

การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์โดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู



นายบัญชา คำสิงห์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

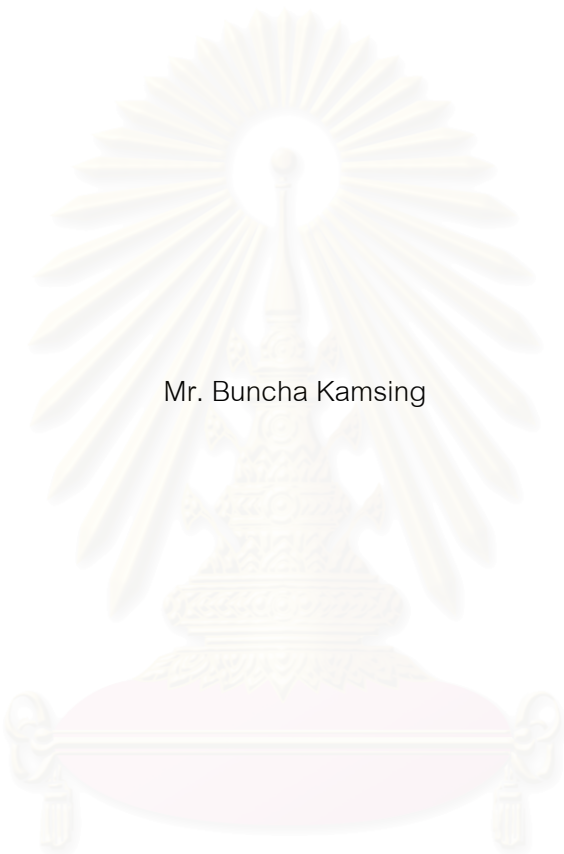
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1356-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EXTRACTION OF URANIUM AND THORIUM FROM MONAZITE
USING PERFORATED ROTATING DISC COLUMN



Mr. Buncha Kamsing

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1356-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์โดยใช้หอสกัดแบบจาน
 หมุนมีรู
โดย นายบัญชา คำสิงห์
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทโรยธา)

..... กรรมการ
(ดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์)

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4170381821: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: URANIUM, THORIUM, RARE EARTHS, MONAZITE, PERFORATED ROTATING DISC COLUMN, TBP, EXTRACTION

BUNCHA KAMSING: EXTRACTION OF URANIUM AND THORIUM FROM MONAZITE USING PERFORATED ROTATING DISC COLUMN. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc. 118 pp. ISBN 974-03-1356-6

This research is to study the extraction of uranium, thorium and rare earths from hydrous metal oxide cake obtained by alkaline digestion of monazite using perforated rotating disc column. The separation was studied using tri-n-butyl phosphate (TBP) as extractant at concentration below 30% v/v in kerosene. Nitrate solution containing 1,000 ppm of uranium, thorium and rare earths in 1-5 mol/l nitric acid was supplied as the feed. The flow rate ratio of organic solution per feed solution was studied in the range of 1:1-1:5 and the agitation speed was varied in the range of 100-250 rpm.

The result from the studies revealed that this process could achieve the separation of uranium and thorium from rare earths. The optimum condition for the extraction was obtained at 200 rpm agitation speed. At the extractant concentration below 20% v/v in kerosene, the percentage of extraction increased in accordance with the concentration of extractant. After the addition of more than 20% v/v extractant, no increase of extraction was observed. And the efficiency of extraction increased in accordance with the flow rate ratio of organic solution per feed solution. Moreover, the percentage of extraction depended on the concentration of nitric acid in feed, with the maximum value at 3 mol/l.

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

Field of study..CHEMICAL ENGINEERING... Advisor's signature.....

Academic year.....2001.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนคำแนะนำและ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุพิชชา จันทโรยธา และ ดร.สิรินาฏ เลาะห์โรจนพันธ์ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะ และวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทางด้านทุนวิจัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณนางอาภรณ์ บุชมงคล และนางสาวหริเนตร มุ่งพยาบาล นักนิเวศลิษฐ์เคมี ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิค NAA

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณนายจිරวิจัน อีซอ และนางสาวอัมพิกา อภิชัยบุคคล นักนิเวศลิษฐ์เคมี ที่อำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีในการทำงานวิจัย ตลอดจนศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์และสารเคมี ต่างๆ ในงานวิจัย รวมทั้งบริษัทบางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่เล็งเห็นความสำคัญของการ วิจัยและได้ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันก๊าด

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและพี่ของผู้วิจัย ซึ่งให้การสนับสนุนอีก ทั้งยังให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา และขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องทุกคนในภาค วิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นกำลังใจให้โดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
สัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
2. ทฤษฎี.....	6
2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	6
2.2 เครื่องมือในการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	9
2.3 การสกัดแบบขั้น.....	17
2.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล.....	20
2.5 ไฮลด์อัฟ.....	26
2.6 ขนาดของหยด.....	29
2.7 ประสิทธิภาพของเมอร์ฟรี.....	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การขยายขนาด	33
2.9 สารสกัด	34
2.10 ไตรบิวทิลฟอสเฟต	40
2.11 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการอบรังสีนิวตรอน	41
2.12 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP	46
3. การทดลอง	48
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	48
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	49
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์	50
3.4 วิธีการทดลอง	50
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	55
4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการสกัดและ หาเวลาในการสกัดที่เหมาะสมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู.....	56
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเร็วยรอบการกวน ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู.....	56
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริก ในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู.....	60
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู.....	67
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนอัตราการใช้ของสารละลาย อินทรีย์ต่อสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู.....	76
4.6 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัด ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก (ข้อมูลดิบ).....	90
ภาคผนวก ข (ผลการคำนวณ).....	99
ภาคผนวก ค (ค่านิยาม).....	107
ภาคผนวก ง (ตัวอย่างการคำนวณ).....	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	118

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในแร่โมนาไซต์ จากประเทศต่าง ๆ เปรียบเทียบกับโมนาไซต์ในประเทศ	3
2.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเครื่องมือสกัด ชนิดต่างๆ ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย	12
2.2 แสดงสมบัติของ TBP	40
2.3 แสดงค่าขีดความในการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธี INAA	46
3.1 แสดงรายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	48
3.2 แสดงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ภายในหอสกัด	50
ก-1 แสดงข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพของการสกัด และหาเวลาในการสกัดที่เหมาะสมโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู	90
ก-2 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบการกวน ที่มีผล ต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู	90
ก-3 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริก ในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายากโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	91
ก-4 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริก ในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	92
ก-5 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริก ในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	93
ก-6 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริก ในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	94
ก-7 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลาย อินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายากโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	95
ก-8 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลาย อินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	96
ก-9 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลาย อินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-10 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	98
ก-11 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนอัตราการใช้ของ สารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัด ธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	98
ข-1 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาประสิทธิภาพของ การสกัด และหาเวลาในการสกัดที่เหมาะสมโดยใช้หอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	99
ข-2 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพล ของความเร็วยวบรวมการกววน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยใช้หอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	99
ข-3 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพล ของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายากโดยหอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	100
ข-4 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพล ของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมโดยหอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	100
ข-5 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพล ของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดทอเรียมโดยหอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	101
ข-6 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของ ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อ การสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	101
ข-7 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพล ของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายากโดยหอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	102
ข-8 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพล ของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมโดยหอสกัดแบบจางหนุมมีรัฐ	102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-9 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพล ของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	103
ข-10 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความ เข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัด ธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	103
ข-11 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน อัตราการใช้ของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน ที่มีผลต่อ การสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู	104
ข-12 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดยูเรเนียม ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี	104
ข-13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดทอเรียม ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี	105
ข-13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดธาตุหายาก ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี	105

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแผนภาพการสกัดด้วยตัวทำละลาย	7
2.2 แสดงลักษณะการไหลของขั้นตอนแบบต่างๆ ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย	9
2.3 แสดงเครื่องสกัดประเภทมิกเซอร์เซตเลอร์	10
2.4 แสดงหลักการเลือกเครื่องมือในการสกัดด้วยตัวทำละลาย	11
2.5 แสดงเครื่องสกัดประเภทใช้แรงเหวี่ยงจากจุดศูนย์กลาง	13
2.6 แสดงลักษณะการไหลและตำแหน่งของรอยต่อระหว่างวัฏภาคในหอสกัด	14
2.7 แสดงหอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล	15
2.8 แสดงหอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุน	16
2.9 แสดงหอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่า	17
2.10 แสดงการสกัดแบบหลายขั้นตอนที่มีการไหลแบบสวนทางกัน	18
2.11 แสดงสูตรโครงสร้างของสารสกัด TBP	41
3.1 แสดงชุดการทดลองการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู	49
3.2 แสดงลักษณะของจานหมุนมีรูที่ใช้ภายในหอสกัด	49
4.1 แสดงขั้นตอนการสกัดแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากธาตุหายาก	55
4.2 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากกับเวลาในการสกัด	57
4.3 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากกับความเร็วรอบการกวน	59
4.4 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายากกับความ เข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้น ต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์	62
4.5 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดยูเรเนียมกับความ เข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้น ต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์	63
4.6 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดทอเรียมกับความ เข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้น ต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์	64

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายาก ยูเรเนียม และทอเรียมกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน	66
4.8 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายากกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน	69
4.9 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดยูเรเนียมกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน	70
4.10 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดทอเรียมกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน	71
4.11 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายาก ยูเรเนียม และทอเรียมกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์	73
4.12 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียม และทอเรียมกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน	75
4.13 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมกับอัตราการไหลของสารป้อน	77
4.14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดยูเรเนียม ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี	79
4.15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดทอเรียม ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี	80
4.16 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดธาตุหายาก ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี	81

