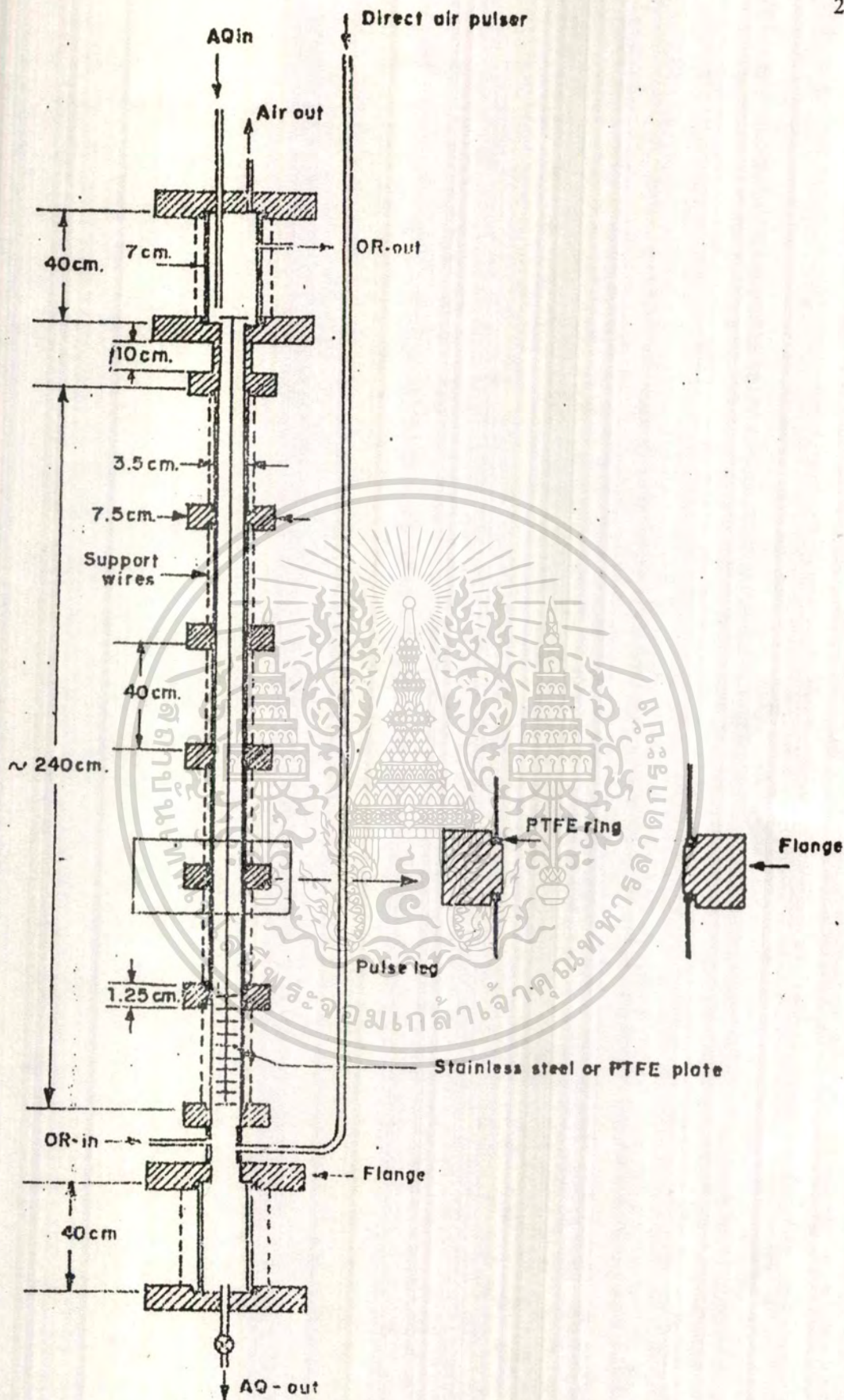
การเพิ่มลดอัตราการไหลของเครื่องสูบบมี 2 ส่วน คือ ระยะเวลา (Stroke length) ซึ่งกำหนดตั้งแต่ 0-100% และความถี่ในการเครื่องสูบบซึ่งมี 2 ความถี่คือ ความถี่ต่ำ (low speed) และความถี่สูง (high speed) การปรับอัตราการไหลของของเหลวทำได้โดยการตั้งค่าระยะเวลาที่อยู่ที่หัวหัวเครื่องสูบบ (pump head) ที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งในการสูบบ

จากการทดสอบ ระบบสูบบส่งสารละลายแรอ์ทไนเตรท และ 50% TBP ในน้ำมันก๊าดเข้าสู่คอลลัมน์เพื่อปรับเทียบอัตราการไหลของของเหลวทั้งสารละลายแรอ์ทไนเตรทและ 50%TBP ในน้ำมันก๊าด ได้ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของทั้งสารละลายแรอ์ทไนเตรทและ 50%TBP ในน้ำมันก๊าด กับความเร็วของเครื่องสูบบดังรูปที่ 4.8



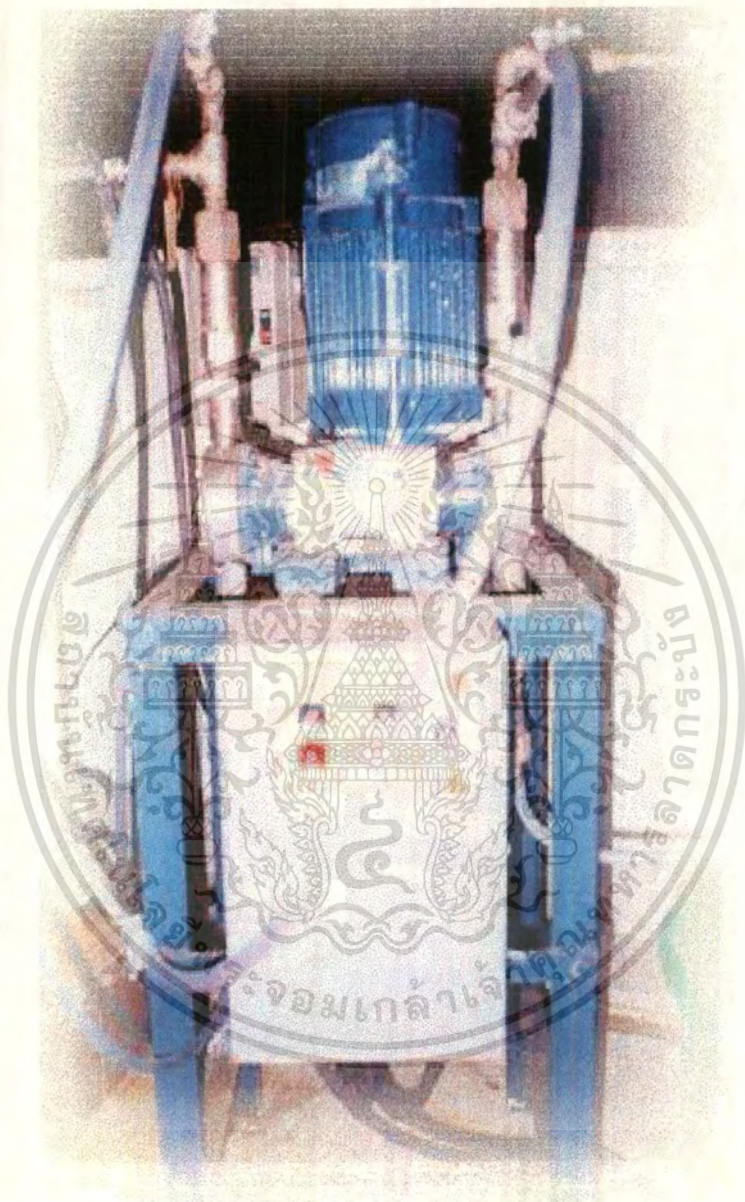
รูปที่ 4.5 หอสมุดแบบพัลส์ เพอร์ฟอเรท-เพลทที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



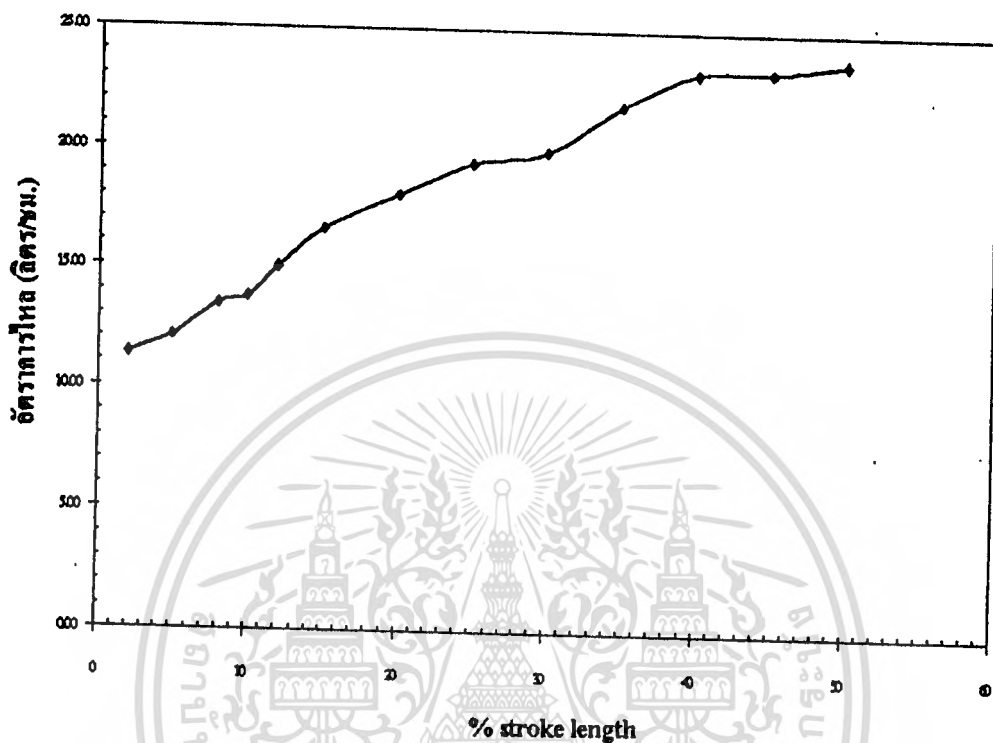
รูปที่ 4.6 โครงสร้างหอสกัดแบบฟลัด เพอร์ฟอเรต-เพลทที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งนี้ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและตัวเลขต่างๆ ดังที่ปรากฏในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เครื่องสูบแบบมิตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ของสารเข้าหอสกัดกับ
%stroke length ของเครื่องสูบบแบบมีเตอริงที่ความเร็วต่ำ

4.4.3 เครื่องกำเนิดพัลส์

เครื่องกำเนิดพัลส์เป็นแบบใช้ความดันจากแรงลมโดยตรง (Direct air pulser) เชื่อมต่อจากเครื่องกำเนิดลม (air compressor) เข้าตู้คอนแทก pulse leg ซึ่งทำด้วยหลอดแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 3.5 เมตร



บทที่ 5

การทดลอง

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) หอสกัดแบบพัลส์ เพอร์โฟเรตต์-เพลท (pulsed perforated-plate column)
- 2) ถังกวน (mixer)
- 3) ถังกวนแบบมีเครื่องทำความร้อน
- 4) ถังกรอง (filter tank)
- 5) เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 6) ไฮโดรมิเตอร์
- 7) เครื่องระเหย (evaporator)
- 8) เครื่องสูบลำ (pump)
- 9) ถังเก็บสาร
- 10) อุปกรณ์สำหรับห้องปฏิบัติการเคมี เช่น ปีกเกอร์ เทอร์โมมิเตอร์ ฉนวนมือยาง
- 11) เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุแบบอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

5.2 สารเคมี

- 1) แรเอิร์ทผสม (mixed Rare Earths หรือ Mixed RE)
- 2) กรดไนตริกเข้มข้น 68% (68% HNO₃) และกรดไนตริกเข้มข้น 5 N
- 3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นประมาณ 20% (20% NaOH)
- 4) สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂)

5) น้ำที่ขจัดไอออนแล้ว (Demineralized water)

6) 50% tri-n-butyl phosphate ในน้ำมันก๊าด (50% TBP in kerosene)

- 7) เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethylalcohol)
- 8) น้ำมันก๊าด

5.3 ขั้นตอนการทดลอง

5.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารป้อน มีดังนี้

1. นำ Mixed RE ล้างด้วยน้ำที่ขจัดไอออนแล้วในถังกวน ปิดเครื่องกวนและทิ้งให้ตะกอนนอนกัน จากนั้นดูดน้ำตอนบนทิ้งไปด้วยวิธีการกักน้ำ โขยล้างซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อล้างสิ่งเจือปนออก เช่น ถ้ามีโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไอออนจะถูกสกัดก่อน เป็นต้น ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดจะลดลง

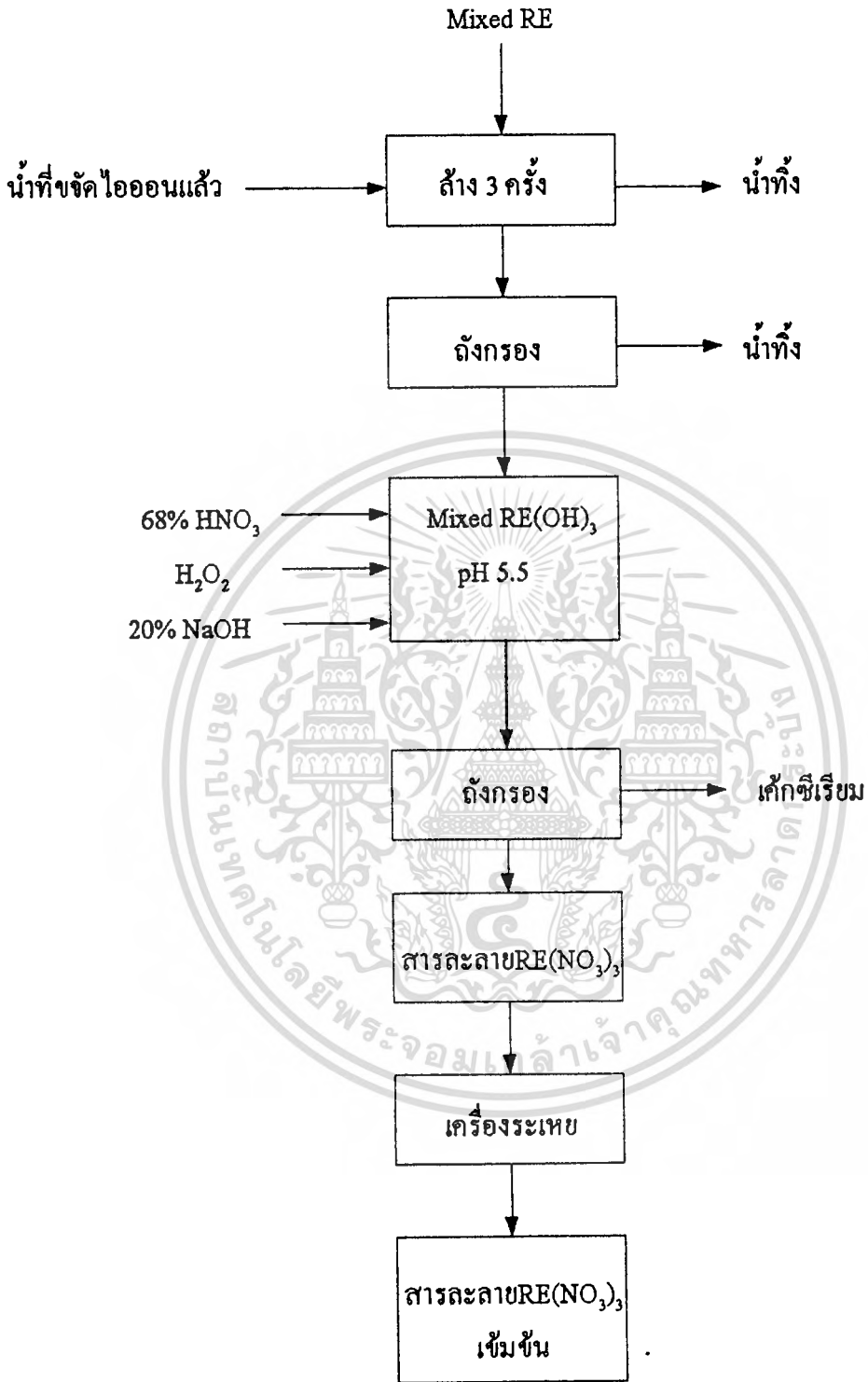
2. นำไปกรองด้วยถังกรอง จะได้ตะกอนของ Mixed RE หรือ $RE(OH)_3$

3. นำตะกอนที่กรองได้ใส่ในถังกวนแล้วเติมน้ำที่ขจัดไอออนแล้ว ค่อยๆเติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 68% จนกระทั่งได้สารละลายที่มี pH ประมาณ 5.5 แรเอิร์ทตัวอื่นๆ ยกเว้นซีเรียมที่มีเวเลนซ์สี่ (Ce IV) จะละลาย

4. ค่อยๆเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อออกซิไดส์ซีเรียมที่มีเวเลนซ์สาม (Ce III) ให้เป็นซีเรียมที่มีเวเลนซ์สี่ (Ce IV) ซึ่งจะทำให้ pH ของสารละลายลดลง จึงเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นประมาณ 20% จนกระทั่งได้สารละลายที่มี pH ประมาณ 5.5 เท่าเดิม ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน

5. กรองด้วยถังกรอง จะได้ कैซีเรียมและสารละลายแรเอิร์ทไนเตรต หรือ $RE(NO_3)_3$

6. นำสารละลายแรเอิร์ทไนเตรตเข้าเครื่องระเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้น จะได้สารละลายสารป้อนที่ความเข้มข้นที่ต้องการ ดังแผนภูมิสาขาวันที่ 5.1



แผนภูมิสายงานที่ 5.1 ขั้นตอนการเตรียมสารป้อน

5.3.2 การสกัด

ขั้นตอนการสกัดแยกธาตุหายากเป็นขั้นตอนการนำสารละลายแรมเอิร์ท ไนเตรตและตัวทำละลาย 50% TBP ป้อนเข้าหอสกัดแบบพัลส์ เพอร์ฟอร์เมต-เพลท โดยให้ของเหลวทั้งสองชนิดไหลสวนทางกัน โดยแบ่งการสกัดออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

5.3.2.1 ใช้สารละลาย 50%TBP ในน้ำมันก๊าดเป็นเฟสต่อเนื่อง ดังรูป 5.2 มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

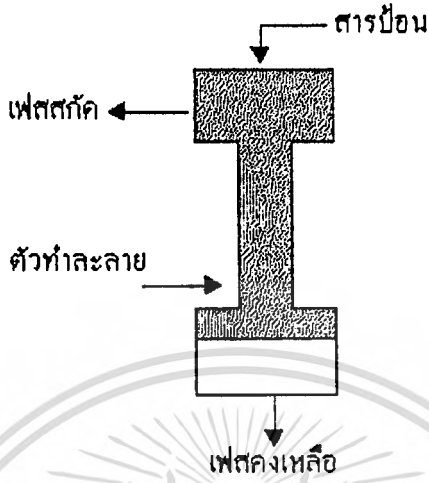
1. ล้างคอลัมน์ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์แล้วปล่อยให้คอลัมน์แห้ง
2. วัดอัตราการไหลของตัวทำละลาย 50%TBP ในน้ำมันก๊าดและอัตราการไหลของสารละลายแรมเอิร์ทไนเตรต
3. สูบตัวทำละลาย 50%TBP ในน้ำมันก๊าดด้วยเครื่องสูบเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์จนเกือบเต็ม
4. สูบสารละลายแรมเอิร์ทไนเตรตด้วยเครื่องสูบเข้าทางด้านบนของคอลัมน์ สารละลายทั้งสองจะไหลสวนทางกันและเกิดการถ่ายเทมวลขึ้น
5. ปรับอินเตอร์เฟสระหว่างชั้นกระจายกับชั้นต่อเนื่องให้คงที่ ซึ่งอยู่ด้านล่างคอลัมน์
6. เก็บสารละลายตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (นาทีที่ 0) ตามจุดเก็บและตัวอย่างหลังจากนั้นเก็บสารละลายตัวอย่างตามจุดเก็บต่าง ๆ ทุก 30 นาที
7. บันทึกผลการทดลอง

5.3.2.2 ใช้สารละลายแรมเอิร์ทไนเตรตเป็นเฟสต่อเนื่อง ดังรูป 5.3 มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

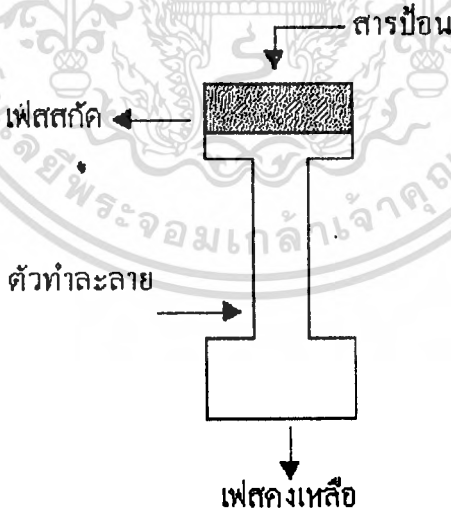
1. ล้างคอลัมน์ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์แล้วปล่อยให้คอลัมน์แห้ง
2. วัดอัตราการไหลของตัวทำละลาย 50%TBP ในน้ำมันก๊าดและอัตราการไหลของสารละลายแรมเอิร์ทไนเตรต
3. สูบสารละลายแรมเอิร์ทไนเตรตเข้าทางด้านบนคอลัมน์จนเกือบเต็มคอลัมน์
4. สูบตัวทำละลาย 50%TBP ในน้ำมันก๊าดด้วยเครื่องสูบเข้าทางด้านล่างคอลัมน์ สารละลายทั้งสองจะไหลสวนทางกัน และเกิดการถ่ายเทมวลขึ้น
5. ปรับอินเตอร์เฟสระหว่างชั้นกระจายกับชั้นต่อเนื่องให้คงที่ ซึ่งอยู่ด้านบนคอลัมน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง 6. เก็บสารละลายตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (นาทีที่ 0) ตามจุดเก็บและตัวอย่าง
ไม่ว่าหลังจากนั้นเก็บสารละลายตัวอย่างตามจุดเก็บต่าง ๆ ทุก 30 นาที

7. บันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 5.2 การสกัดเมื่อสารละลาย 50% TBP ในน้ำมันก๊าด เป็นเฟตต่อเนื่อง



รูปที่ 5.3 การสกัดเมื่อสารละลายแเรเอิร์ทไนเตรด เป็นเฟตต่อเนื่อง

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสกัดแร่ธาตุหายากจากแรมโฆนาไซด์ได้ใช้ 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าด (50%TBP in kerosene) เป็นตัวสกัดแร่เอิร์ทผสมที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแรมโฆนาไซด์ โดยละลายให้อยู่ในรูปของสารละลายไนเตรตและระเหยให้แร่เอิร์ทผสมทั้งหมด (total rare earth) ในสารละลายให้มีความเข้มข้นมากขึ้น แล้วนำไปเข้ากระบวนการสกัดแบบสวนทางกันโดยมีสถานะการสกัดและสารป้อนดังตารางที่ ก-1 และตารางที่ ก-2 ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 6.1 ความเข้มข้นของแร่เอิร์ทในวัฏภาคส่วนที่สกัดได้ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหอสกัด โดย
ตัวทำละลาย 50% TBP ในน้ำมันก๊าดเป็นเฟสต่อเนื่อง (การสกัดครั้งที่ 1)

นาที่ที่	ตำแหน่ง บนหอสกัด	ความเข้มข้นของชั้นน้ำมัน (มก./มต.)				
		Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃
0	ก้นหอ	3.403	186.500	12.620	35.550	4.373
	1	1.610	27.640	5.058	17.940	2.986
	2	2.310	25.320	6.242	23.240	4.256
	3	2.482	24.960	6.338	23.840	4.494
	4	2.890	23.620	3.766	26.120	5.214
	5	3.320	22.220	6.866	26.380	5.660
	ยอดหอ	3.430	21.920	7.064	27.780	6.168
30	ก้นหอ	6.200	204.400	22.900	73.900	10.290
	1	3.006	26.160	27.154	27.740	5.576
	2	3.874	18.660	7.590	31.940	6.832
	3	3.870	15.520	6.948	28.640	6.648
	4	2.890	23.620	6.766	26.120	5.214
	5	2.314	12.480	6.434	26.480	6.828
	ยอดหอ	5.574	17.160	8.462	35.040	9.002
60	ก้นหอ	7.610	212.600	26.340	88.000	12.980
	1	3.416	24.780	7.462	29.580	6.156
	2	4.186	16.780	4.500	31.060	7.326
	3	4.392	15.520	7.326	30.480	7.502
	4	5.134	14.840	8.014	33.660	8.614
	5	5.902	14.120	4.193	33.720	9.220
	ยอดหอ	6.080	13.120	8.072	34.000	9.534
90	1	3.778	23.120	7.516	30.140	6.762
	2	4.890	16.120	7.890	33.000	8.324
	3	5.330	15.540	7.952	33.300	8.698
	4	5.762	13.940	8.228	14.480	9.420
	5	6.626	13.640	8.430	35.300	10.160
	ยอดหอ	6.678	13.140	8.492	35.780	10.240

ตารางที่ 6.1 ความเข้มข้นของแรเอิร์ทในวัสดุภาคส่วนที่สกัดได้ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหอสกัด โดย
ตัวทำละลาย 50% TBP ในน้ำมันก๊าดเป็นเฟสต่อเนื่อง (การสกัดครั้งที่ 1) (ต่อ)

นาที่ที่	ตำแหน่งบนหอสกัด	ความเข้มข้นของชั้นน้ำมัน (มก./มล.)				
		Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Pr ₂ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃
120	ก้นหอ	8.690	228.300	29.160	97.500	14.980
	1	3.444	19.820	7.022	28.320	6.334
	2	4.046	16.160	7.110	28.340	7.092
	3	5.786	17.700	7.906	32.760	8.176
	4	5.360	15.240	8.170	34.340	9.018
	5	5.856	13.540	7.830	32.780	9.186
	ยอดหอ	6.512	13.260	8.374	35.280	10.300
150	ก้นหอ	8.690	228.900	29.160	97.500	14.980
	1	2.008	15.880	4.278	17.240	3.712
	2	3.084	17.220	6.048	24.440	5.574
	3	4.054	17.720	7.222	49.680	7.138
	4	4.632	16.360	7.790	31.960	8.032
	5	3.334	15.580	7.882	32.460	8.600
	ยอดหอ	5.820	14.780	8.216	34.060	9.458

ตารางที่ 6.2 ความเข้มข้นของแร่เอิร์ทในวัฏภาคส่วนที่ไม่ถูกสกัดได้ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหลอกสกัด โดยสารละลายแร่เอิร์ทในเทอร์ตเป็นเฟสต่อเนื่อง (การสกัดครั้งที่ 2)

นาที่ที่	ตำแหน่งบนหลอกสกัด	ความเข้มข้นของชั้นน้ำ (มก./มล.)				
		Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃
0	ก้นหล	7.740	210.600	25.280	82.600	12.540
	1	7.770	207.100	26.290	87.400	13.520
	2	8.710	204.900	27.980	95.100	15.440
	3	10.120	211.500	30.560	105.800	17.960
	4	11.120	218.800	32.450	113.500	19.580
	5	12.610	219.100	32.960	114.900	20.770
	ยอดหล	6.676	11.060	7.588	31.180	9.754
30	ก้นหล	7.500	215.000	26.830	89.000	13.120
	1	9.230	225.500	31.390	105.800	16.830
	2	9.620	209.300	30.770	106.900	17.690
	3	11.030	212.800	32.340	113.300	19.710
	4	11.440	213.200	32.530	115.100	20.200
	5	12.090	202.800	30.900	108.300	19.860
	ยอดหล	7.132	8.782	7.126	29.460	10.060
60	ก้นหล	8.210	221.400	28.860	97.000	14.520
	1	8.040	219.300	29.560	99.900	15.140
	2	8.820	207.600	29.850	103.300	16.510
	3	10.760	219.700	33.030	115.900	19.640
	4	11.690	219.100	33.630	118.300	20.910
	5	12.830	219.500	33.370	117.100	21.190
	ยอดหล	7.910	9.926	7.918	32.700	11.140
90	ก้นหล	8.160	224.700	29.640	99.300	15.050
	1	7.470	214.500	28.100	94.500	14.010
	2	7.990	196.400	27.690	95.600	15.070
	3	10.650	221.300	33.090	116.200	19.520
	4	11.050	217.400	33.080	117.200	20.130
	5	12.920	225.500	34.250	120.000	21.500
	ยอดหล	6.276	15.140	8.360	34.200	9.516

ตารางที่ 6.3 ความเข้มข้นของแร่เอิร์ทในวัตถุดิบที่ไม่ถูกสกัดได้ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหอสกัด โดยสารละลายแร่เอิร์ทในเทรตเป็นเฟสต่อเนื่อง (การสกัดครั้งที่ 3)

นาที่ที่	ตำแหน่งบนหอสกัด	ความเข้มข้นของจันทน์ (มก./มต.)				
		Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃
0	กันทอ	6.310	271.700	31.340	107.900	13.360
	1	5.610	292.400	32.780	112.200	13.010
	2	7.800	284.800	34.420	113.600	15.370
	3	11.800	214.400	30.980	90.500	17.190
	4	6.750	296.100	33.890	119.000	14.330
	5	4.100	205.300	23.250	82.500	9.430
	ยอดทอ	7.132	9.802	7.042	29.380	8.296
30	กันทอ	4.170	295.800	30.760	105.200	10.770
	1	3.960	270.100	29.180	99.800	10.400
	2	7.900	97.600	35.850	116.700	15.700
	3	5.770	297.200	33.950	17.400	13.490
	4	6.370	299.100	34.070	119.200	14.280
	5	6.860	298.100	34.210	119.200	14.590
	ยอดทอ	6.422	9.464	6.670	27.920	7.656
60	กันทอ	5.140	276.300	30.120	99.000	11.250
	1	5.710	275.200	30.980	103.400	12.100
	2	8.660	275.500	34.170	109.900	15.710
	3	5.960	296.600	33.980	117.500	13.780
	4	6.250	280.200	32.510	112.300	13.610
	5	6.120	275.400	31.510	110.300	13.180
	ยอดทอ	6.362	9.596	6.722	28.180	7.678