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวสัมผัส, m^2
C	ความเข้มข้นของธาตุในสารละลาย, ppm
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน, m
d_s	stator open diameter, m
d_p	ขนาดของหยด, m
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของ, m
D_{32}	Sauter mean drop diameter, m
D_{AB}	สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/s
E	เอ็กซ์แทกต์
E_f	ค่าแฟกเตอร์การสกัด
E_{MD}	Murphree efficiency
E_O	Overall efficiency
F	สารป้อน
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2
h	ระยะห่างระหว่างจานหมุน, m
H	มวลฟลักซ์ของวัฏภาคหนัก, $kg/m^2.s$
ICP	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP
k	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล, m/s
L	มวลฟลักซ์ของวัฏภาคเบา, $kg/m^2.s$
m	Partition coefficient
n, x, y	จำนวนโมล
N	ความเร็วรอบการหมุน, rev/s
N_A	อัตราการถ่ายโอนมวลของสาร A
N_O	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเข้า, m
N_{Re}	Reynolds number, $d_p V \rho / \mu$
N_{Sc}	Schmidt number, $\mu / \rho D_{AB}$
N_{Sh}	Sherwood number, kd_p / D_{AB}

NAA	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการอาบรังสีนิวตรอน
NTU	จำนวนหน่วยถ่ายเท
Q	อัตราการไหล, m^3/s
R	ราฟฟินาท
Re	Rotor Reynolds number
RE	ธาตุหายาก
RH	สารสกัด
S	ตัวทำละลาย
t	เวลา, s
T	อุณหภูมิ, K
TBP	ไตรบิวทิลฟอสเฟต
Th	ทอเรียม
U	ยูเรเนียม
V	Superficial velocity, m^3/s
V_o	Characteristic velocity, m/s
V_s	Slip velocity, m/s
V_T	Terminal velocity, m/s
W	น้ำหนักของธาตุ, kg
ϕ	โพลด์อัฟ
γ	แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค, N/m
[]	ความเข้มข้นของสาร
λ	ค่าคงที่การสลายตัว
ϵ	Mechanical power per unit mass, W/kg
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
$\Delta\rho$	ความหนาแน่นระหว่างวัฏภาค, kg/m^3
μ	ค่าความหนืดของสารละลายอินทรีย์, Pa.s
ν_A	ขนาดโมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อนที่จุดเดือดปกติ, $m^3/kmol$
π	3.1416

ตัวห้อย

0	ที่เวลาเท่ากับ 0
A	ตัวถูกละลาย
aq	สารละลายที่เป็นน้ำ
B	ตัวทำละลาย
c	วัฏภาคต่อเนื่อง
co	การรวมตัวของหยด
d	วัฏภาคกระจาย
f	การเกิดของหยด
feed	สารละลายป้อน
i	ที่ผิวสัมผัส
in	ขาเข้า
n, x, y	จำนวนโมล
org	สารละลายอินทรีย์
out	ขาออก
r	การลอยตัวของหยด
s	สารมาตรฐาน
t	ที่เวลาเท่ากับ t
u	สารตัวอย่าง
w	น้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

เนื่องจากความต้องการใช้ทรัพยากรธรรมชาติมีอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปัจจุบันทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดนั้นลดลงไป กอปรกับการออกกฎหมายสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวดมากขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะมีการวิจัยและพัฒนากระบวนการต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการพัฒนาของประเทศต่อไป

แร่โมนาไซต์ (Monazite) มีหลายชื่อ คือ เทอร์เนอร์ไรต์ (Termerite) คริปโตไลต์ (Crytolite) คาราร์ฟเวิท (Kararfeite) โมนาซิโตอยด์ (Manazitoid) เอดเวิร์ดไซต์ (Edwardsite) เออร์ไรต์ (Urdite) และฟอสฟอเซอร์ไรต์ (Phosphocerite) เป็นแร่ทอเรียม (Thorium-bearing minerals) ชนิดที่มียูเรเนียมปนอยู่ด้วยจึงจัดว่าเป็นแร่แอสตูนิวเคลียร์ชนิดหนึ่ง โดยอยู่ในรูปของเกลือฟอสเฟตของทอเรียม ยูเรเนียม และธาตุหายาก (Rare earths) มีสูตรทางเคมีคือ $(Ce, La, Y, Th)PO_4$ ซึ่งประกอบด้วยธาตุหายาก 60-65% ทอเรียม 2-20% และยูเรเนียมน้อยกว่า 0.5% โดยส่วนประกอบดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามแหล่งกำเนิดของแร่ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ธาตุหายากซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของแร่โมนาไซต์คือ กลุ่มธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ (Lanthanide series) ทั้งหมด 15 ธาตุ และอิตเทรียม (Yttrium) ซึ่งเป็นธาตุที่มีสมบัติคล้ายคลึงกับธาตุอื่นๆ ในอนุกรมนี้ โดยแบ่งธาตุหายากออกเป็น 2 กลุ่มย่อยได้แก่ ธาตุหายากกลุ่มเบา หรือ กลุ่มซีเรียม หมายถึงธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 57-63 (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm และ Eu) และธาตุหายากกลุ่มหนัก หรือ กลุ่มอิตเทรียม หมายถึง ธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 64-71 รวมทั้งอิตเทรียมด้วย (Tb, Dy, Ho, Gd, Er, Tm, Yb, Lu และ Y)

ในปัจจุบันธาตุหายากนับว่ามีความสำคัญทั้งทางเศรษฐกิจและเทคโนโลยี มีการใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อ อุตสาหกรรมผลิตแม่เหล็กถาวร อุตสาหกรรมเคมีและตัวเร่งปฏิกิริยา อุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟอสฟอรัส เป็นต้น สำหรับยูเรเนียมและทอเรียมที่ได้จากแร่โมนาไซต์ จะถูกนำมา

ใช้ในการศึกษาวิจัยทางเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของประเทศต่อไป (สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก)

ในประเทศไทยแร่โมนาไซต์เป็นแร่ที่รู้จักตั้งแต่ปี พ.ศ. 2475 แต่ขณะนั้นยังไม่ได้รับความสนใจและยังไม่มีการผลิตเกิดขึ้น เนื่องจากการทำเหมืองในสมัยนั้นสนใจเฉพาะแร่ดีบุกเพียงอย่างเดียว และขาดความชำนาญในการแต่งแร่ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2498 กรมทรัพยากรธรณี โดยนาย ชะนะ นิลคูหา และ ดร. โปยม อรรถยานนท์ ได้เริ่มสำรวจกองหางแร่และแร่หนักอื่นๆ ในบริเวณเหมืองแร่ดีบุก-วุลแฟรม พร้อมทั้งให้คำแนะนำและความช่วยเหลือทางวิชาการในด้านการแยกและแต่งแร่ จากนั้นจึงได้เริ่มมีการผลิตแร่พลอยได้ต่างๆ รวมทั้งแร่โมนาไซต์เรื่อยมา (ทวี ศิริอุดมรัตน์, 2527) ในปัจจุบันแร่โมนาไซต์สามารถพบได้ตามแหล่งแร่ดีบุก และทรายชายหาดบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามันและอ่าวไทย ในอดีตประเทศไทยมีการส่งออกแร่โมนาไซต์ในรูปแบบแร่ดิบซึ่งทำให้ได้ราคาต่ำและสูญเสียยูเรเนียมและทอเรียมซึ่งเป็นวัสดุนิวเคลียร์ไป จากความสามารถในการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ภายในประเทศในปัจจุบัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงมากขึ้นและได้ยูเรเนียมและทอเรียมมากพอที่จะใช้ในการวิจัยและพัฒนาเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ นอกจากนี้ยังเป็น การอนุรักษ์และพัฒนาการทำเหมืองแร่ของประเทศให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในการพัฒนาประเทศ ในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่การแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ทำเพื่อประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมจากธาตุหายากและทอเรียมมากกว่าการผลิตเพื่อเป็นวัสดุ นิวเคลียร์

กระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ เริ่มจากการแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกเป็นกลุ่มหนึ่ง และธาตุหายากออกเป็นอีกกลุ่ม (Preliminary group separation) เพื่อความสะดวกในการ ออกแบบกระบวนการ การวางแผนระบบและการควบคุมความปลอดภัยทางรังสี (เขาเวเลข ษยพัฒนางกุลและคณะ, 2529) ก่อนที่จะทำให้มีความบริสุทธิ์สูงต่อไป วิธีการแยกนี้มีหลายวิธี (นัยนา ศรีदानพ, 2517) ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) เป็นวิธีการที่ง่ายและสะดวก เหมาะในการใช้กับสารละลายความเข้มข้นสูง แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ มีความสามารถในการคัดเลือก (Selectivity) ต่ำ วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) มีประสิทธิภาพและความสามารถในการคัดเลือกสูง เหมาะในการใช้กับสารละลายความเข้มข้นต่ำ และต้องการความบริสุทธิ์สูง แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ มีค่าอัตราการถ่ายเทมวลต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่และใช้เวลาในการปฏิบัติการนาน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ค่อนข้างสูง วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจ เพราะสามารถออกแบบเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องได้ ทำให้การสกัดเกิดขึ้นได้ในเวลาอันรวดเร็วและ

ลดขนาดของกระบวนการ และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อขยายขนาดกำลังการผลิตให้มากขึ้นได้ (Scale up) ในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ พบว่านิยมใช้กระบวนการสกัดของเหลวด้วยของเหลวกันมาก ทั้งเครื่องสกัดประเภทหอสกัด (Extraction columns) และเครื่องสกัดประเภทมิกเซอร์เซตเลอร์ (Mixer settlers) (วรพัฒน์ อรรถยุดิ, 2526)

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากธาตุหายากในแร่โมนาไซต์ โดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู (Perforated Rotating Disc Column, PRDC) เพื่อสามารถนำข้อมูลและผลการวิจัยที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสกัดโลหะจากแร่โมนาไซต์ และอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อไป