ตารางที่ 6.3 ความเข้มข้นของแร่เอิร์ทในวัตถุดิบส่วนที่ไม่ถูกสกัดได้ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหอสกัด โดยสารละลายแร่เอิร์ทในกรดเป็นเฟสต่อเนื่อง (การสกัดครั้งที่ 3) (ต่อ)

นาที่ที่	ตำแหน่งบนหอสกัด	ความเข้มข้นของชั้นน้ำ (มก./มก.)				
		Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Pr ₂ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃
90	ก้นหอ	5.270	261.800	28.410	94.300	11.100
	1	7.840	260.100	32.280	100.900	14.340
	2	5.500	238.300	27.630	94.100	11.250
	3	4.510	185.900	22.220	74.500	9.050
	4	7.890	282.800	33.680	116.000	15.330
	5	7.470	241.300	29.500	100.800	13.710
	ยอดหอ	7.128	10.480	7.384	31.000	8.506
120	ก้นหอ	5.240	265.700	29.210	97.000	11.240
	1	5.920	273.100	31.370	105.000	12.530
	2	5.740	243.000	28.840	95.900	11.830
	3	6.130	249.600	29.780	99.400	12.330
	4	7.730	280.200	33.440	113.100	14.900
	5	7.360	273.700	32.540	111.000	14.130
	ยอดหอ	5.452	7.962	5.610	23.520	6.476

วิจารณ์ผลการทดลอง

1. จากการสกัดครั้งที่ 1 ที่มีเฟสน้ำมันเป็นเฟสต่อเนื่อง และมีอัตราส่วนการไหลของสารละลายน้ำต่อสารละลายอินทรีย์เป็น 7.2/7.0 เมื่อนำความเข้มข้นของแรเอิร์ทแต่ละตัวที่สกัดได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาในการสกัด จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรเอิร์ทกับเวลา ดังรูปที่ 6.1 จากกราฟพบว่าความเข้มข้นของแรเอิร์ทที่ถูกสกัดไปจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาและในช่วงเวลาจากนาที่ที่ 90 ถึงนาที่ที่ 120 พบว่า ความเข้มข้นค่อนข้างคงที่ จึงถือว่าช่วงเวลานี้เป็นสภาวะคงตัวซึ่งตัวทำละลายอิ่มตัวและไม่ดึงแรเอิร์ทเข้าไปในตัวมันอีก

2. จากการสกัดครั้งที่ 2 ที่มีเฟสน้ำเป็นเฟสต่อเนื่องและมีอัตราส่วนการไหลของสารละลายน้ำต่อสารละลายอินทรีย์เป็น 7.7/7.1 เมื่อนำความเข้มข้นของแรเอิร์ทแต่ละตัวที่สกัดได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาในการสกัด จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรเอิร์ทกับเวลา ดังรูปที่ 6.2 จากกราฟพบว่าความเข้มข้นของแรเอิร์ทที่ถูกสกัดไปจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาเช่นเดียวกับรูปที่ 6.1 แต่เนื่องจากสารป้อนมีไม่พอทำให้สกัดได้ถึงนาที่ที่ 90 เท่านั้น ดังนั้นจึงสมมติให้นาที่ที่ 90 เป็นสภาวะคงตัว

3. จากการสกัดครั้งที่ 3 ใช้เฟสน้ำเป็นเฟสต่อเนื่องเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 แต่เปลี่ยนอัตราส่วนการไหลของสารละลายน้ำต่อสารละลายอินทรีย์เป็น 5.325/2.887 แทน เมื่อนำความเข้มข้นของแรเอิร์ทแต่ละตัวที่สกัดได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาในการสกัด จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรเอิร์ทกับเวลา ดังรูปที่ 6.3 จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายน้ำสูงกว่าสารละลายอินทรีย์ประมาณ 2 เท่า ความเข้มข้นของแรเอิร์ทที่ถูกสกัดไปจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลา แต่ช่วงเวลาจากนาที่ที่ 90 ถึงนาที่ที่ 120 ความเข้มข้นของแรเอิร์ทที่ถูกสกัดไปลดลง เป็นไปได้ว่าภายในเวลา 120 นาที การสกัดอาจยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัวแต่ก็สามารถสกัดแรเอิร์ทไปได้มาก และเนื่องจากสารป้อนไม่เพียงพอ จึงสมมติให้นาที่ที่ 120 เป็นเวลาที่เกิดสภาวะคงตัว

4. จากผลการสกัด เมื่อนำความเข้มข้นของแรเอิร์ทที่สกัดได้ ณ สภาวะคงตัว มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับความสูงของหอสกัด จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรเอิร์ทที่สกัดได้กับความสูงของหอสกัด ณ สภาวะคงตัว ดังรูปที่ 6.4 6.5 และ 6.6 สำหรับการสกัดครั้งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

จากรูปที่ 6.4 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของแรเอิร์ทออกไซด์แต่ละตัว พบว่าความเข้มข้นของนีโอไดเนียม (Nd) ซาแมเรียม (Sm) และอิตเทรียม (Y) จะเพิ่มขึ้นตามความสูงของหอสกัด ส่วนแลนทานัม (La) ความเข้มข้นจะลดลงตามความสูงของหอสกัด แสดงว่าที่บริเวณ

ด้านล่างของหอสกัดจะมีปริมาณแลนทานัมมาก และเมื่อความสูงของหอสกัดเพิ่มขึ้น แลนทานัมไม่สามารถเข้าไปในตัวทำละลายได้

5. เมื่อนำสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K_d) ที่คำนวณได้ของแเรเอิร์ทแต่ละตัวที่เวลาต่างๆ ในการสกัดครั้งที่ 1 2 และ 3 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาในการสกัด จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K_d) ของแเรเอิร์ทกับเวลา ดังรูปที่ 6.7 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายเป็นตัวอัตราส่วนของความเข้มข้นของแเรเอิร์ทออกไซด์ในส่วนที่สกัดได้กับความเข้มข้นของแเรเอิร์ทออกไซด์ในส่วนที่ไม่ถูกสกัด หากค่าสัมประสิทธิ์การกระจายมีค่าสูงแสดงว่าสามารถสกัดแเรเอิร์ทได้ดี โดยปกติค่าสัมประสิทธิ์การกระจายจะเป็นค่าคงที่ขึ้นกับสถานะของการสกัดต่างๆกัน ถัดจากการกระจายตัวที่สถานะสมดุล แต่ในที่นี้ต้องการเปรียบเทียบแนวโน้มการกระจายตัวของแเรเอิร์ทออกไซด์ที่เข้าไปในส่วนสกัดกับส่วนที่คงเหลือว่าเป็นอย่างไร ณ เวลาต่าง ๆ ในการสกัด

จากการศึกษาของวีฟเวอร์และคณะ (Weaver, 1953) พบว่าที่สถานะสมดุลของการกระจายตัวของแเรเอิร์ทในเฟสระหว่างชั้นสารละลายกรดไนตริก (aqueous phase) กับชั้นสารละลายอินทรีย์หรือชั้นน้ำมัน (organic phase) ของไตรบิวทิลฟอสเฟต แเรเอิร์ทสามารถกระจายตัวในน้ำมันได้ดีตามเลขอะตอมของแเรเอิร์ทที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ดังตารางที่ 6.4 แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของแเรเอิร์ทมีค่าสูงขึ้นตามเลขอะตอมที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ แเรเอิร์ทที่มีเลขอะตอมสูง เช่น นีโอดีเมียม เลขอะตอม 60 จะถูกสกัดเข้าอยู่ในชั้นน้ำมันได้ดีกว่า แเรเอิร์ทที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า เช่น แลนทานัม เลขอะตอม 57 ดังนั้นในการสกัดจึงสามารถสกัดแยกแเรเอิร์ทออกเป็นกลุ่ม ๆ ได้

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของแเรเอิร์ทออกไซด์แต่ละตัวที่สถานะคงตัวของการสกัดมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 6.10 พบว่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของแเรเอิร์ทแต่ละตัวในการสกัดครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าไม่แตกต่างกันมาก ส่วนการสกัดครั้งที่ 3 สัมประสิทธิ์การกระจายตัวของแเรเอิร์ทแต่ละตัวมีค่าน้อยกว่าการสกัด 2 ครั้งแรกมาก แสดงว่าการสกัดครั้งที่ 3 สกัดแเรเอิร์ทได้ไม่ดีเท่าการสกัด 2 ครั้งแรก

6. เมื่อนำค่าการเลือก (selectivity) ของแเรเอิร์ทแต่ละตัวที่คำนวณได้ในการสกัดมาสร้างกราฟโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของแลนทานัมและเพรซีโอดีเมียมเป็นค่าอ้างอิง จะได้กราฟดังรูปที่ 6.11 และ 6.12 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่าการเลือกของแเรเอิร์ทต่าง ๆ พบว่าธาตุกลุ่มอิตเทรียม นีโอดีเมียม ซาแมเรียมสามารถแยกจากกลุ่มแลนทานัมและเพรซีโอดีเมียมได้

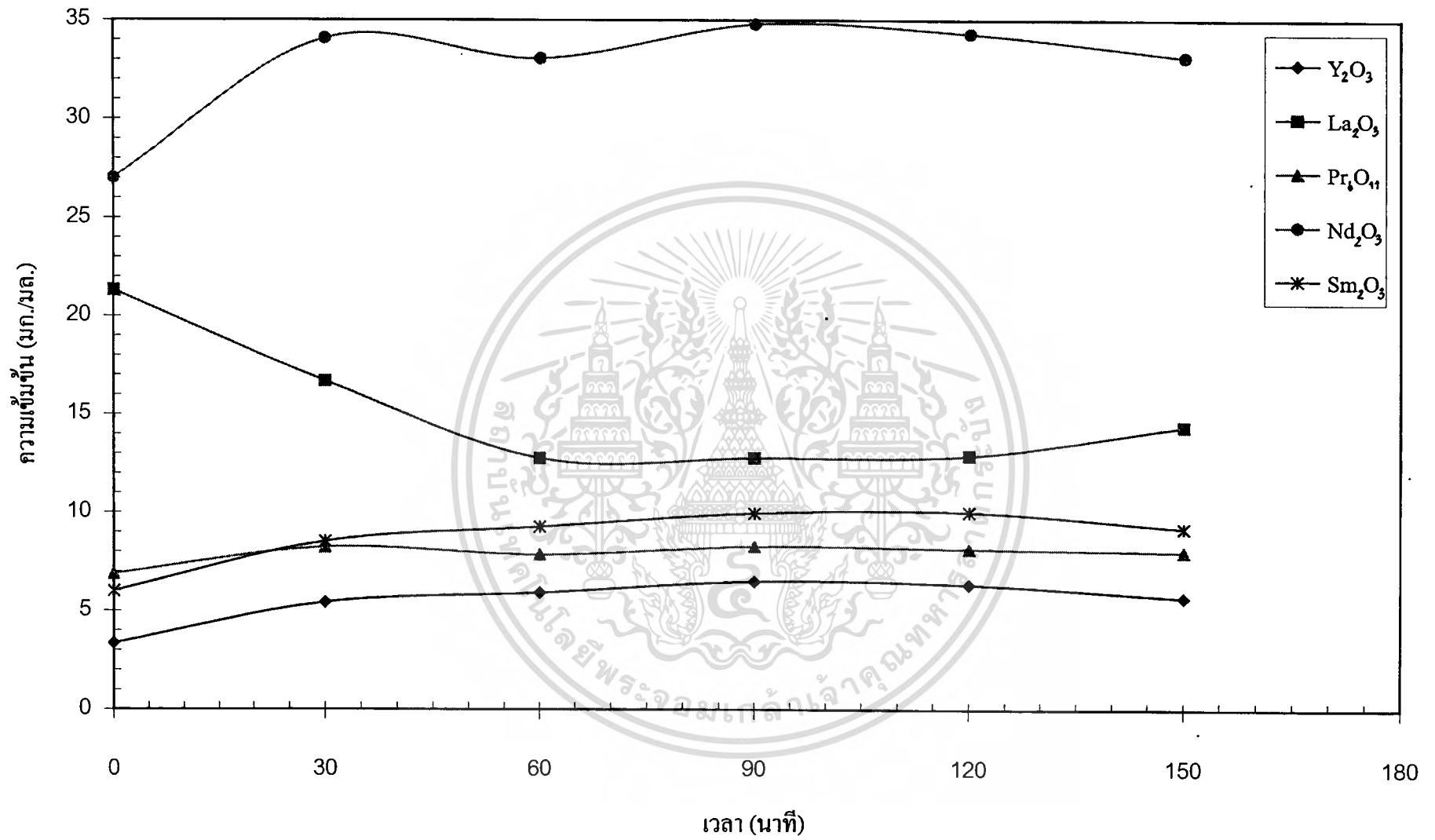
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นงานการใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติค่าการเลือกจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการสกัดที่สำคัญ ได้แก่ ความเข้มข้นของแเรเอิร์ทในสารละลายที่ต้องการสกัด ความเข้มข้นของตัวทำละลายคือ ไตรบิวทิลฟอสเฟต (TBP) และความเป็นกรด จากรูปที่ 6.11 และ 6.12 พบว่าค่าการเลือกของการสกัดครั้งที่ 3 มีค่าสูงกว่าการสกัด 2 ครั้งแรกแม้ว่าสภาวะการสกัดครั้งที่ 3 ไม่เหมาะสม ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าสารป้อนในการสกัดครั้งที่ 3 มีความเข้มข้นสูงกว่าการสกัด 2 ครั้งแรก

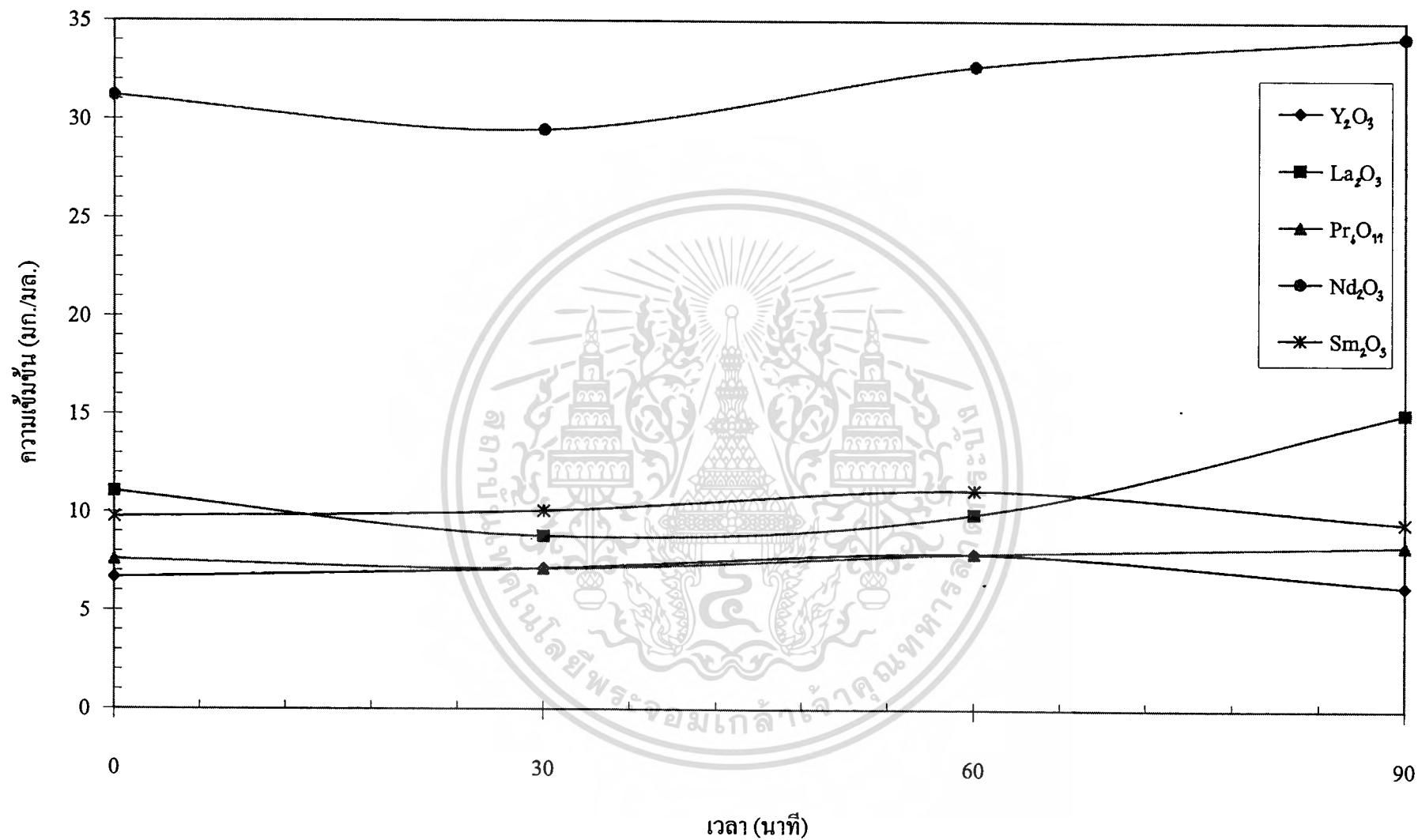
เมื่อพิจารณาค่าการเลือกโดยอ้างอิงแลนทานัมและเพอร์ซีโอคิเมียมของแเรเอิร์ทแต่ละตัวพบว่า ค่าการเลือกของอิตเทรียมมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอิตเทรียมจัดอยู่ในแเรเอิร์ทกลุ่มหนัก ทำให้สามารถแยกออกจากแเรเอิร์ทกลุ่มเบาได้ดี

7. จากการทดลองสกัดทั้ง 3 ครั้ง เมื่อนำประสิทธิภาพการสกัดแเรเอิร์ทแต่ละตัวในการสกัดที่สภาวะคงตัวมาสร้างกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 6.13 ซึ่งเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการสกัดแเรเอิร์ทแต่ละตัวในการสกัดที่สภาวะคงตัวของการสกัดครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าไม่แตกต่างกันและมีค่าสูงกว่าการสกัดครั้งที่ 3 มาก

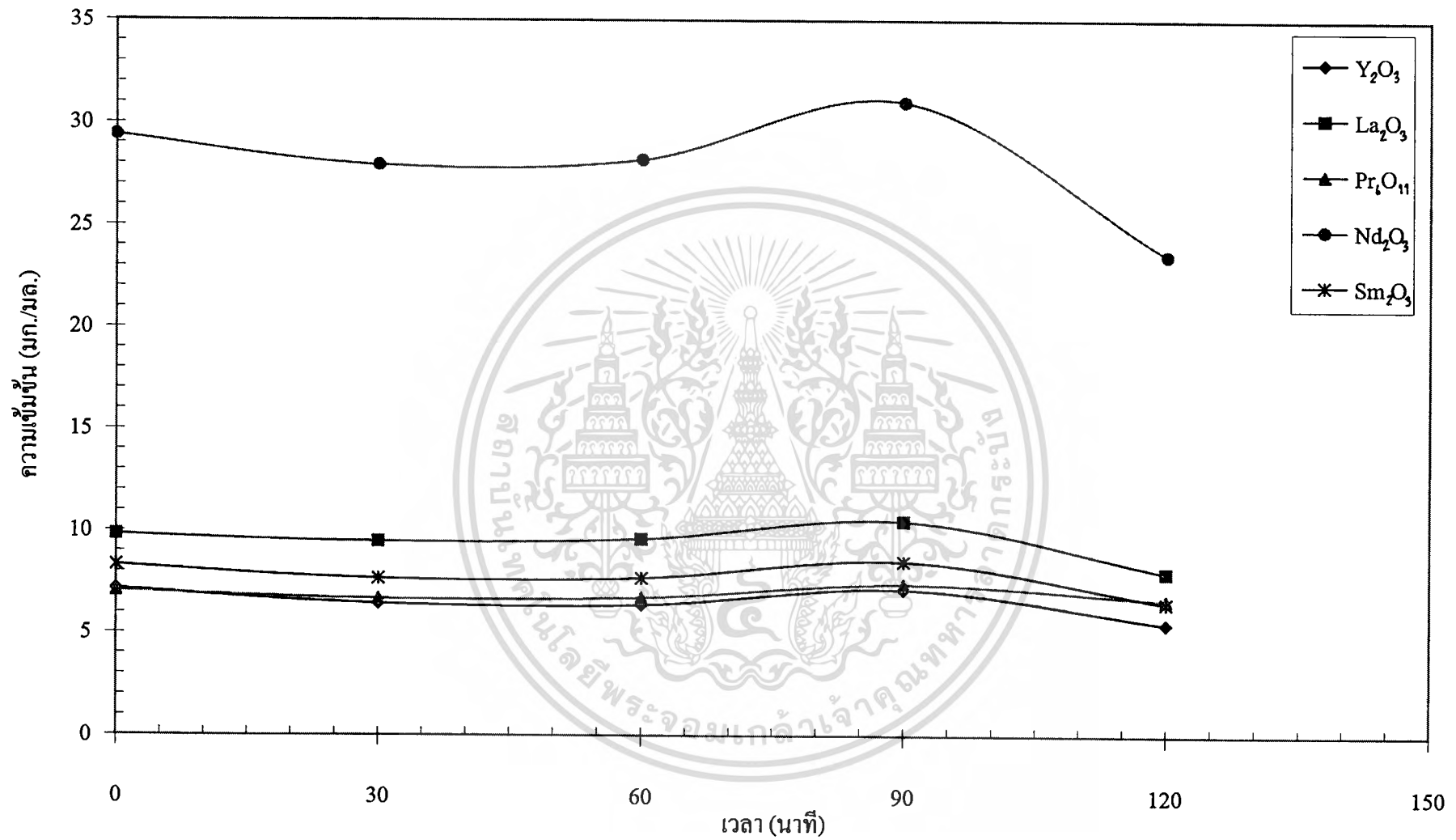
8. จากการทดลองสกัด เมื่อพิจารณาสมมูลมวลสารของแเรเอิร์ทในแต่ละการสกัดที่สภาวะคงตัวจะได้ดังตารางที่ 6.5 ส่วนปริมาณของแเรเอิร์ทใดๆที่ได้จากการทดลองสกัดแสดงดังตารางที่ 6.6



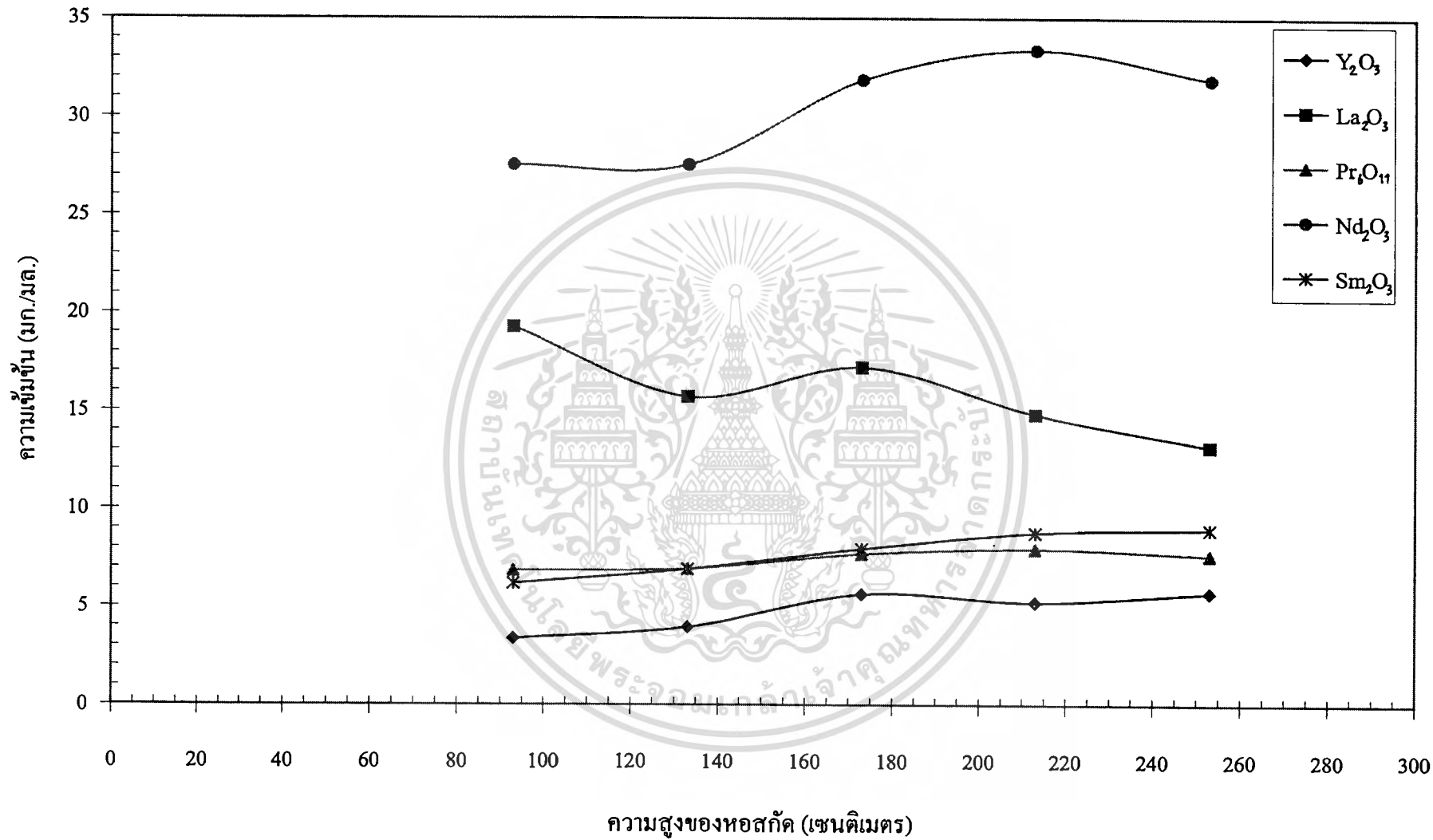
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรฮีรัทที่สกัดได้กับเวลาในการสกัดครั้งที่ 1



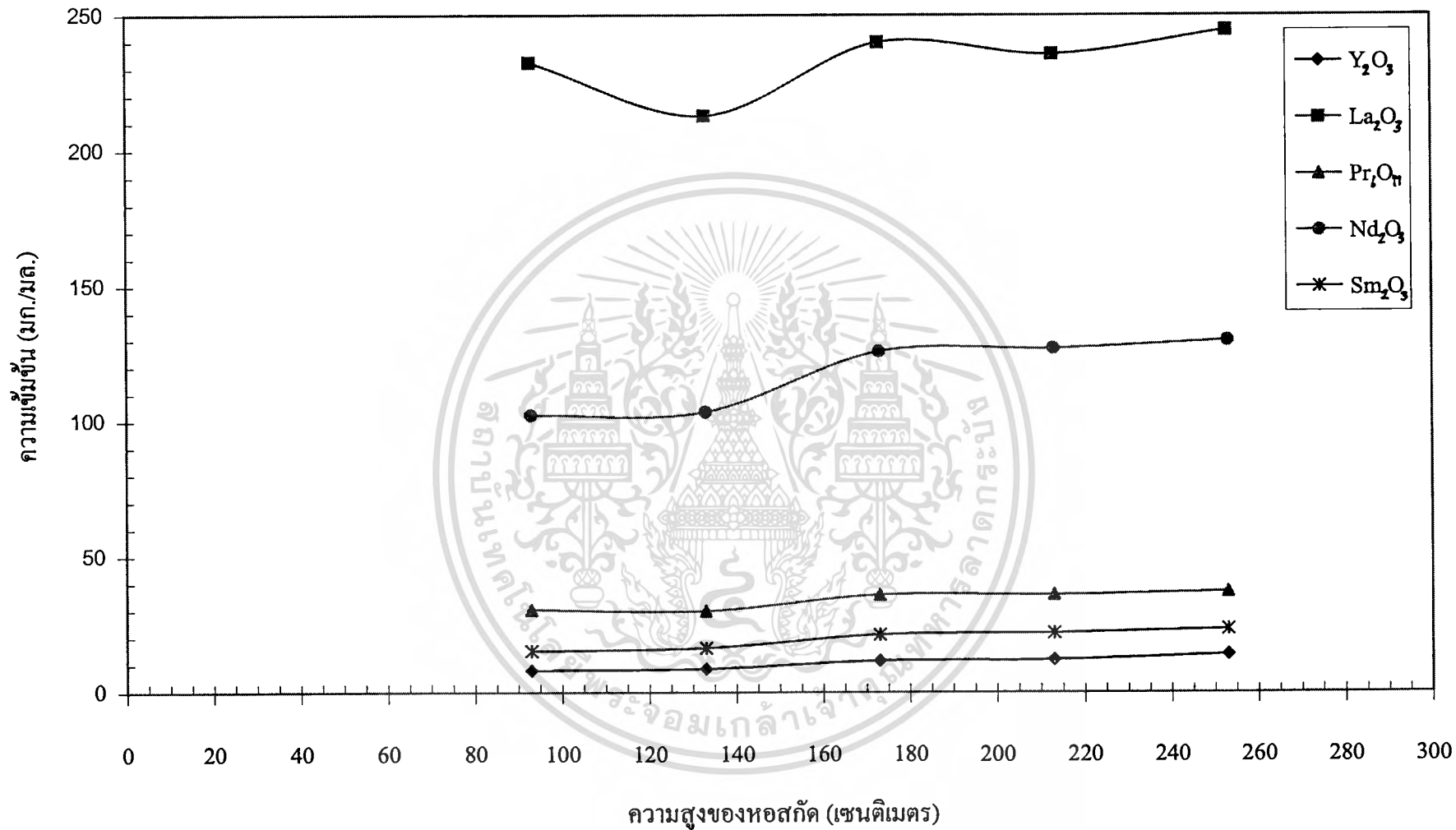
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรเอิร์ทที่สกัดได้กับเวลาในการสกัดครั้งที่ 2