องค์ประกอบ	ปริมาณความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดยมวล)			
	บราซิล	อินเดีย	สหรัฐอเมริกา	ไทย*
Thorium oxide (ThO ₂)	6.8	9.9	3.4	4.5-10.6
Uranium oxide (U ₃ O ₈)	0.18	0.27	0.15	0.24-0.79
Total rare earth oxide	60.5	59.8	40.1	47-58
Cerium oxide (CeO ₂)	25.9	27.5	19.5	19-23
Lanthanum oxide (La ₂ O ₃)	-	-	-	7-15
Neodymium oxide (Nd ₂ O ₃)	-	-	-	6-11
Praseodymium oxide (Pr ₆ O ₁₁)	-	-	-	1.6-3.4
Samarium oxide (Sm ₂ O ₃)	-	-	-	0.7-1.6
Gadolinium oxide (Gd ₂ O ₃)	-	-	-	1.0-1.4
Dysprosium oxide (Dy ₂ O ₃)	-	-	-	0.4-1.9

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่มีข้อมูล

* หมายถึง ได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์แร่โมนาไซต์ 20 ตัวอย่าง

ตารางที่ 1.1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในแร่โมนาไซต์จากประเทศต่างๆ เปรียบเทียบกับโมนาไซต์ในประเทศ (ชาวเลข ชยพัฒนางกุลและคณะ, 2529)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์โดยใช้
หอสกัดแบบจานหมุนมีรู อาทิเช่น
 - 1.1 ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน
 - 1.2 ความเร็วรอบการกวนของหอสกัด
2. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์โดยใช้หอสกัด
สกัดแบบจานหมุนมีรู

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์โดยใช้หอสกัด
แบบจานหมุนมีรู ได้แก่

1. ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนในช่วง 1 - 5 โมลต่อลิตร
2. ความเข้มข้นของสารสกัด TBP (Tributy phosphate) ในน้ำมันก๊าดในช่วง 1 - 30 %
โดยปริมาตร
3. อัตราส่วนของอัตราการไหลของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อนที่ 1:1, 1:2,
1:3, 1:4 และ 1:5 เมื่อใช้อัตราการไหลของตัวทำละลายอินทรีย์คงที่ที่ 100 มิลลิลิตร
ต่อนาที
4. ความเร็วรอบการกวนของหอสกัดในช่วง 100 – 250 รอบต่อนาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์โดยใช้หอสกัดแบบจานหมุน

2. ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสักรัดยูเรเนียมและทอเรียบจากแร่โมนาไซต์โดยใช้หอ สักรัดแบบจานหมุนมีรู
3. สามารถหาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการของเครื่องมือในการสักรัดยูเรเนียมและ ทอเรียบจากแร่โมนาไซต์โดยใช้หอ สักรัดแบบจานหมุนมีรู
4. สามารถนำข้อมูลและผลการวิจัยที่ได้นี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสักรัดโลหะจากแร่ โมนาไซต์ และอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ได้

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการสักรัดไอออนโลหะ
2. ออกแบบการทดลองและจัดหาอุปกรณ์ในการทดลอง
3. ทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ก่อนการทดลองจริง
4. ดำเนินการทดลอง
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลองที่ได้
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

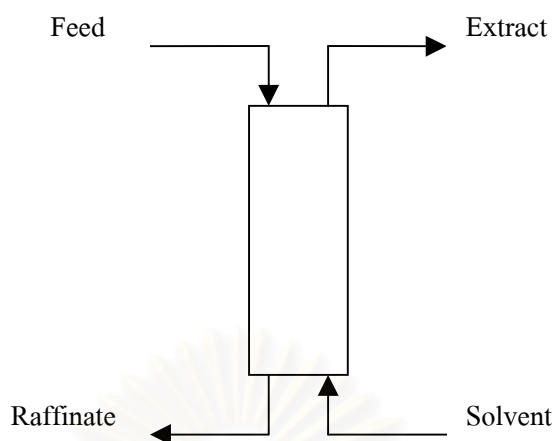
2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นระบบปฏิบัติการเฉพาะหน่วยที่สำคัญหน่วยหนึ่งในสาขาวิศวกรรมเคมี และเป็นกระบวนการที่มีทฤษฎีพื้นฐานรองรับเป็นเวลานานแล้ว จะพบระบบปฏิบัติการเฉพาะหน่วยแบบนี้ได้มากในอุตสาหกรรมสามประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมสกัดโลหะจากแร่ และอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ นอกจากนี้อาจจะพบได้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมเคมีบ้าง (วรพัฒน์ อรรถยุติ, 2526)

ในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นระบบปฏิบัติการเฉพาะหน่วยที่มีความเหมาะสมมาก เนื่องจาก (Alegat, 1988)

- 1) เป็นกระบวนการที่สามารถมีหลายขั้นตอน (Multistage) ได้
- 2) สามารถออกแบบและสร้างให้ทำการควบคุมระยะไกลได้ง่าย
- 3) เป็นกระบวนการที่เกิดของเสียน้อย
- 4) การเสื่อมสภาพของตัวทำละลายจากรังสีสามารถถูกทดแทนได้ง่ายในกระบวนการแบบต่อเนื่อง

การสกัดด้วยตัวทำละลาย หรือการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-Liquid Extraction) เป็นการแยกสารในรูปของสารละลาย โดยอาศัยหลักการ คือ “ความสามารถในการละลาย (Solubility) ที่ต่างกันของตัวถูกละลายในตัวทำละลายต่างชนิดกัน” ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย นำสารป้อน (Feed) ที่มีตัวถูกละลายละลายอยู่ในตัวทำละลายชนิดหนึ่ง มาผสมกับตัวทำละลาย (Solvent) อีกชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการละลายกับตัวถูกละลายมากกว่า โดยที่ตัวทำละลายทั้งสองชนิดนี้จะไม่ละลายซึ่งกันและกันหรือละลายกันได้น้อยมาก ทำให้ภายหลังการสกัดจะเกิดการแยกชั้นของวัฏภาคขึ้นและตัวถูกละลายส่วนใหญ่จะเกิดการถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคไปยังวัฏภาคตัวทำละลาย โดยตัวทำละลายที่อิมตัวด้วยตัวถูกละลายเรียกว่า เอกซ์แทรกท์ (Extract) ส่วนสารป้อนที่เหลือจากการสกัดเรียกว่า ราฟฟินาท์ (Raffinate) ดังแสดงในรูปแบบที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพการสกัดด้วยตัวทำละลาย

2.1.1 กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction Process)

การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคหนึ่งไปสู่วัฏภาคหนึ่งในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย สามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ

- 1) การสกัดที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี (Extraction without chemical reaction) เป็นการสกัดโดยอาศัยสมบัติการละลายทางกายภาพ (Physical solubility) ที่ต่างกันของตัวถูกละลายในตัวทำละลายต่างชนิดกัน
- 2) การสกัดที่มีปฏิกิริยาเคมี (Extraction with chemical reaction) เกิดขึ้นโดยการเติมสารที่เรียกว่า สารสกัด (Extractants) ในตัวทำละลาย เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลและเพิ่มค่าการเลือกสกัด (Selectivity) เฉพาะสารที่ต้องการสกัดเท่านั้น สารสกัดจะทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่ต้องการสกัดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและถูกสกัดโดยวัฏภาคตัวถูกละลาย ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ยกตัวอย่างเช่น การกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ในโรงกลั่นน้ำมันด้วยการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้ (Reversible) ยกตัวอย่างเช่น การสกัดทองแดงจาก

สารละลายที่มีความเข้มข้นของทองแดงไปยังภูมิภาคของน้ำมันก๊าดซึ่งประกอบด้วยสารสกัดชนิดหนึ่งคือ LIX 64N

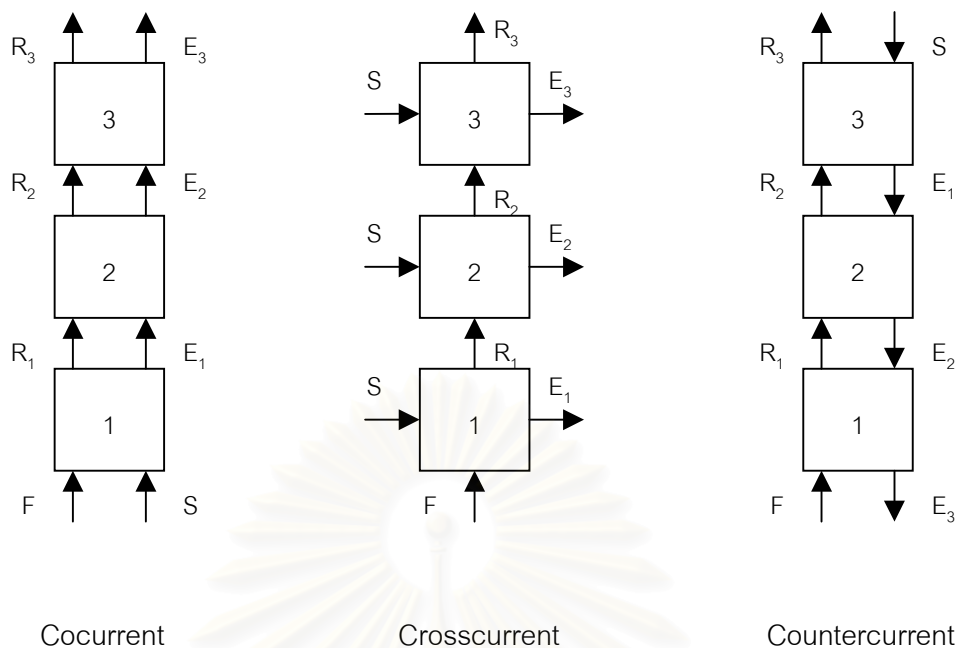
2.1.2 ขั้นตอนในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย มีดังนี้

- 1) นำของเหลวผสมที่เป็นสารป้อนมาสัมผัสกับตัวทำละลายที่เลือกให้เหมาะสมกับสารที่ต้องการ
- 2) ภายหลังจากการสัมผัสกันเป็นเวลาพอสมควร ภูมิภาคทั้งสองจะแยกออกจากกัน
- 3) แยกหรือนำเอาตัวทำละลายที่อยู่ในแต่ละภูมิภาคกลับมาใช้ใหม่