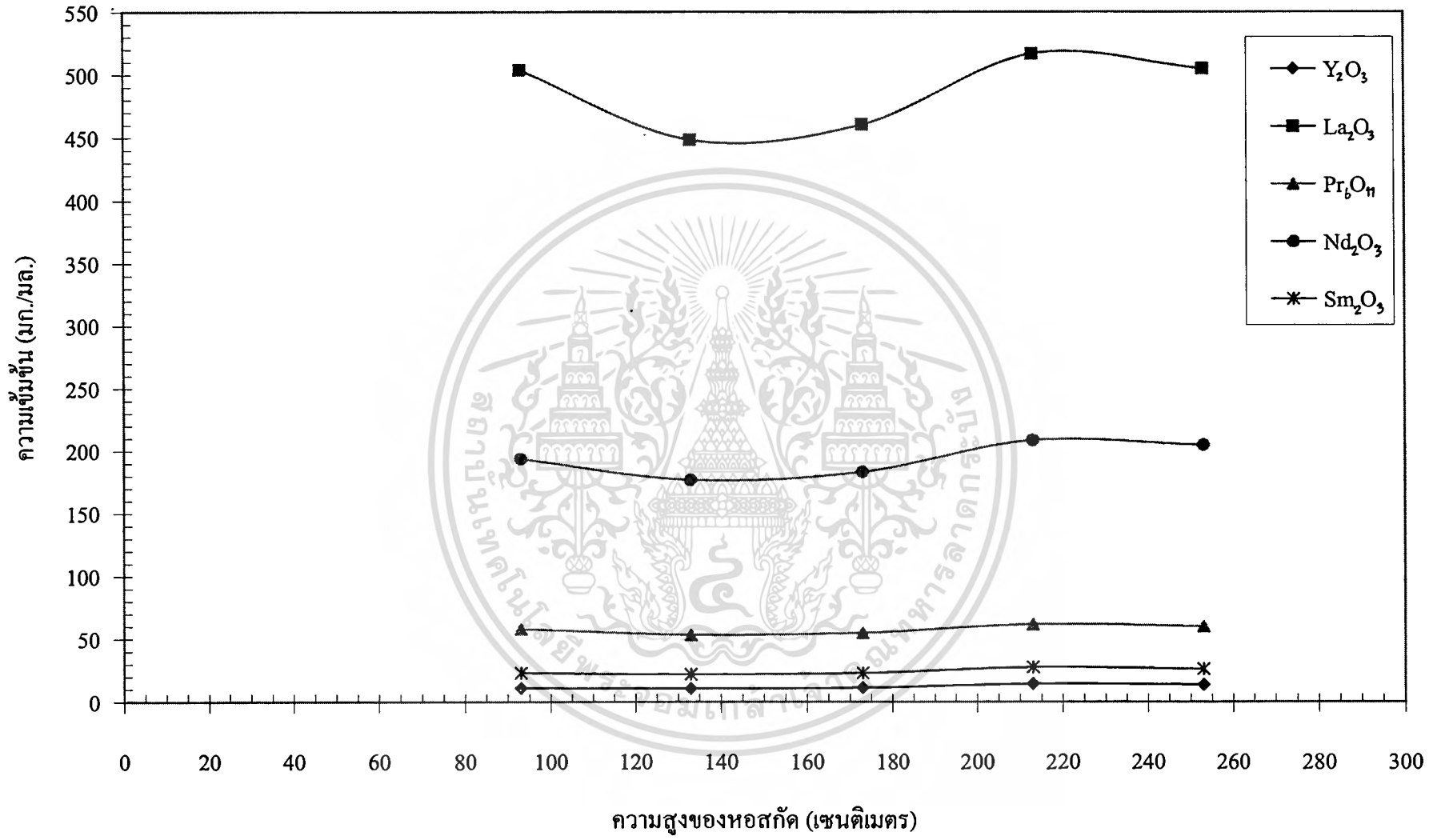
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรหายที่สกัดได้กับเวลาในการสกัดครั้งที่ 3



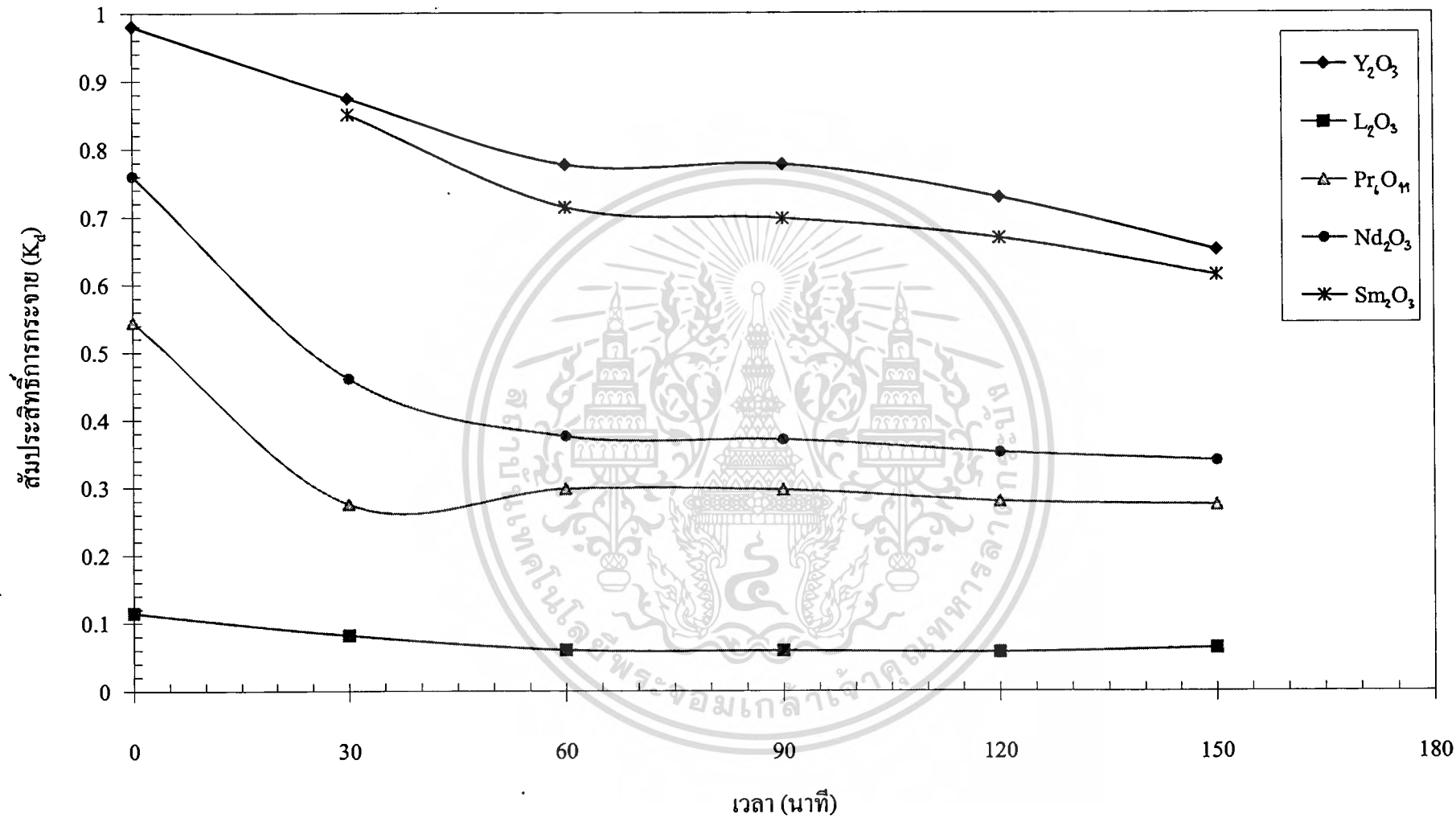
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแรเอิร์ทกับความสูงของหอสกัดในการสกัดครั้งที่ 1



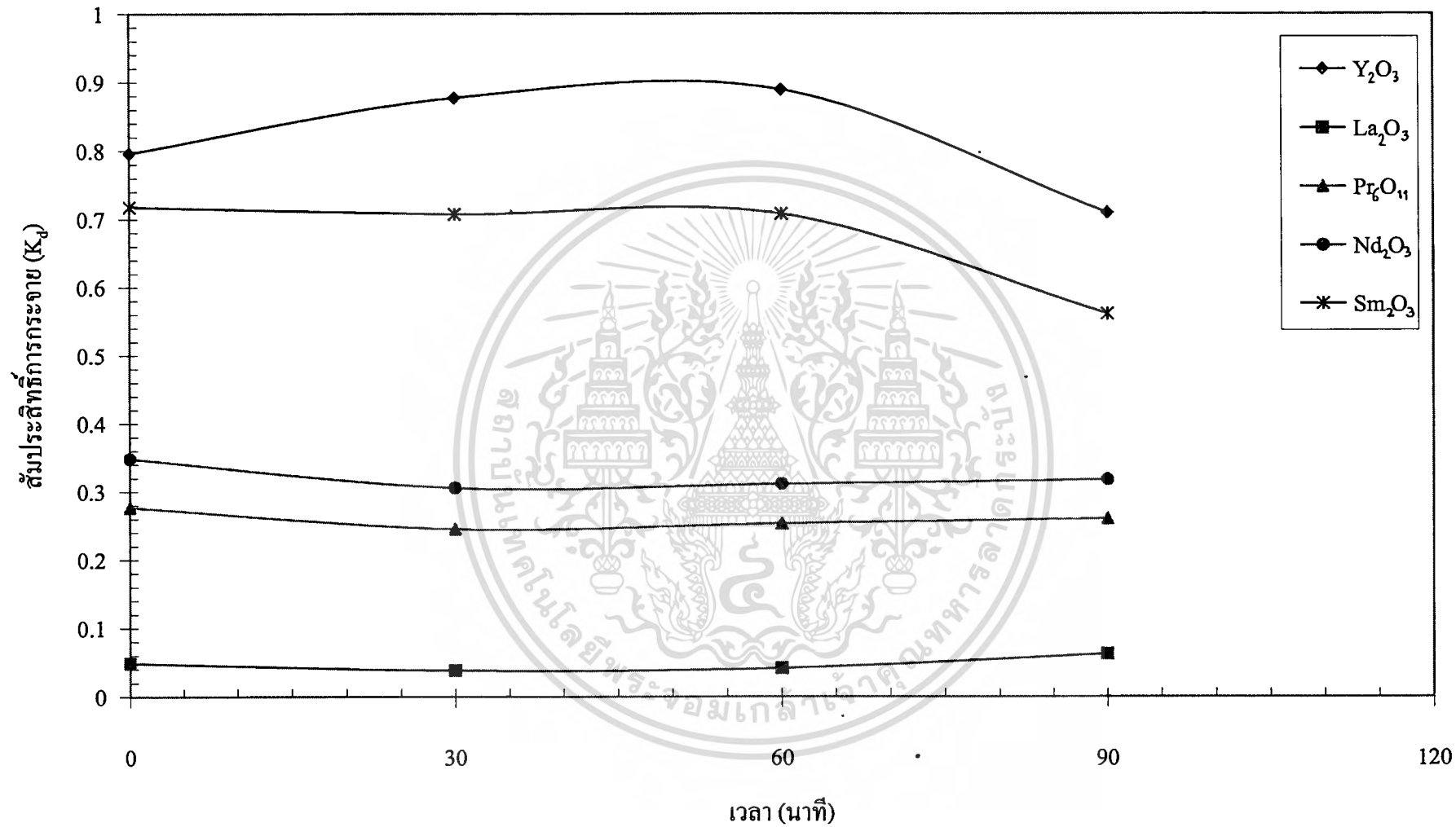
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแร่อิฐกับความสูงของหอสกัต์ในการสัคครั้งแรกที่ 2



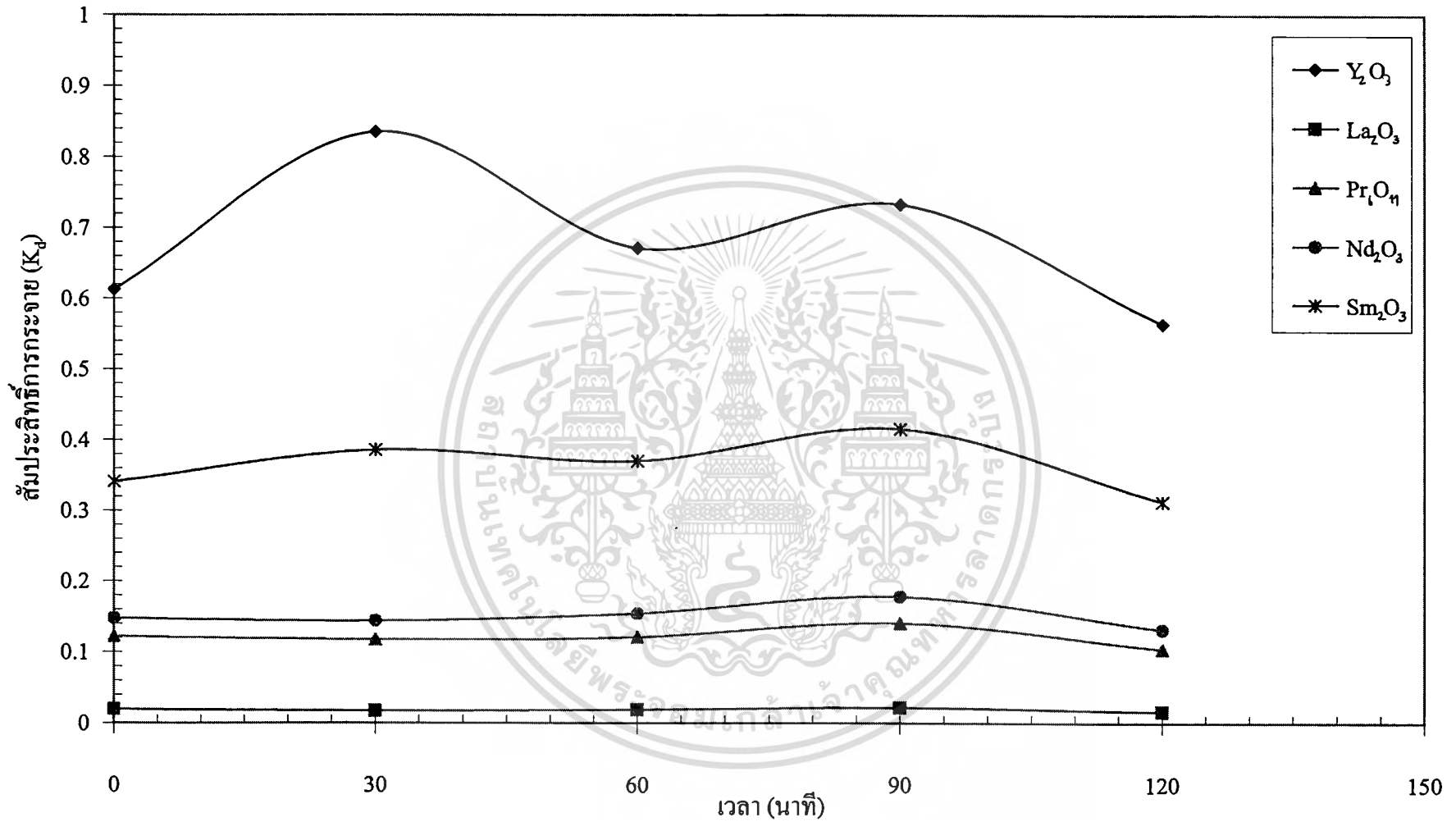
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแร่อิร์ทกับความสูงของหอสกัดในการสกัดครั้งที่ 3



รูปที่ 6.7 สัมประสิทธิ์การกระจาย (K_d) กับเวลาในการสกัดครั้งที่ 1



รูปที่ 6.8 สัมประสิทธิ์การกระจาย (K_d) กับเวลาในการสกัดครั้งที่ 2

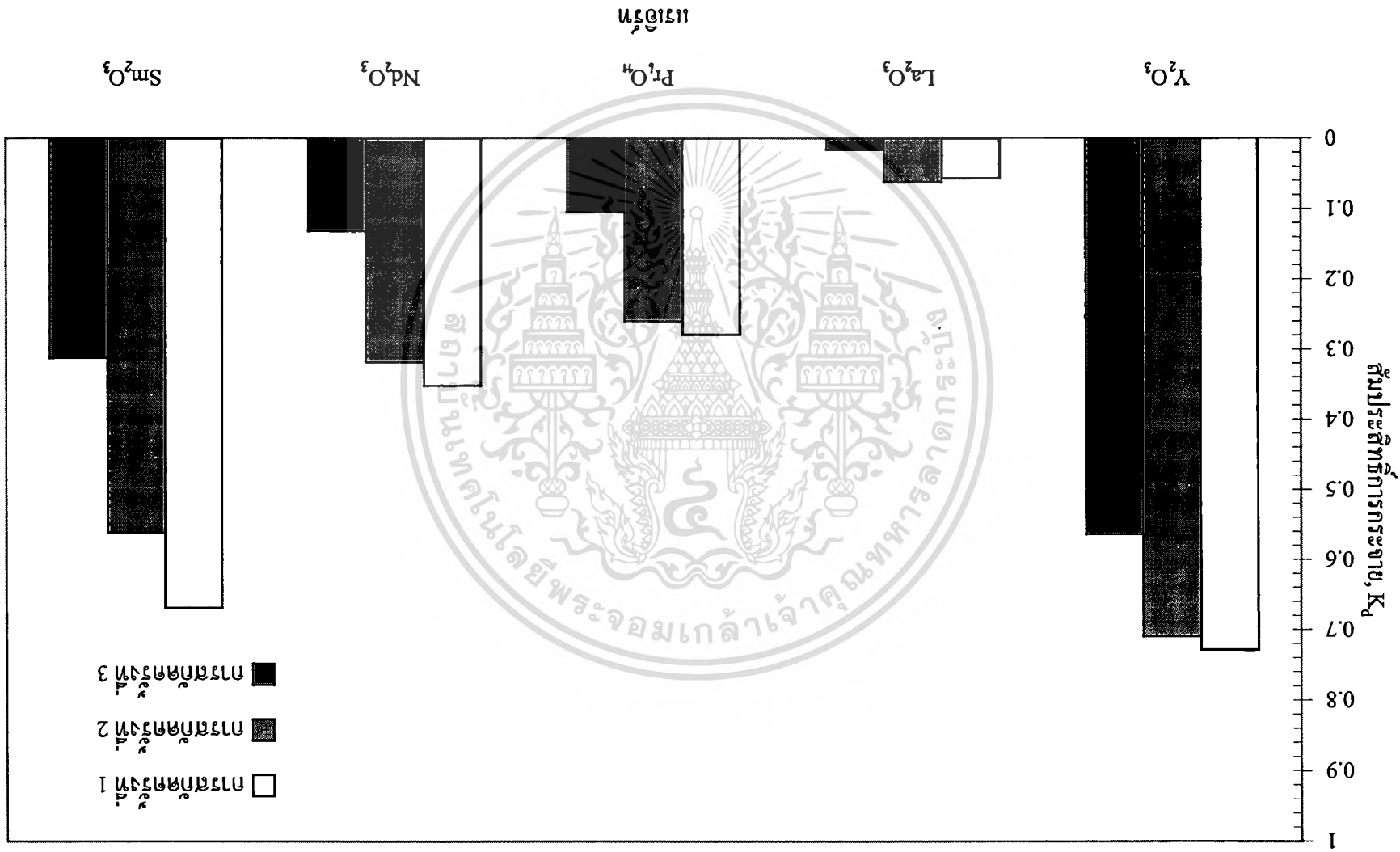


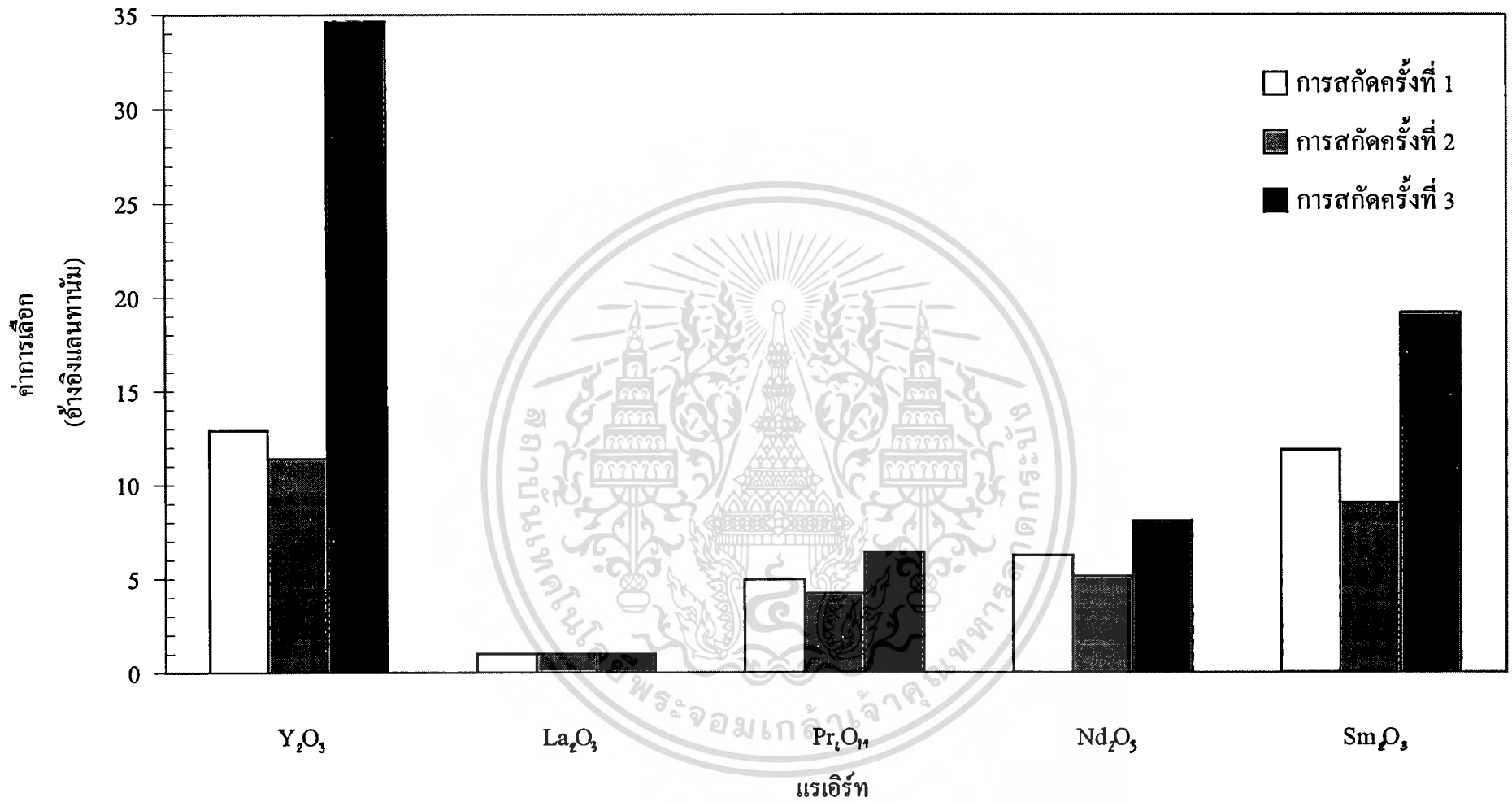
รูปที่ 6.9 สัมประสิทธิ์การกระจาย (K_d) กับเวลาในการสกัดครั้งที่ 3

ตารางที่ 6.4 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่สภาวะคงตัว

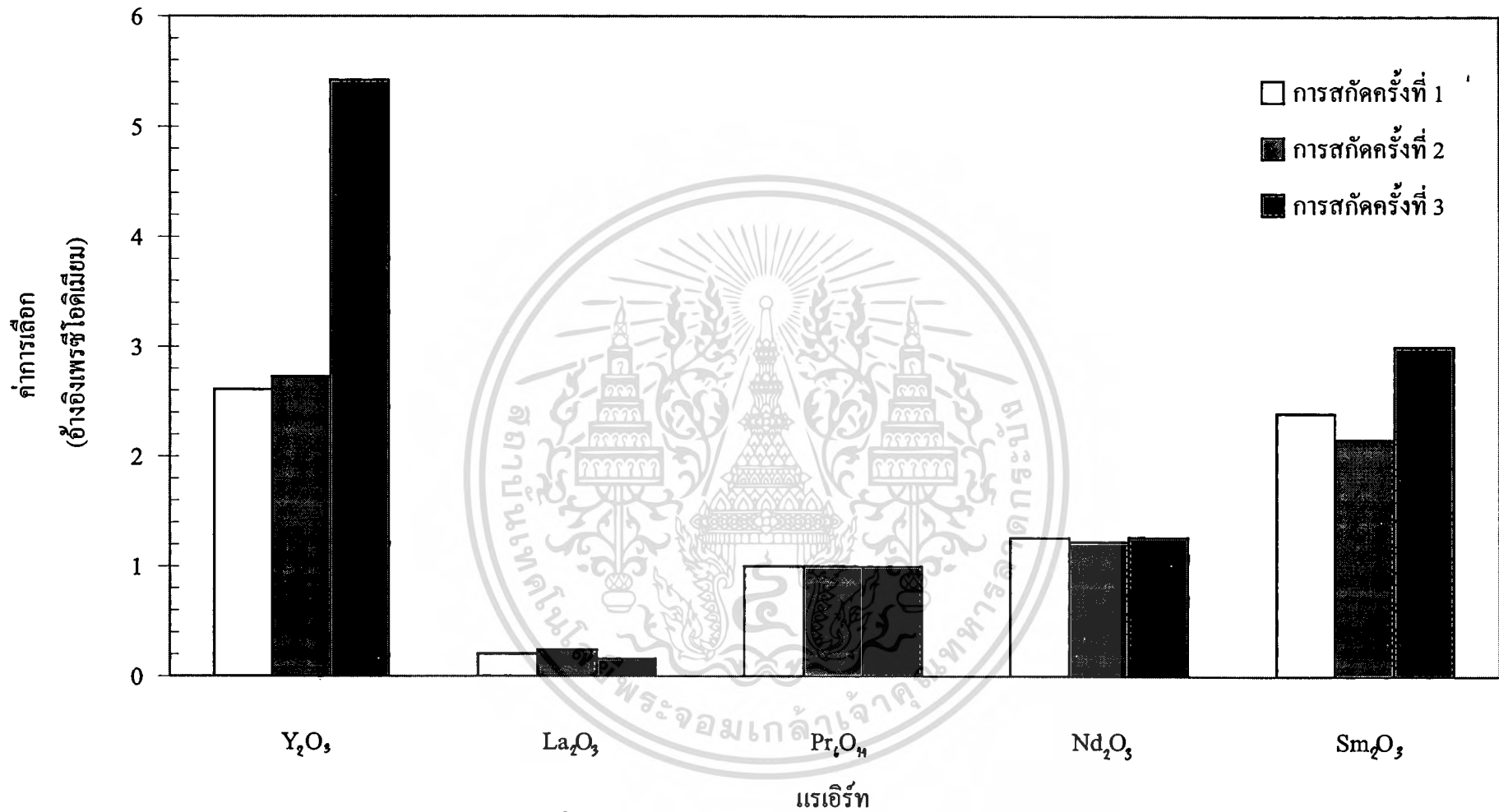
การสกัด ครั้งที่	นาที่ที่	แรเอิร์ท	ความเข้มข้น (มก./มล.)		สัมประสิทธิ์การกระจาย (K_d)
			สารป้อน	ส่วนสกัด	
1	120	Y ₂ O ₃	104.040	44.3168	62.568
		La ₂ O ₃	1612.800	90.2396	1643.760
		Pr ₆ O ₁₁	251.064	56.9884	209.952
		Nd ₂ O ₃	874.080	240.0944	702.000
		Sm ₂ O ₃	169.704	70.0956	107.856
2	90	Y ₂ O ₃	111.265	44.5596	68.1096
		La ₂ O ₃	1724.800	107.494	1875.526
		Pr ₆ O ₁₁	268.499	59.3567	247.3991
		Nd ₂ O ₃	934.780	242.820	828.8372
		Sm ₂ O ₃	181.489	67.5657	125.6193
3	120	Y ₂ O ₃	97.2345	15.7399	51.4672
		La ₂ O ₃	1825.41	22.9863	2609.6957
		Pr ₆ O ₁₁	263.5343	16.1961	286.8993
		Nd ₂ O ₃	863.715	67.9022	952.7304
		Sm ₂ O ₃	150.615	18.6962	110.3989