วิธีการข้อ 1) และข้อ 2) อาจจะรวมกันอยู่ในเครื่องมือที่เป็นหอ (Column) หรือเป็นขั้นตอน (Stage) หลายๆ ขั้นตอนต่อกันแบบอนุกรม และในแต่ละขั้นตอนจะมีการกวนเพื่อให้ภูมิภาคทั้งสองสัมผัสกันได้ดี (ปิยะสาร ประเสริฐธรรม, 2536)

ในการปฏิบัติงานจริง กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นการสกัดแบบหลายขั้นตอนซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลได้ดังนี้ คือ

- 1) ขั้นตอนแบบไหลในทิศทางเดียวกัน (Cocurrent) เป็นลักษณะการไหลที่ตัวทำละลายไหลในทิศทางเดียวกันกับสารป้อนในแต่ละขั้นตอนของการสกัด เพื่อเป็นการเพิ่มเวลาในการสกัด (Residence time) แต่ไม่ได้เป็นการเพิ่มปริมาณการสกัดเกินไปกว่าการสกัดขั้นตอนเดียว
- 2) ขั้นตอนแบบไหลตั้งฉากกัน (Crosscurrent) เป็นลักษณะการไหลที่ตัวทำละลายจะถูกเติมเพื่อให้สกัดในแต่ละขั้นตอนแล้วไหลแยกออกมา ทำให้สามารถสกัดแยกสารออกได้ปริมาณมากกว่าการสกัดแบบขั้นตอนเดียว แต่เป็นการสิ้นเปลืองสารสกัดมาก
- 3) ขั้นตอนแบบไหลสวนทางกัน (Countercurrent) เป็นลักษณะการไหลที่ตัวทำละลายสวนทางกับสารป้อนในแต่ละขั้นตอนของการสกัด วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากสามารถใช้กับตัวถูกละลายที่มีอัตราส่วนของการกระจายใกล้เคียงกันมากๆ ได้ ซึ่งทำให้สามารถแยกตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดให้มีความบริสุทธิ์สูงได้ และทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย



(F = Feed, R = Raffinate, E = Extract และ S = Solvent)

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการไหลของขั้นตอนแบบต่างๆ ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

2.2 เครื่องมือในการสกัดด้วยตัวทำละลาย

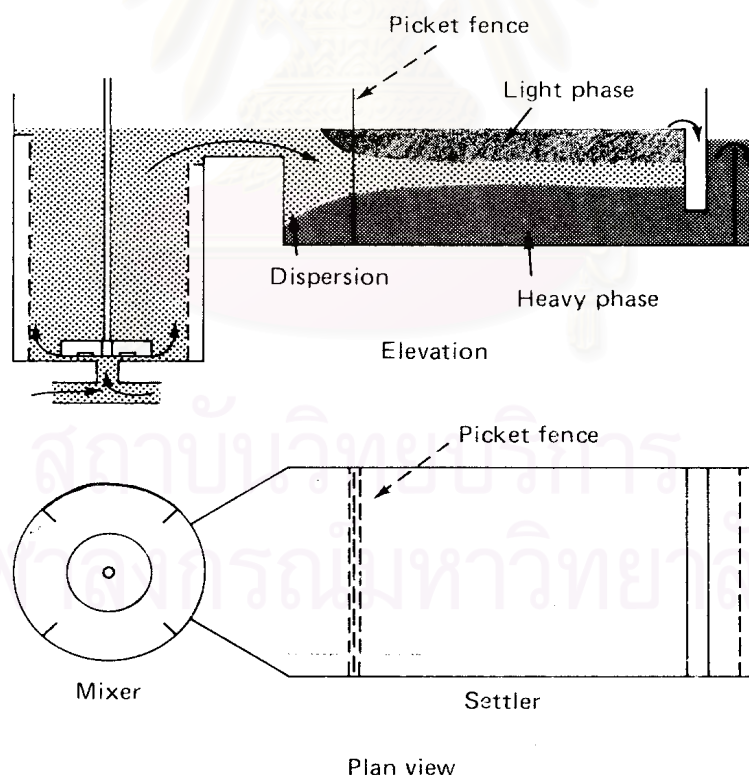
โดยทั่วไปการเลือกใช้เครื่องมือในการสกัดที่เหมาะสมนั้นจะพิจารณาจากประสิทธิภาพและทางเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถแสดงหลักการเลือกเครื่องมือในการสกัดด้วยตัวทำละลายอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.4 โดยในการเลือกต้องคำนึงถึงสมบัติของสารที่นำมาใช้ในระบบทั้งทางด้านกายภาพและเคมี รวมถึงด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบทั้งหมดด้วย เช่น ราคาของเครื่อง ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุง การสิ้นเปลืองพลังงาน ขนาดของพื้นที่และความสูงของห้องที่ต้องใช้ในการติดตั้ง เป็นต้น โดยสามารถสรุปความต้องการพื้นฐานในการใช้เครื่องมือในการสกัดในทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไปได้ดังนี้

- 1) ประสิทธิภาพในการสกัด
- 2) ผลผลิตที่ได้มีปริมาณสูง
- 3) ปริมาตรในการสกัดต่ำ
- 4) ใช้พื้นที่น้อย และค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานและบำรุงรักษาต่ำ

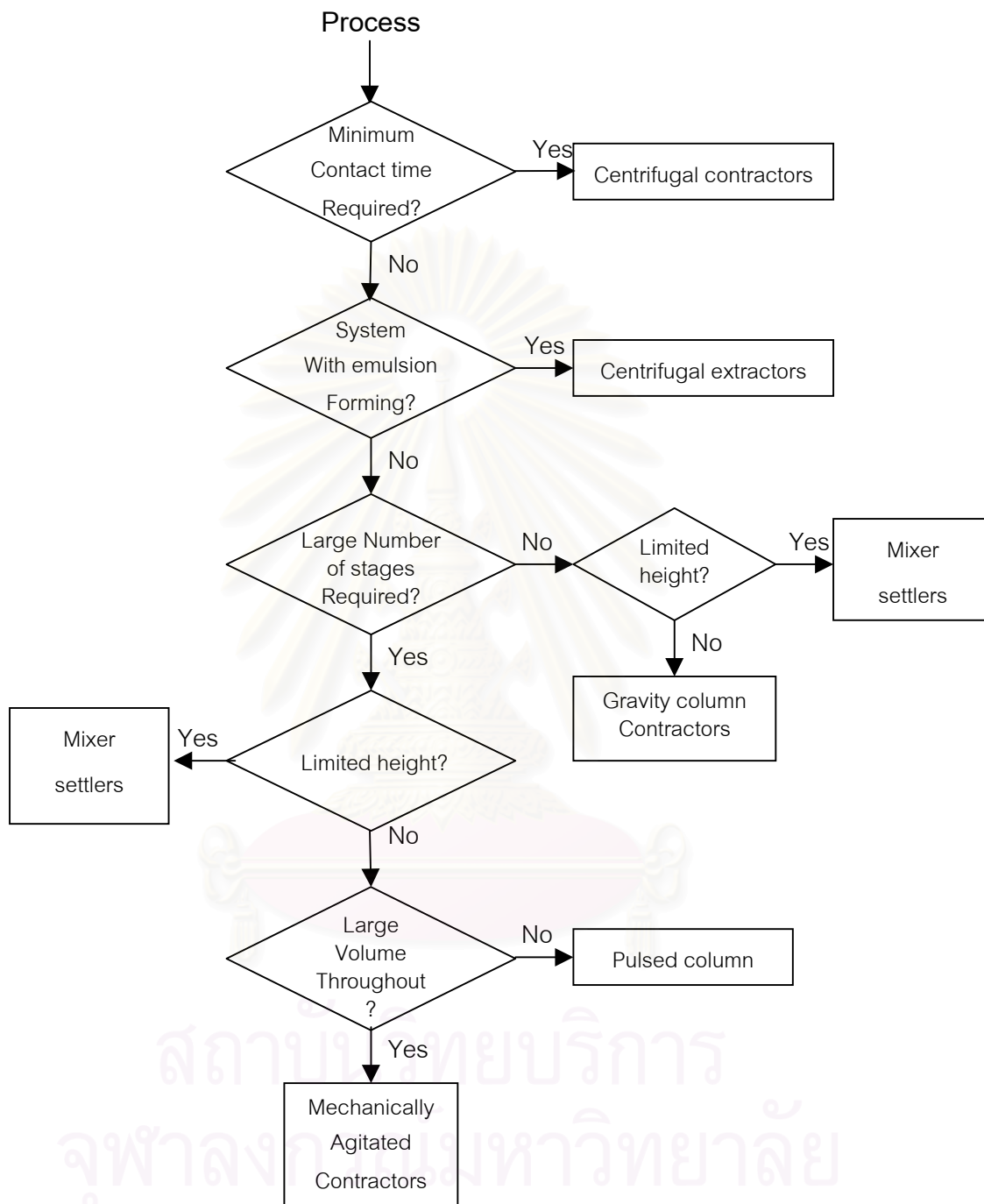
และพบว่าเครื่องมือในการสกัดประเภทต่างๆ ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายจะมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันตามลักษณะและการทำงานของเครื่อง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.2.1 เครื่องสกัดประเภทมิกเซอร์เซตเลอร์ (Mixer Settlers)

การทำงานของเครื่องสกัดประเภทมิกเซอร์เซตเลอร์แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2.3 คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของการผสม (Mixer) ซึ่งใช้พลังงานกลหรือพลังงานลมเพื่อให้วัฏภาคหนึ่งกระจายเข้ากับอีกวัฏภาคหนึ่ง โดยทั้งสองวัฏภาคจะไม่ละลายซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของตัวทำละลายระหว่างวัฏภาคทั้งสองขึ้น และส่วนของการแยกพัก (Settler) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้วัฏภาคทั้งสองแยกชั้นจากกัน การติดตั้งเครื่องสกัดประเภทนี้อาจติดตั้งในแนวตั้งหรือแนวระดับแล้วให้มีการไหลแบบสวนทางภายในหรือระหว่างอุปกรณ์ ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบคือ สมบัติของวัฏภาครูปร่างของช่องผสมและช่องการแยกพัก พลังงานที่ให้แกตัวกวน และลักษณะภายในของช่องผสมและช่องแยก



รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องสกัดประเภทมิกเซอร์เซตเลอร์ (Alegrat, 1988)



รูปที่ 2.4 แสดงหลักการเลือกเครื่องมือในการสกัดด้วยตัวทำละลาย

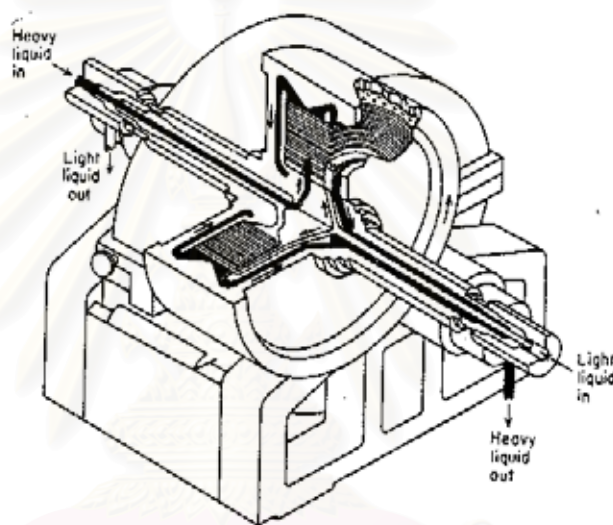
(Hines and Maddox, 1985)

เครื่องมือในการสกัด	ข้อดี	ข้อด้อย
มิกเซอร์เซตเลอร์	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการผสมได้ดี - ใช้งานได้ดีกับอัตราส่วนอัตรา การไหลในช่วงกว้าง - ใช้งานได้กับห้องที่มีเพดานต่ำ - มีประสิทธิภาพสูง - สามารถใช้หลายขั้นตอนได้ - ขยายขนาด (Scale up) ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ได้เฉพาะงานที่มีปริมาณ มาก - ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องสูง - ค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง - ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก - จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบลมใน ช่วงต่อระหว่างขั้นตอน
ประเภทใช้แรงเหวี่ยงจากจุด ศูนย์กลาง	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้กับระบบที่มีความแตกต่าง ของความหนาแน่นต่ำได้ - ใช้งานได้กับงานที่มีปริมาณน้อย - ใช้เวลาในการสกัดสั้น - ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องมีราคาแพง - ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องสูง - ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา สูง - มีข้อจำกัดในระบบที่ทำงาน หลายขั้นตอน
หอสกัดที่ไม่ใช้พลังงานกล มาเพิ่มอัตราการสกัด	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องมีราคาถูก - ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องต่ำ - สร้างง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> - มีข้อจำกัดในระบบที่มีความ ต่างของความหนาแน่นต่ำ - ไม่สามารถใช้อัตราส่วนอัตรา การไหลสูงได้ - เพดานห้องต้องสูง - บางครั้งมีประสิทธิภาพต่ำ - ขยายขนาดได้ยาก
หอสกัดที่ใช้พลังงานกลมา เพิ่มอัตราการสกัด	<ul style="list-style-type: none"> - มีการกระจายของหยดดี - ค่าใช้จ่ายปานกลาง - สามารถใช้หลายขั้นตอนได้ - ขยายขนาดได้ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> - มีข้อจำกัดในระบบที่มีความ ต่างของความหนาแน่นต่ำ - ไม่สามารถใช้กับระบบที่เกิด อิมัลชันได้ - ไม่สามารถใช้อัตราส่วนอัตรา การไหลสูงได้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเครื่องมือสกัดชนิดต่างๆ ในกระบวนการ สกัดด้วยตัวทำละลาย (Seader and Henley, 1998)

2.2.2 เครื่องสกัดประเภทใช้แรงเหวี่ยงจากจุดศูนย์กลาง (Centrifugal Extractors)

เครื่องสกัดประเภทใช้แรงเหวี่ยงจากจุดศูนย์กลางมีหลักการทำงานโดยวัฏภาคหนึ่งกระจายและไหลสวนทางกับอีกวัฏภาคหนึ่ง โดยอาศัยแรงเหวี่ยงจากจุดศูนย์กลางที่เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบคือ สมบัติของวัฏภาค รูปทรงเรขาคณิตของเครื่อง ลักษณะภายในของเครื่อง และความแรงของการหมุน

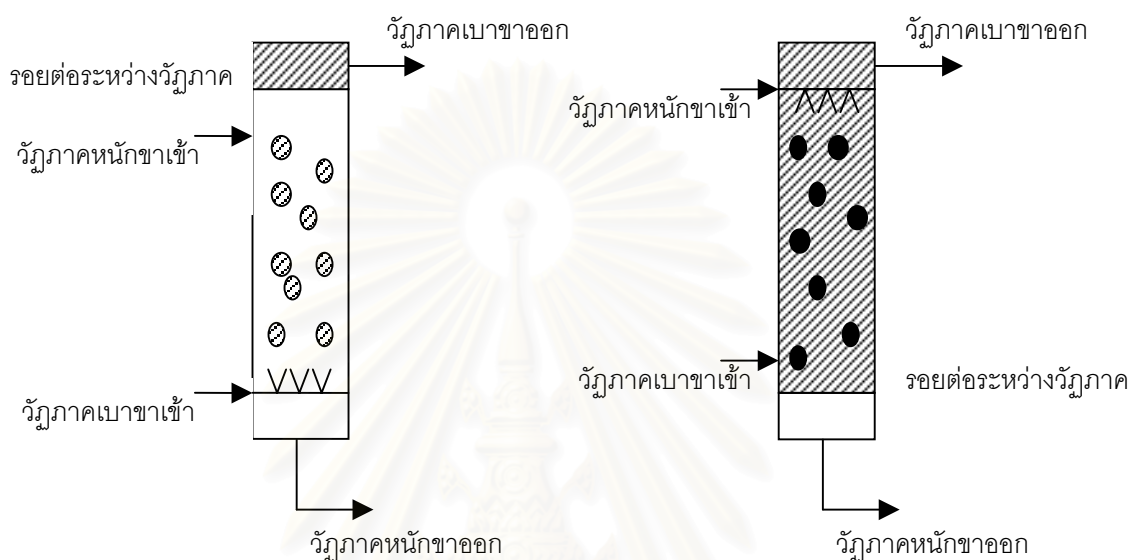


รูปที่ 2.5 แสดงเครื่องสกัดประเภทใช้แรงเหวี่ยงจากจุดศูนย์กลาง (Treybal, 1981)

2.2.3 เครื่องสกัดประเภทหอสกัด (Extraction Columns)

เครื่องสกัดประเภทหอสกัดภายในประกอบด้วยวัฏภาคหนึ่งจะกระจายจะกระจายเป็นหยดของเหลวเรียกว่า วัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) และไหลสวนทางกับอีกวัฏภาคหนึ่งซึ่งเรียกว่า วัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและความแตกต่างของความหนาแน่นของทั้งสองวัฏภาค วัฏภาคที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าหรือเรียกว่า วัฏภาคเบา (Light phase) จะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของหอและไหลไปทางด้านบนของหอ สัมผัสกับวัฏภาคที่มีความหนาแน่นมากกว่าหรือเรียกว่า

วัฏภาคหนัก (Heavy phase) ซึ่งจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของหอและตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง โดยภายในหอจะเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ขึ้น ตำแหน่งของรอยต่อระหว่างวัฏภาคขึ้นกับการกำหนดให้วัฏภาคที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าหรือมากกว่าเป็นวัฏภาคกระจาย ดังแสดงในรูปที่ 2.6



ระบบที่มีวัฏภาคเบาเป็นวัฏภาคกระจาย

ระบบที่มีวัฏภาคหนักเป็นวัฏภาคกระจาย

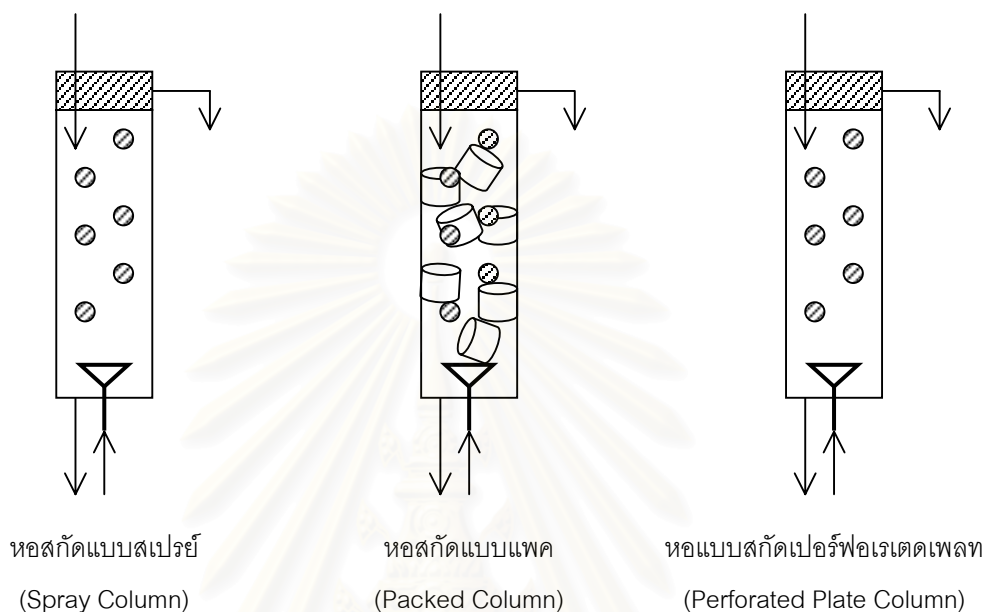
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการไหลและตำแหน่งของรอยต่อระหว่างวัฏภาคในหอสกัด

หอสกัดชนิดต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งชนิดได้ตามลักษณะการใช้พลังงานกลจากภายนอกได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้ (วรพัฒน์ อรรถยุติ, 2526)