รูปที่ 6.10 สัมประสิทธิ์การกระจายของแร่ธาตุที่สกัดจากตัวอย่าง

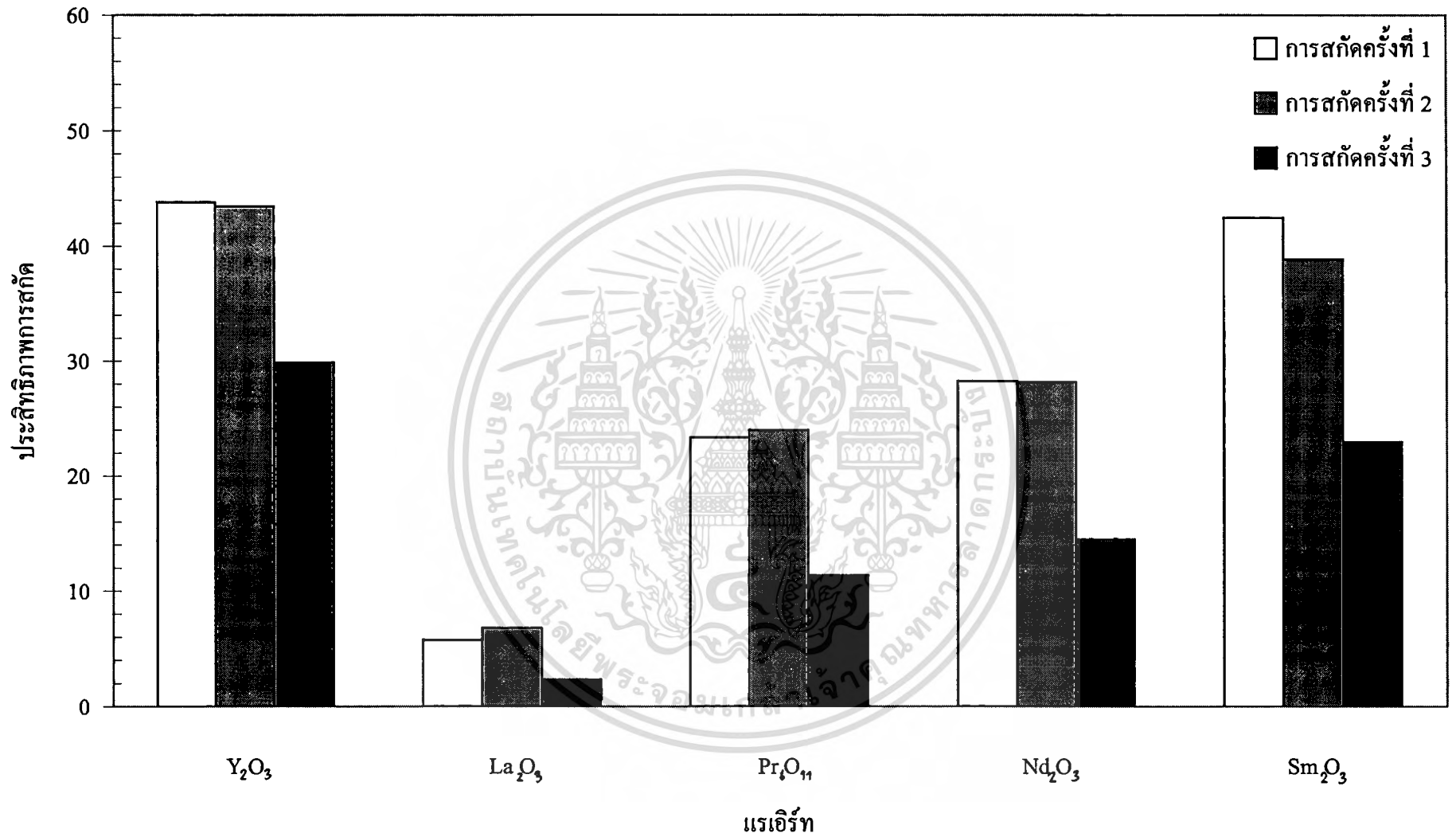




รูปที่ 6.11 ค่าการเลือกของการสกัดแเรเอิร์ทที่สภาวะคงตัว (อ้างอิงแลนทานัม)



รูปที่ 6.12 ค่าการเลือกของการสกัดแร่เอิร์ทที่สภาวะคงตัว
(อ้างอิงเพอร์ซีโอติเมียม)



รูปที่ 6.13 ประสิทธิภาพการสกัดแรเอิร์ทในการสกัดที่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 6.5 สมดุลมวลในแต่ละการสกัดที่สภาวะคงตัว

การสกัด ครั้งที่	แรเอิร์ท ออกไซด์	น้ำหนัก (กรัม)		
		สารป้อน	ส่วนสกัด	ส่วนคงเหลือ
1	Y_2O_3	104.040	44.3168	62.568
	La_2O_3	1612.800	90.2396	1643.760
	Pr_6O_{11}	251.064	56.9884	209.952
	Nd_2O_3	874.080	240.0944	702.000
	Sm_2O_3	169.704	70.0956	107.856
2	Y_2O_3	111.265	44.5596	68.1096
	La_2O_3	1724.800	107.494	1875.526
	Pr_6O_{11}	268.499	59.3567	247.3991
	Nd_2O_3	934.780	242.820	828.8372
	Sm_2O_3	181.489	67.5657	125.6193
3	Y_2O_3	97.2345	15.7399	51.4672
	La_2O_3	1825.41	22.9863	2609.6957
	Pr_6O_{11}	263.5343	16.1961	286.8993
	Nd_2O_3	863.715	67.9022	952.7304
	Sm_2O_3	150.615	18.6962	110.3989

ตารางที่ 6.6 ปริมาณของแร่เอิร์ทไคๆที่ได้จากการสกัด

การสกัด ครั้งที่	แร่เอิร์ท ออกไซด์	น้ำหนัก (กรัม)		
		สารป้อน	ส่วนสกัด	ส่วนคงเหลือ
1	Y_2O_3	231.200	111.600	110.726
	La_2O_3	3584.000	280.116	3164.700
	Pr_6O_{11}	557.920	152.2224	383.306
	Nd_2O_3	1942.400	631.284	1270.500
	Sm_2O_3	377.120	175.398	190.498
2	Y_2O_3	212.415	104.1708	98.154
	La_2O_3	3292.800	154.536	2831.570
	Pr_6O_{11}	512.589	108.711	357.637
	Nd_2O_3	1784.580	440.766	1191.680
	Sm_2O_3	346.479	144.384	173.964
3	Y_2O_3	200.860	38.5434	97.255
	La_2O_3	3770.800	56.7549	3539.870
	Pr_6O_{11}	544.390	39.9399	408.524
	Nd_2O_3	1784.200	167.865	1316.52
	Sm_2O_3	310.200	46.2099	180.624

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผล

1. จากการทดลองสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์โดยใช้สารละลาย 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าด (50%TBP in kerosene) เป็นตัวสกัดแรเอิร์ทผสมที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ พบว่า การใช้สารละลาย 50%ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดเป็นเฟสต่อเนื่องและสารละลายแรเอิร์ทในเฟสกระจาย จะให้ผลการสกัดที่ดีกว่าการใช้สารละลายแรเอิร์ทในเฟสต่อเนื่องและสารละลาย 50%ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดเป็นเฟสกระจาย

2. จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของนีโอติเมียม ซาแมเรียม และอิตเทรียมเพิ่มขึ้นตามความสูงของหอสกัด ส่วนความเข้มข้นของแลนทานัมจะลดลงตามความสูงของหอสกัด

3. จากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของแรเอิร์ท (distribution coefficient) มีค่าไม่เกิน 1 โดยแรเอิร์ทมีแนวโน้มที่จะคงค้างอยู่ในชั้นน้ำมากกว่าจะถูกสกัดเข้ามาในชั้นน้ำมัน และสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมีค่าสูงขึ้นตามเลขอะตอมที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการสกัดจะสามารถแยกแรเอิร์ทออกเป็นกลุ่มๆ ได้ เช่น กลุ่มของแลนทานัมที่มีเลขอะตอมต่ำและกลุ่มของนีโอติเมียมที่มีเลขอะตอมสูง

4. จากการทดลองพบว่าค่าการเลือก (selectivity) ของแรเอิร์ทเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของแรเอิร์ทในสารป้อน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเลือกของแรเอิร์ทแต่ละตัวพบว่าแรเอิร์ทกลุ่มอิตเทรียม นีโอติเมียม ซาแมเรียมสามารถแยกออกจากกลุ่มแลนทานัมและเพอร์ซีโอติเมียมได้

7.2 ข้อแนะนำ

1. การทดลองสกัดธาตุหายากจากแรมโมนาไซต์โดยใช้สารละลาย 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าด (50%TBP in kerosene) เป็นตัวสกัดขั้นต่อไป ควรใช้สารละลาย 50% ไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดเป็นเฟสต่อเนื่องและสารละลายแเรเอิร์ทไนเตรดเป็นเฟสกระจายที่อัตราการใช้ของเฟสต่อเนื่องสูงๆ

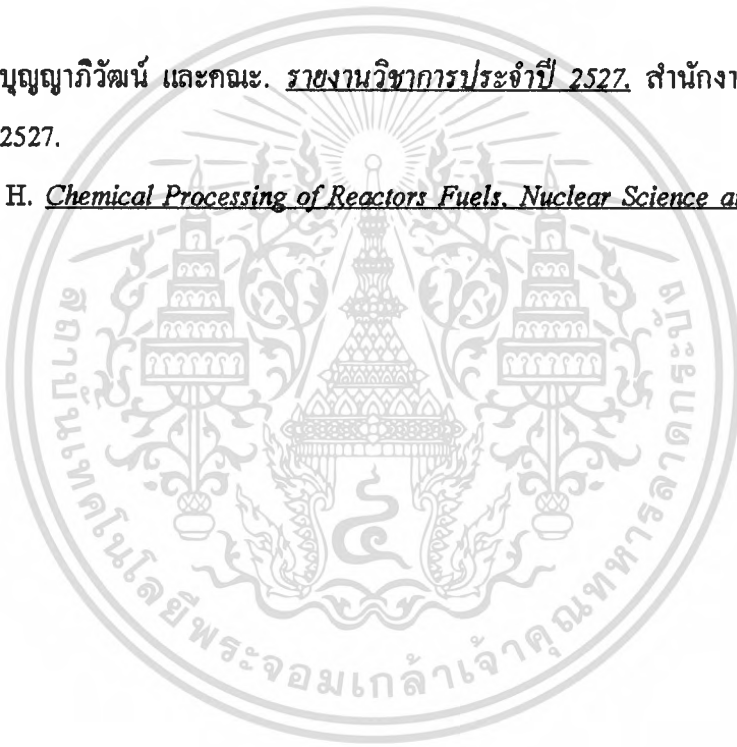
2. การทดลองนี้เป็นแนวทางในการนำวิธีการสกัดด้วยของเหลวมาใช้สกัดแยกแเรเอิร์ท โดยการใช้งานจริงเพื่อหลีกเลี่ยงขั้นตอนยุ่งยากในการสกัดซ้ำ จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น การใช้เทคนิคการล้าง (scrubbing) เทคนิคการสกัดกลับ (strip) และเทคนิคการสกัดวกกลับ (reflux) ซึ่งสามารถช่วยให้การสกัดแยกแเรเอิร์ททำได้ดีขึ้น



รายการอ้างอิง

1. สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข. รู้จักธาตุหายาก. ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม. (2539) : 28 – 49.
2. วิชาญ อมตาริขกุล. แร่โมนาไซต์ในประเทศไทย. ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม. (2539) : 50-54.
3. Thronton, John D. Science and Practice of Liquid-Liquid Extraction Volume 2. 1992.
4. Sattler, Klaus , and Feindt, Hans Jacob. Thermal Separation Process : Principles and Design. 1 st.ed. Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo: VCH, 1995.
5. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม, ศาสตราจารย์ ดร. หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร (หน่วย SI). กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
6. Cusack, W. Roger. et. al. "A Fresh Look At Liquid-Liquid Extraction" . Chemical Engineering. 1991.
7. Geankoplis, Christi J. Transport Processes and Unit Operations. 1995.
8. Thronton, John D. Science and Practice of Liquid-Liquid Extraction Volume 1. 1992.
9. ปฏิภาณ ป่านทอง และคณะ. การจำลองการสกัดของเหลวด้วยของเหลวแบบไหลสวนทางกันอย่างต่อเนื่อง.
10. Laddha, G.S., and Degsleesan, T.E. Transport Phenomena in Liquid Extraction. McGraw-Hill, 1978.
11. Bautista, Renato G.,and Jackson, Norton. RARE EARTHS Resources, Science, Technology and Applications. TMS,1991.
12. Bochinski, Julius, Morton, and Spedding, F.H. Separation of Monazite Rare Earths by Solvent Extraction Volume 50. (February 1958).
13. Bochinski, J. , Smutz, M., and Spedding, F.H. Separation of Individual Rare Earths by Liquid-Liquid Extraction from Multicomponent Monazite Rare Earth Nitrates.
14. Leanne Prvcie, M., Clive Pratt, H.R., and Geoffrey Stevens, W. Axial Dispersion in Pulsed Perforated-plate Extraction Columns. AIChE Journal Volume 35. (November 1989).

15. Quan, C.H., Levins, D., and Shelley, P. Separation Factors of Rare Earths for D2EHPA and IONQUEST IN VARIOUS DILUENTS. 1992.
16. Cheng, H.Y., and Levins, D.M. Solvent Extraction of Rare Earths using Pulse Columns. 1992.
17. นงลักษณ์ พลรักษา และคณะ. การศึกษาภาวะการท่วมในคอลัมน์ระบบพัลส์แบบแผ่นในเจาะรู. ปริยญาวิพนธ์. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2538.
18. แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. Principles and Techniques of Instrumental Analysis. ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์ : กรุงเทพมหานคร, 2534.
19. Weaver, B., Kappleman, F.A., and Topp, A.C. American Chemical Society Journal Volume 75. 1953.
20. อรรถพล บุญญาภิวัฒน์ และคณะ. รายงานวิชาการประจำปี 2527. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. 2527.
21. Siddall, T. H. Chemical Processing of Reactors Fuels. Nuclear Science and Technology II. 1961.