2.2.3.1 ชนิดไม่ใช้พลังงานกลมาเพิ่มอัตราการสกัด

เป็นหอสกัดที่มีประสิทธิภาพในการสกัดต่ำ เพราะการที่ไม่ได้เติมพลังงานกลทำให้มีหยดขนาดใหญ่ ทำให้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลสารน้อย และอัตราการสกัดย่อมน้อยลงตามไปด้วย ดังนั้นหอสกัดชนิดนี้จึงไม่ค่อยถูกนำมาใช้นัก แต่ทว่าในกรณีที่มีการสกัดกระทำได้ง่ายเป็นพิเศษ เช่น การสกัดสารจำพวก Mercaptans ที่อยู่ในวัฏภาคอินทรีย์โดยโซดาไฟ ในกรณีเช่นนี้หอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกลนี้มีความเหมาะสมมาก

หอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ได้แก่ หอสกัดแบบสเปรย์ (Spray Column) หอสกัดแบบแพค (Packed Column) และหอสกัดแบบเปอร์ฟอเรตเตดเพลท (Perforated Plate Column) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แสดงหอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล

2.2.3.2 ชนิดใช้พลังงานกลมาเพิ่มอัตราการสกัด

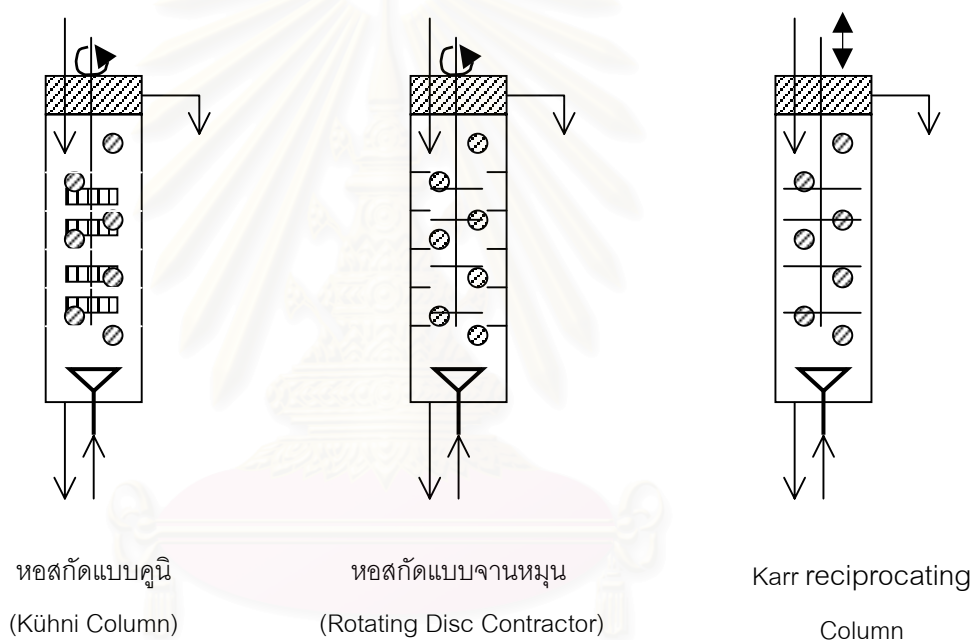
เป็นหอสกัดชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง มีความนิยมใช้กันมากกว่าหอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล พลังงานกลที่ใช้จะอยู่ในรูปของการกวนหรือการเขย่า ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของหยดในหอสกัด ช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล ดังนั้นประสิทธิภาพการสกัดของหอชนิดนี้จะดีกว่าหอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล

1) ชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุน (Rotation)

หอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุน จะมีแกนหมุนติดดิสก์หรือจาน (Disc) หรืออิมเพลเลอร์ (Impeller) หรือเทอร์ไบน์ (Turbine) ทำ

หน้าที่กวนให้สารกระจายเป็นหยดของเหลว เมื่อสัมผัสกับดิสก์ที่กำลังหมุนอยู่จะถูกเหวี่ยงออกไปทำให้หยดกระจายออกเป็นหยดเล็กๆ มีผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารเพิ่มมากขึ้น การปรับความเร็วของแกนหมุนสามารถกำหนดพื้นที่ถ่ายเทมวลสารได้ ทำให้สามารถเพิ่มหรือลดประสิทธิภาพของเครื่องได้

หอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ได้แก่ หอสกัดแบบคูนิ (Kühni column) หอสกัดแบบจานหมุน (Rotating Disc Contractor, RDC) และหอสกัดแบบคาร์ (Karr column) เป็นต้น

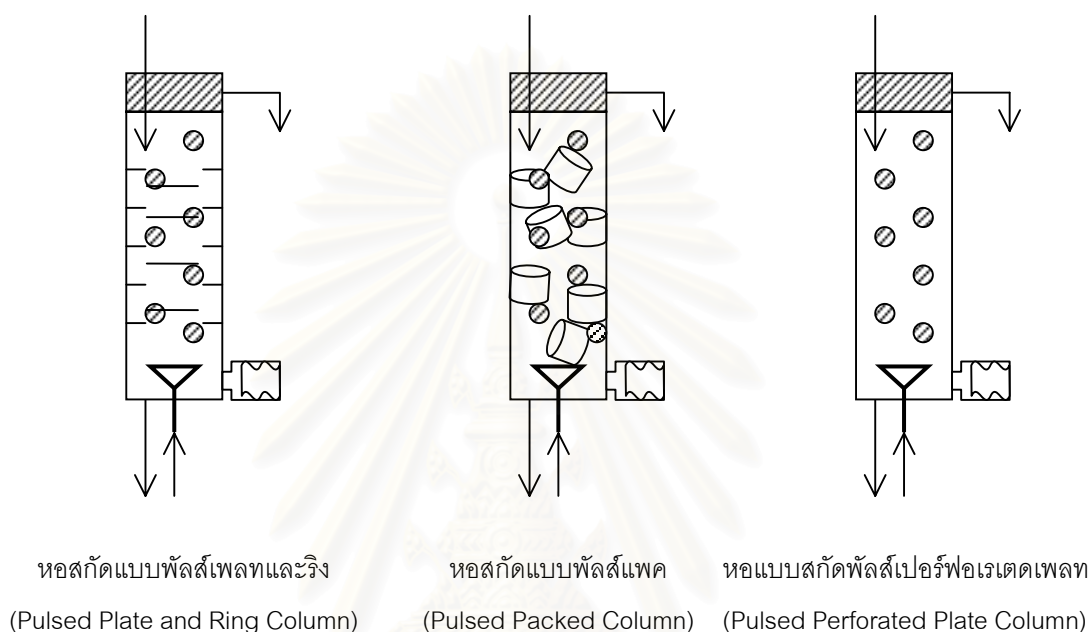


รูปที่ 2.8 แสดงหอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุน

2) ชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่า (Pulsation)

หอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่ามีการทำงานคล้ายการเขย่าเป็นจังหวะ หอชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแกนหมุน แต่ในเวลาเดียวกันก็สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยมากกว่า โดยประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของหอแบบเขย่านี้ทำให้สามารถสร้างหอได้สั้นกว่าหอสกัดแบบแกนหมุน

หอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่า ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ได้แก่ หอสกัดแบบพัลส์แพค (Pulsed packed column) หอสกัดแบบพัลส์เพลทและริง (Pulsed plate and ring column) และหอแบบสกัดพัลส์เปอร์ฟอเรตเตดเพลท (Pulsed perforated plate column) เป็นต้น



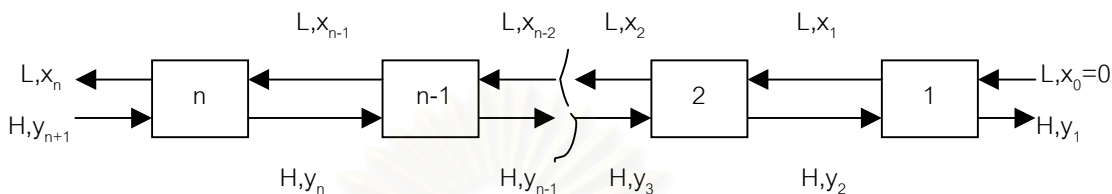
รูปที่ 2.9 แสดงหอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่า

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งแยกชนิดของหอสกัดตามลักษณะการทำงานภายในได้เป็น 2 แบบ คือ เครื่องสกัดแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential contactor) และเครื่องสกัดแบบขั้น (Staged extractor) โดยที่เครื่องสกัดแบบดิฟเฟอเรนเชียลจะคิดเป็นลักษณะคล้ายกับการดูดซึมของแก๊ส ส่วนเครื่องสกัดแบบขั้นจะขึ้นกับแนวคิดที่พัฒนามาจากหอกลั่น

2.3 การสกัดแบบขั้น (Staged Extraction) (Cussler, 1997)

การสกัดแบบขั้นพบได้ในเครื่องสกัดประเภทมิกเซอร์เซตเลอร์และหอสกัดที่ประกอบด้วยเทรย์ โดยการสกัดแบบนี้ ใช้แนวคิดเดียวกับขั้นตอนสมดุลในหอกลั่น ในรูปที่ 2.10 เป็นการสกัด

แบบหลายชั้นตอนที่มีการไหลแบบสวนทางกัน โดยกำหนดให้ H และ L เป็นฟลักซ์ของสารป้อนและสารสกัด ตามลำดับ y และ x เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เจือจาง ซึ่งถ่ายเทจากสารป้อนไปยังสารสกัด



รูปที่ 2.10 แสดงการสกัดแบบหลายชั้นตอนที่มีการไหลแบบสวนทางกัน

เมื่อตัวถูกละลายมีความเจือจาง เส้นสมดุลจะเป็นเส้นตรงมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\text{ชั้นตอนที่ } n \quad y_n = mX_n \tag{2.1}$$

และสมดุลมวลในชั้นตอนที่ 1 ได้ดังนี้

$$Hy_2 + L(0) = Hy_1 + Lx_1 \tag{2.2}$$

นำมารวมกับความสัมพันธ์ของเส้นสมดุลได้เป็น

$$y_2 = \left(1 + \frac{L}{mH}\right)y_1 = \left(1 + \frac{1}{E}\right)y_1 \tag{2.3}$$

เมื่อ $E = \frac{mH}{L}$ เป็นแฟกเตอร์การสกัด (Extraction factor) และทำการสมดุลมวลในชั้นตอนที่ 2 ได้ดังนี้

$$Hy_3 + Lx_1 = Hy_2 + Lx_2 \tag{2.4}$$

โดยสามารถจัดสมการใหม่ได้คือ

$$\begin{aligned} y_3 &= \left(1 + \frac{1}{E}\right)y_2 - \frac{1}{E}y_1 \\ &= \left(1 + \frac{1}{E} + \frac{1}{E^2}\right)y_1 \end{aligned} \quad (2.5)$$

ในขั้นตอนที่ N จะได้รับความเข้มข้นดังนี้

$$\begin{aligned} y_{N+1} &= \left(1 + \frac{1}{E} + \frac{1}{E^2} + \dots + \frac{1}{E^N}\right)y_1 \\ &= \left[\frac{\frac{1}{E^{N+1}} - 1}{\frac{1}{E} - 1}\right]y_1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.3.1 เครื่องสกัดแบบจานหมุน (Rotating disc contactor, RDC) (สมิทธิ์ ฉัตรภูติ, 2542)

เครื่องสกัดแบบจานหมุน (RDC) ได้มีการนำมาใช้เป็นเวลานานมาแล้ว โดยจัดอยู่ในประเภทเครื่องมือสกัดที่มีการกวนผสม (Agitated extractors) เครื่องสกัดแบบจานหมุนแบ่งออกเป็นห้องๆ หรือคอมพาร์ตเมนต์ (Compartments) โดยวงแหวนในแนวรอบที่ขนานกัน (Stator rings) ทำหน้าที่เป็นตัวกีดขวางการไหลในแนวรัศมี (Annular baffle) และภายในแต่ละคอมพาร์ตเมนต์จะมีการผสมเกิดขึ้นโดยการหมุนของตัวจานหมุนที่เรียงตัวเป็นชั้นๆ ในแนวขนานและมีตำแหน่งอยู่ตรงกลางของคอลัมน์ซึ่งต่อกับแกนมอเตอร์ แผ่นจานหมุน (Rotor disc) นี้มีลักษณะเป็นแผ่นแบนและเรียบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าตัววงแหวนทำให้การประกอบทำได้ง่าย และเครื่องสกัดแบบจานหมุนสามารถเพิ่มอัตราการสกัดได้มากขึ้น เนื่องจากการหมุนของจานเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนระหว่างสารป้อนกับตัวทำละลายทำให้มีการถ่ายเทมวลสารดีขึ้น โดยทำให้ของเหลวชนิดหนึ่งกระจายเป็นหยดเล็กๆ เรียกว่า วัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) เคลื่อนที่ในอีกของเหลวหนึ่งที่ไม่กระจายตัวเรียกว่า วัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) ได้อย่างสะดวก ถ้าปราศจากการหมุนของจานหมุน หยดของเหลวจะถูกกักค้างอยู่ในคอมพาร์ตเมนต์ได้ การหมุนของจานทำให้หยดของเหลวถูกฉีกเป็นหยดเล็กกลึง (Rupture) ส่งผลให้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลสาร

ระหว่างวัฏภาคสูงขึ้นไป อย่างไรก็ตามเมื่อหยดของเหลวแต่ละหยดเข้าใกล้กันและรวมตัวกันเป็นหยดใหญ่ขึ้น (Coalescence) ทำให้มีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลสารลดลงไปด้วยเช่นเดียวกัน

2.3.2 เครื่องสกัดแบบจานหมุนมีรู (Perforated Rotating Disc Column, PRDC) (Coimbra, Mojola and Meirelles, 1998: 277-280)

หอสกัดแบบจานหมุนมีรู เป็นหอสกัดของเหลวด้วยของเหลวอีกชนิดหนึ่งซึ่งสามารถสร้างได้โดยง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อยในการดำเนินงาน โดยถูกพัฒนามาจากหอสกัดแบบจานหมุนซึ่งถูกสร้างโดย Reman ในปี ค.ศ.1951 หอสกัดแบบจานหมุนมีรูนี้ถูกนำมาใช้ศึกษาในระบบที่มีแรงตึงผิวปานกลาง การกวนจะทำให้หยดเกิดการกระจายตัวมากขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวของหยดยากขึ้น จึงทำให้มีเวลาในการจับตัวกัน ซึ่งจะให้อัตราการถ่ายเทมวลมากขึ้น ดังนั้นหอสกัดแบบจานหมุนมีรู จึงถูกนำมาใช้กับระบบที่มีความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพ โดยที่ผ่านมามีนักวิจัยอยู่หลายกลุ่มที่นำหอสกัดแบบจานหมุนมีรูมาใช้ในการศึกษาวิจัย อาทิเช่น Tambourgi และ Pereira ใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของหอในปี ค.ศ.1993 Porto และคณะ ใช้เพื่อศึกษาการสกัดในระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค (Aqueous two phase system) ในปี ค.ศ.1997 (Porto et al.,1997) Coimbra, Mojola และ Meirelles ใช้เพื่อศึกษาไฮลด์อัฟของวัฏภาคกระจายในระบบสารละลายน้ำสองวัฏภาค ในปี ค.ศ.1998 (Coimbra, Mojola and Meirelles,1998: 277-280) นอกจากนี้ Pina และ Meirelles ยังนำหอสกัดแบบจานหมุนมีรูมาใช้เพื่อศึกษาการลดกรดในน้ำมันข้าวโพด ในปี ค.ศ.2000 (Pina and Meirelles, 2000)

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมมีแนวโน้มในการใช้หอสกัดที่มีการกวนในเชิงกลมากขึ้น ในกรณีที่ระบบมีค่าแรงตึงผิวที่สูงหรือต่ำ โดยประสิทธิภาพของหอสกัดนี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของสาร, ทิศทางการถ่ายเทมวล, ความเร็วรอบการกวนและลักษณะภายในของหอทางเรขาคณิต

2.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass Transfer Coefficient) (ปิยะสาร ประเสริฐธรรม, 2536)

2.4.1 อัตราการถ่ายเทมวล (Rate of Mass Transfer)

อัตราการถ่ายเทมวล คือ ผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับพื้นที่ที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทมวลและแรงขับ ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$N_A = Ak(-\Delta\theta) \quad (2.7)$$

โดยที่ N_A คือ อัตราการถ่ายเทมวลของสาร A
 A คือ พื้นที่ที่อยู่ระหว่างการถ่ายเทมวล
 k คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
 $(-\Delta\theta)$ คือ แรงขับหรือผลต่างของความเข้มข้นของสาร

หมายเหตุ

1. หน่วยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลขึ้นอยู่กับหน่วยของความเข้มข้นของสาร, พื้นที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทมวล และหน่วยของอัตราการถ่ายเทมวล
2. ในของเหลว ความเข้มข้นอาจอยู่ในรูปของเศษส่วนโมล (Mole fraction) หรือโมลต่อปริมาตร เป็นต้น ดังนั้นค่า $(-\Delta\theta)$ อาจอยู่ในรูปของ $(-\Delta x, -\Delta y)$ หรือ $(-\Delta c)$ ก็ได้ โดยที่ x และ y คือเศษส่วนโมล และ c คือความเข้มข้นที่มีหน่วยโมลต่อปริมาตร

ในระบบของการสกัดของเหลวด้วยของเหลวที่ประกอบด้วย 2 วัฏภาคที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน คือวัฏภาคกระจาย (d) และวัฏภาคต่อเนื่อง (c) สามารถเขียนสมการอัตราการถ่ายเทมวลได้ดังนี้

$$N_A = Ak_d(y_{AG} - y_{Ai}) = Ak_c(x_{AG} - x_{Ai}) \quad (2.8)$$

2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่และค่ารวม

ในการหาค่าอัตราการถ่ายเทมวล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ (Local mass transfer coefficient) ซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคกระจาย หรือ k_d และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคต่อเนื่อง หรือ k_c มักจะหาได้จากสมการที่สร้างขึ้นจากการทดลอง (Empirical formulars) แต่ค่าความเข้มข้นที่ผิวสัมผัส y_{Ai} และ x_{Ai} มักจะไม่ทราบค่า ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ จึงจำเป็นต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเฉพาะที่ (Overall local mass transfer coefficient) มาใช้แทน โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่และค่ารวม ซึ่งสามารถเป็นแสดงสมการได้ดังนี้

$$1/k_{od} = 1/k_d + m'/k_c \quad (2.9)$$

$$1/k_{oc} = 1/k_c + 1/m''k_d \quad (2.10)$$

ในกรณีที่สารละลายเป็นแบบเจือจาง (Dilute solution) เส้นโค้งสมดุลจะกลายเป็นเส้นตรง ดังนั้น ความชัน $m' = m'' = m$ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ ดังนี้

$$1/k_{od} = 1/k_d + m/k_c \quad (2.11)$$

$$1/k_{oc} = 1/k_c + 1/mk_d \quad (2.12)$$

ซึ่ง m (partition coefficient) สามารถหาได้จากกฎของเฮนรี (Henry's law) ซึ่งกำหนดได้ดังนี้

$$y_n^* = mx_n \quad (2.13)$$

สำหรับกรณีเฉพาะของสมการ (2.11) และ (2.12) มีดังนี้

ก. สำหรับกรณีที่ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นกระจายมีค่ามากๆ จะพบว่าค่า $1/k_d$ มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า $1/k_c$ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$1/k_{od} = 1/k_d \quad (2.14)$$

$$1/k_{oc} = 1/mk_c \quad (2.15)$$

ข. กรณีที่ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นต่อเนื่องมีค่ามากๆ จะพบว่าค่า $1/k_c$ มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า $1/k_d$ และสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$1/k_{oc} = 1/k_c \quad (2.16)$$

โดยขีดจำกัดของความต้านทานของการถ่ายเทมวลส่วนใหญ่จะขึ้นกับค่า m มีค่ามากกว่า 1 มาก อัตราการสกัดจะถูกควบคุมโดยการถ่ายเทมวลในวัฏภาคสารป้อน ซึ่งจะ