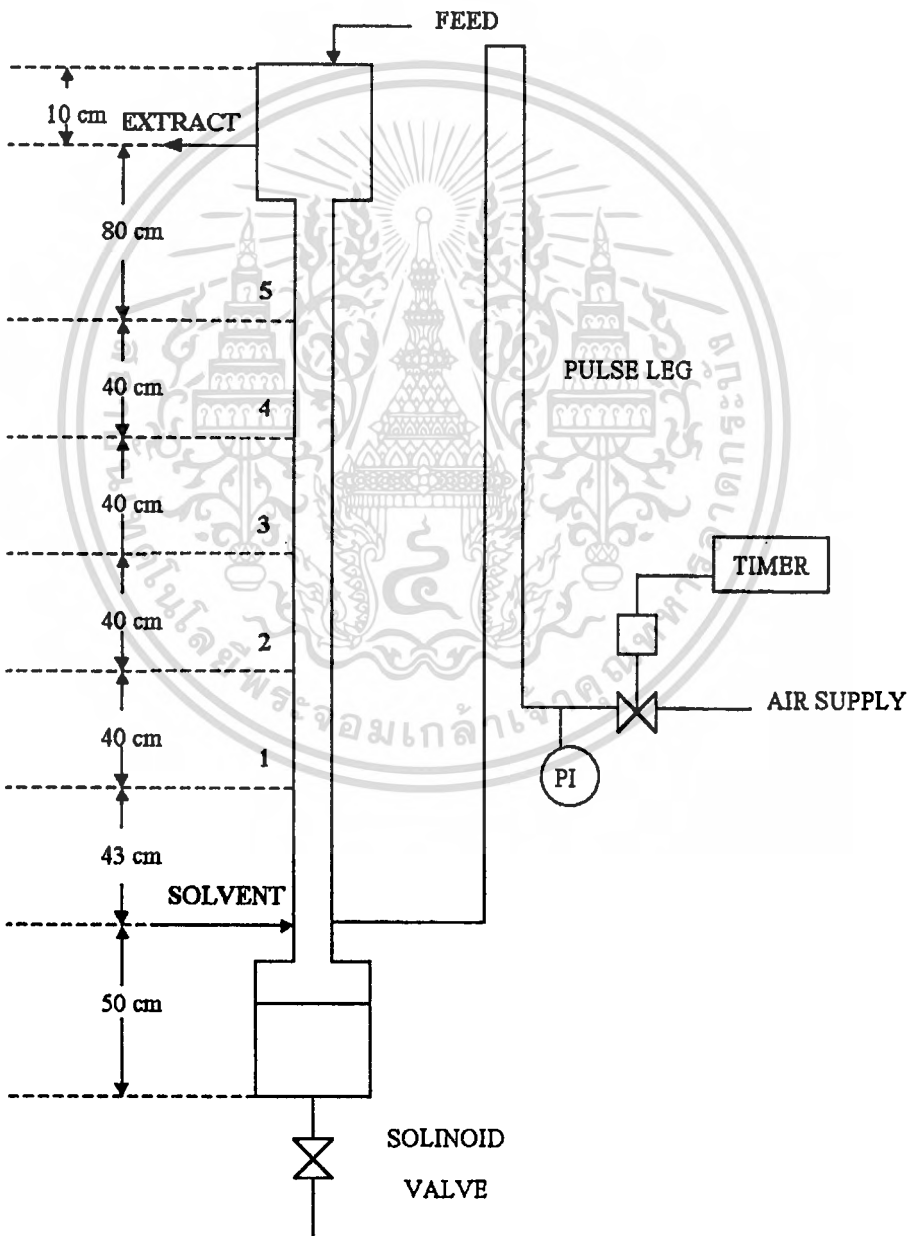




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลจำเพาะของหอสกัดที่ใช้ในการสกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตัดรวางอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-1 โครงสร้างหอสกัดที่ใช้

ภาคผนวก ข

ไตรบิวทิลฟอสเฟต (tri-n-butylphosphate หรือ TBP)^{8,12}

สูตรโมเลกุล : $[(C_4H_9O)_3P=O]$

คุณสมบัติทางกายภาพ : (ที่ 25 °C)

- จุดวาบไฟ	145	องศาเซลเซียส
- ความหนาแน่น	0.975	กรัม/มิลลิลิตร
- ค่าความหนืด	33.2	มิลลิปอยส์
- ค่าการละลายได้ของTBP ในน้ำ	0.39	กรัม/ลิตร
- ค่าการละลายได้ของน้ำใน TBP	64	กรัม/ลิตร

TBP เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความเสถียรมาก ไม่แตกตัวได้ง่ายแม้ในสถานะที่มีความเป็นกรดสูง การใช้ TBP ในการสกัดโลหะจะมีการใช้ร่วมกับสารตัวอื่น (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

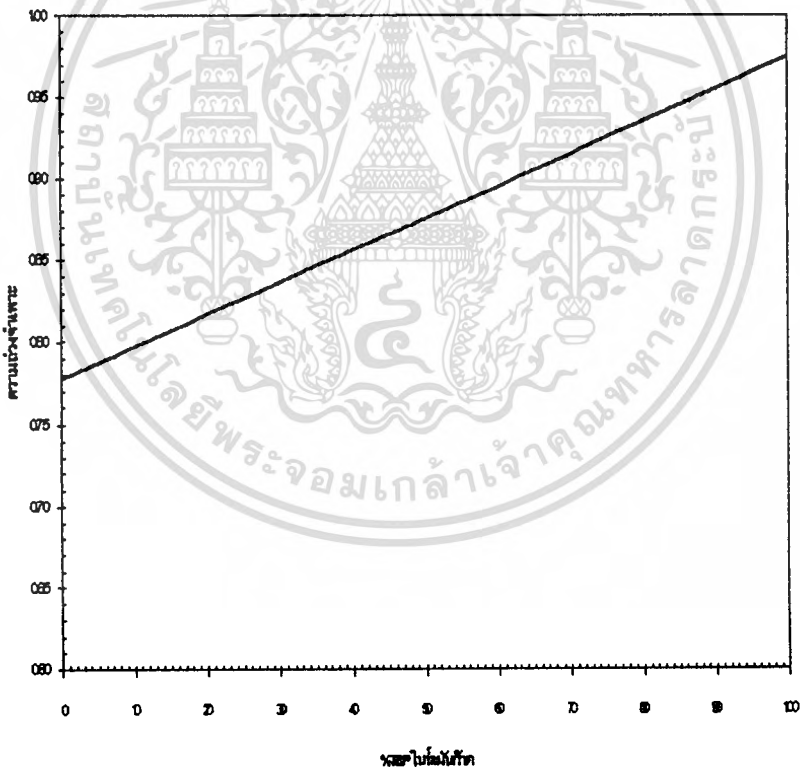
เนื่องจากTBPมีความสามารถในการสกัดโลหะได้ดี จึงมีความสำคัญในทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการสกัดแอมโมเนีย การแยกเซอร์โคเนียมและฮาฟเนียม ใช้เป็นแคตาลีสต์และเป็นสารป้องกันการกัดกร่อน

การใช้ TBP เป็นตัวทำละลาย และสกัดแอร์ทจากสารละลายในรูปไนเตรท แสดงได้ดัง
สมการ



เมื่อ Ln เป็นแลนทาไนด์ (Lanthanide)
เส้นขีดข้างบน แสดงว่าอยู่ในเฟสอินทรีย์

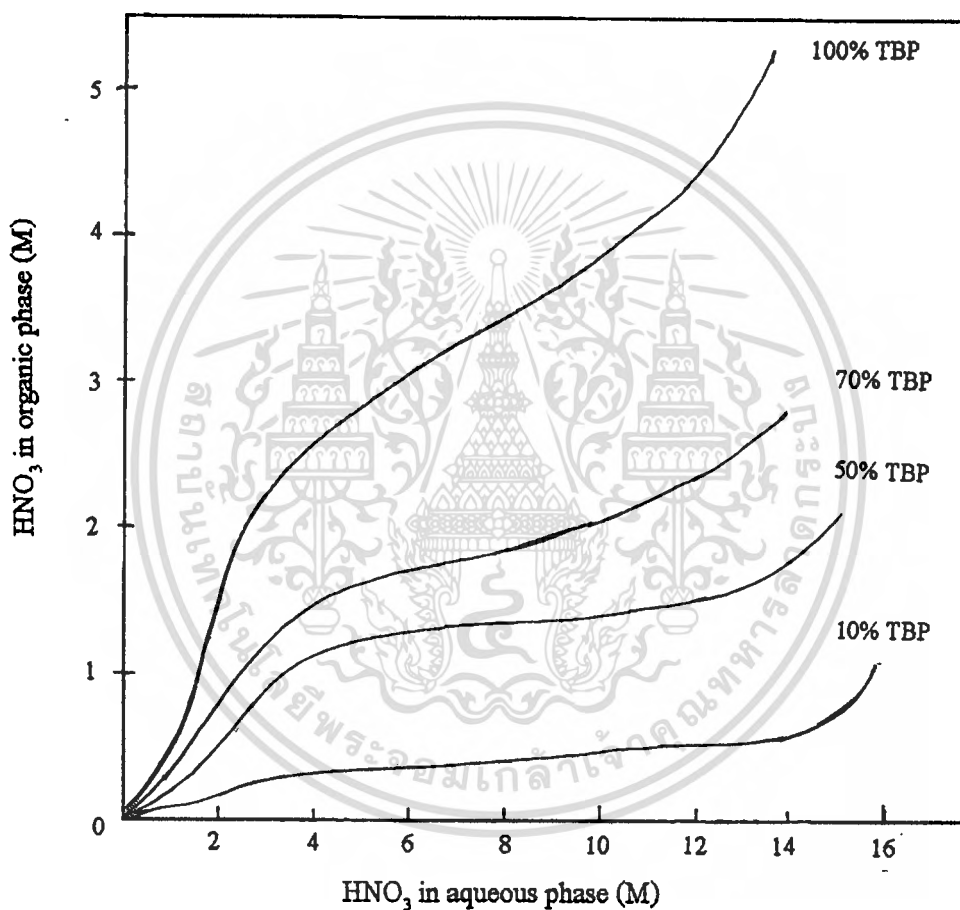
จากความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับ %TBP ในน้ำมันก๊าด ดังรูปที่ ข-1 พบว่า
ที่ 50%TBP ในน้ำมันก๊าดมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.875 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวทำ
ละลายในการสกัดแยกแอร์ท ทั้งประสิทธิภาพในการสกัดและเศรษฐกิจ



รูปที่ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับ %TBP ในน้ำมันก๊าด

(ที่มา : คุณสุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข กองเคมี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ)

สำหรับอัตราส่วนระหว่างความสามารถในการละลายได้ของกรดไนตริกในชั้นอินทรีย์ และชั้นน้ำ ประมาณ 1:4 ที่ 50% TBP ในน้ำมันก๊าด แสดงดังรูปที่ ข-2



รูปที่ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไนตริกในชั้นอินทรีย์กับชั้นน้ำ

(ที่มา : คุณสุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข กองเคมี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ)

ภาคผนวก ก

ข้อมูลสถานะสำหรับหอสกัดที่ใช้ในการสกัด

ตารางที่ ก-1 แสดงข้อมูลสำหรับหอสกัดที่ใช้ในการสกัด

สถานะ	การสกัดครั้งที่ 1	การสกัดครั้งที่ 2	การสกัดครั้งที่ 3
ความดัน (psi)	7.0	7.0	8.0
ความถี่ (รอบ/นาที)	30.0	30.0	39.0
แอมพลิจูด (ซม.)	6.43	6.43	4.94
แอมพลิจูด x ความถี่ (ซม./นาที)	192.900	192.900	192.660
อัตราการไหลของสารละลายน้ำ (ลิตร/ชั่วโมง)	7.2	7.7	5.3
อัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ (ลิตร/ชั่วโมง)	7.0	7.1	2.9
อัตราการไหลรวม (ลิตร/ชั่วโมง)	14.20	14.80	10.60
เฟสต่อเนื่อง	สารละลาย 50%TBP ในน้ำมันก๊าด	สารละลายเวเอิร์ทในแทรก	สารละลายเวเอิร์ทในแทรก
สัดส่วนการไหลของสารละลายน้ำต่อสารละลายอินทรีย์	1 : 1	1 : 1	2 : 1
ความเข้มข้นของสารป้อน (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)	418.290	418.290	600.950
ความดันจําเพาะของสารป้อน (สารละลายเวเอิร์ทในแทรก)	1.684	1.684	1.792
ปริมาตรของสารป้อนที่ใช้ในการสกัด (ลิตร)	16.0	14.7	16.0
ปริมาตรสารละลาย 50%TBP ในน้ำมันก๊าดที่ใช้ในการสกัด(ลิตร)	22.0	15.0	6.0

ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูลสารป้อนที่ใช้ในการสกัด

แร่เอิร์ท	ความเข้มข้น (มก./มล.)		
	การสกัดครั้งที่ 1	การสกัดครั้งที่ 2	การสกัดครั้งที่ 3
ความเข้มข้นรวม (total Rare Earths)	418.2900	418.2900	600.9500
Y_2O_3	14.4500	14.4500	18.2600
La_2O_3	224.0000	224.0000	342.8000
Pr_6O_{11}	34.8700	34.8700	49.4900
Nd_2O_3	121.4000	121.4000	162.2000
Sm_2O_3	23.5700	23.5700	28.2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

วิธีการคำนวณ

สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, K_d)

การสกัดทำให้เกิดวัฏภาคของเหลวขึ้น 2 วัฏภาค โดยการใช้ตัวทำละลาย การละลายขององค์ประกอบใด ๆ ในของเหลว 2 วัฏภาค ที่อยู่ใต้อิทธิพลจะปฏิบัติตามสมการ

$$K_{d,i} = \frac{C_E}{C_R} \quad \text{--- (ง - 1)}$$

- เมื่อ C_E เป็นความเข้มข้นขององค์ประกอบนั้น ในวัฏภาคส่วนที่สกัดได้ (Extract Phase)
 C_R เป็นความเข้มข้นขององค์ประกอบนั้น ในวัฏภาคส่วนที่ไม่ถูกสกัด (Raffinate Phase)
 K_d เป็นสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient)
 i เป็นแรเอิร์ทใด ๆ

โดยปฏิกิริยาเคมีของสารสกัดแรเอิร์ทด้วยสารละลาย 50% TBP ในน้ำมันก๊าด เป็นดังนี้



ดังนั้น

$$K_d = \frac{\text{ความเข้มข้นของแรเอิร์ทในชั้นน้ำมัน}}{\text{ความเข้มข้นของแรเอิร์ทในชั้นน้ำ}} \quad \text{--- (ง - 2)}$$

$$= \frac{[\text{RE}(\text{NO}_3)_3 \cdot 3\text{TBP}]_{\text{organic}}}{[\text{RE}^{3+}]_{\text{aqueous}}} \quad \text{--- (ง - 3)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมดุลมวลสาร (Material Balance)

พิจารณาสมดุลมวลสารได้ดังนี้

สมมติฐาน : อัตราการป้อนสารละลายชั้นน้ำเท่ากันตลอดทั้งหอสกัด

และอัตราการป้อนสารละลายชั้นน้ำมันเท่ากันตลอดทั้งหอสกัด

หรือ $F = R$ และ $S = E$



รูปที่ จ.1 กระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางกันหลายชั้น

สมดุลมวลรวมโดย N ชั้น

$$F + S_{N+1} = R_N + E \quad \text{_____ (จ - 4)}$$

สมดุลมวลรวมขององค์ประกอบ i

$$x_i F + y_{i,N+1} S_{N+1} = x_{i,N} R_N + y_i E \quad \text{_____ (จ - 5)}$$

- เมื่อ F เป็นอัตราการป้อนสารละลายชั้นน้ำ (ลิตร/ชม.)
- S_{N+1} เป็นอัตราการป้อนสารละลายชั้นน้ำมัน (ลิตร/ชม.)
- E เป็นอัตราการไหลของชั้นน้ำมันที่ผ่านการสกัดแล้ว (ลิตร/ชม.)
- R_N เป็นอัตราการไหลของชั้นน้ำที่ผ่านการสกัดแล้ว (ลิตร/ชม.)
- x เป็นความเข้มข้นของแรเอิร์ทในสารละลายชั้นน้ำ (กรัม/ลิตร)
- y เป็นความเข้มข้นของแรเอิร์ทในสารละลายชั้นน้ำมัน (กรัม/ลิตร)
- i เป็นองค์ประกอบแรเอิร์ทใด ๆ

ประสิทธิภาพของการสกัด

ผลการสกัดแเรเอิร์ทว่าสกัดได้มากน้อยเพียงใดจะพิจารณาจากปริมาณแเรเอิร์ทที่สกัดได้ในสารละลายชั้นน้ำมันเปรียบเทียบกับปริมาณแเรเอิร์ทที่มีอยู่ในสารป้อน และสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของการสกัดได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการสกัด} = \frac{\text{ปริมาณแเรเอิร์ทในสารละลายชั้นน้ำมัน} \times 100}{\text{ปริมาณแเรเอิร์ทในสารละลายสารป้อน}} \quad \text{_____ (ง - 6)}$$