พบได้ทั่วไปในระบบของการสกัดด้วยตัวทำละลาย และถ้า m มีค่าน้อยกว่า 1 มาก อัตราการสกัดจะถูกควบคุมโดยการถ่ายเทมวลในวัฏภาคของตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารสกัด ซึ่งพบได้ทั่วไปในระบบของการดูดซึม (Absorption) (Cussler, 1997)

2.4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ (Thornton, 1992)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่ทั้งในวัฏภาคกระจาย และวัฏภาคต่อเนื่อง สามารถหาได้โดยการทดลองหรือจากสูตรโดยประสบการณ์ของนักวิจัยหลายๆท่านโดยอาศัยข้อมูลการถ่ายเทมวลในหลายๆ ระบบมารวบรวมสร้างสมการขึ้น การเลือกใช้สมการควรใช้สมการที่มีภาวะการทดลองที่ใกล้เคียงกับภาวะของจริงที่จะออกแบบเครื่องมือแยกสาร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นจะหาได้จากการถ่ายเทมวลในภาวะต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในหอสกัด ดังต่อไปนี้

(1) การถ่ายเทมวลเนื่องจากการเกิดของหยด (Drop Formation)

จากงานวิจัยของ Skelland และ Minhas ในปี ค.ศ. 1971 ซึ่งได้ทำการวัดอัตราการถ่ายเทมวลในช่วงระหว่างการเกิดของหยดในระบบที่ควบคุมโดยวัฏภาคกระจาย ดังนี้

$$k_{d,f} = 0.0432 \frac{d_p}{t_f} \left(\frac{V_0^2}{d_p g} \right)^{0.089} \left(\frac{d_p^2}{t_f D_{AB,d}} \right)^{-0.334} \left(\frac{\mu_d}{(\rho_d d_p \gamma)^{1/2}} \right)^{-0.601} \quad (2.17)$$

โดยที่

$$t_f = \left(\frac{\pi d_p^3}{6} \right) \left(\frac{N_0}{Q_d} \right)$$

และจากงานวิจัยของ Skelland และ Hemler ในปี ค.ศ. 1969 ได้ให้ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคต่อเนื่องไว้ ดังนี้

$$k_{c,f} = 0.386 \left(\frac{D_{AB,c}}{t_f} \right)^{0.5} \left(\frac{\rho_c \gamma}{\Delta \rho g t_f \mu_c} \right)^{0.407} \left(\frac{g t_f^2}{d_p} \right)^{0.148} \quad (2.18)$$

(2) การถ่ายเทมวลเนื่องจากการลอยตัวของหยด (Drop Rise)

พฤติกรรมของหยดขณะลอยตัวมีหลายแบบซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่แตก

ต่างกัน ดังต่อไปนี้

1) Rigid Drop

-ในวัฏภาคกระจาย

$$k_{d,r} = -\frac{d_p}{6t} \ln \left[1 - \frac{\pi D^{1/2} t^{1/2}}{d_p / 2} \right] \quad (2.19)$$

-ในวัฏภาคต่อเนื่อง

$$k_{c,r} = 0.74 (d_c / d_p) (N_{Re})^{0.5} (N_{Sc})^{1/3} \quad (2.20)$$

สมการนี้ได้จากงานวิจัยของ Skelland และ Cornish ในปี ค.ศ. 1963

2) Circulating Drop

-ในวัฏภาคกระจาย

$$k_{d,r} = 31.4 \frac{D_{AB,d}}{d_p} \left(\frac{4D_{AB,d}t}{d_p^2} \right)^{-0.34} \left(\frac{\mu_d}{\rho_d D_{AB,d}} \right)^{-0.125} \left(\frac{d_p V_s^2 \rho_c}{\gamma} \right)^{0.37} \quad (2.21)$$

-ในวัฏภาคต่อเนื่อง

$$k_{c,r} = 0.6 (D_c / d_p) N_{Re}^{0.5} N_{Sc}^{0.5} \quad (2.22)$$

สมการนี้ได้จากงานวิจัยของ Garner และ Tayeban ในปี ค.ศ. 1960

3) Oscillation Drop

เกณฑ์ในการพิจารณาว่าพฤติกรรมของหยดในระบบการสกัดนั้นมีพฤติกรรมเป็นแบบ oscillation drop มีอยู่หลายแบบให้เลือกใช้ ดังนี้

1. $N_{we} > 3.58; N_{we} = d_p V_t^2 \rho_c / \gamma$ (Hu และ Kintner ปี ค.ศ.1955)
2. $d_p > 0.33 \mu_c^{0.3} \gamma^{0.24} / \rho_c^{0.14} \Delta \rho^{0.43} \text{ cm}$ (Klee และ Treybal ปี ค.ศ.1956)
3. $N_{Re,c} / N_{PG}^{0.15} > 20; N_{Re,c} = d_p V_t \rho_c / \mu_c, N_{PG} = \rho_c^2 \gamma^3 / g \mu_c^4 \Delta \rho$ (Johnson และ Braida ปี ค.ศ.1957)
4. $d_p > 0.162 (\rho_d / \Delta \rho)^{0.5} \text{ cm}$ (Edge และ Grant ปี ค.ศ. 1971)
5. $H > 59.3; H = \left(\frac{4}{3}\right) N_{EO} M^{-0.149} \left(\frac{\mu_c}{\mu_w}\right)^{-0.14}; N_{EO} = \frac{g \Delta \rho d_p^2}{\gamma}$ (Grace et al. ปี ค.ศ.1976)

-ในวัฏภาคกระจาย

$$k_{d,r} = \frac{0.00375 V_t}{(1 + \mu_d / \mu_c)} \quad (2.23)$$

สมการนี้ได้จากงานวิจัยของ Handlos และ Bavon ในปี ค.ศ. 1955 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้กันมาก

-ในวัฏภาคต่อเนื่อง

$$k_{c,r} = \left(\frac{D_{AB,c}}{d_p}\right) (50 + 0.0085 N_{Re}^{1.0} N_{Sc}^{0.7}) \quad (2.24)$$

สมการนี้ได้จากงานวิจัยของ Garner และ Tayeban ในปี ค.ศ. 1960

- 4) การถ่ายเทมวลเนื่องจากการลอยตัวของหยด ในระบบที่มีการกวนในวัฏภาคต่อเนื่อง

$$\frac{k_{c,r} d_p}{D_{AB,c}} = 1.237 (10^{-5}) \left(\frac{\mu_c}{\rho_c D_{AB,c}} \right)^{1/3} \left(\frac{d^2 N \rho_c}{\mu_c} \right)^{2/3} \left(\frac{d N^2}{g} \right)^{5/12} \left(\frac{d}{d_p} \right)^2 \left(\frac{d_p}{D} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_d d_p^2 g}{\gamma} \right)^{5/4} \phi^{-1/2} \quad (2.25)$$

1) การถ่ายเทมวลเนื่องจากการรวมตัวของหยด (Drop Coalescence)

-วิธภาคการกระจาย

$$k_{d,co} = 0.173 \frac{d_p}{t_f} \left(\frac{\mu_d}{\rho_d D_{AB,d}} \right)^{-1.115} \left(\frac{\Delta \rho g d_p^2}{\gamma} \right)^{1.302} \left(\frac{V_s^2 t_f}{D_{AB,d}} \right)^{0.146} \quad (2.26)$$

สมการนี้ได้จากงานวิจัยของ Skelland และ Minhas ในปี ค.ศ. 1971

-วิธภาคต่อเนื่อง

$$k_{c,co} = 5.956 (10^{-4}) \left(\frac{D_c}{t_f} \right)^{0.5} \left(\frac{\rho_c V_s^3}{g \mu_c} \right)^{0.332} \left(\frac{d_p^2 \rho_c \rho_d V_s^3}{\mu_d \gamma} \right)^{0.525} \quad (2.27)$$

สมการนี้ได้จากงานวิจัยของ Skelland และ Hemler ในปี ค.ศ. 1969

2.5 โฮลด์อัฟ (Hold up) (สมิทธิ์ ฉัตรภูติ, 2542)

สัดส่วนโดยปริมาตรของแต่ละวิธภาคที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์หรือหอ เรียกว่า วิธภาคโฮลด์อัฟ (Phase holdup) หรือเรียกว่า โฮลด์อัฟ (ϕ) โดยทั่วไปภายในระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย จะมีความสัมพันธ์ของโฮลด์อัฟ ดังนี้

$$\phi_c + \phi_d = 1 \quad (2.28)$$

หรือในรูปทั่วไป คือ

$$\sum \phi_i = 1 \quad (2.29)$$

ไฮลด์อัฟเป็นสิ่งที่เป็ประโยชน์ ซึ่งอาจเป็นสัดส่วนปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ที่ครอบครองด้วยวัฏภาคสารสกัด หรือวัฏภาคที่ทำปฏิกิริยา สัดส่วนของวัฏภาคแก๊สในระบบสองวัฏภาคและอื่นๆ โดยเป็นค่าที่กำหนดค่าต่างๆ เช่น ค่าทางไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamics) พื้นที่รอยต่อระหว่างผิว (Interfacial area) ภาวะการไหล (Flow conditions) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient) และค่าอื่นๆ และสังเกตได้ว่าอัตราส่วนของอัตราการป้อนของวัฏภาคที่แตกต่างกันในเครื่องปฏิกรณ์หรือหอ โดยทั่วไปแล้วจะมีความแตกต่างจากสัดส่วนโดยปริมาตรที่ครอบครองโดยวัฏภาคเหล่านี้ในสถานะคงตัว (Steady state) ที่วัฏภาคทั้งหมดมีความเร็วเชิงเส้นเท่ากัน และเครื่องปฏิกรณ์มีการกวนผสมแบบสมบูรณ์

ค่าไฮลด์อัฟโดยทั่วไปในระบบการสกัดด้วยตัวทำละลายจะกำหนดให้เป็นสัดส่วนของปริมาตรของเฟสกระจายต่อปริมาตรทั้งหมด ซึ่งอาจเขียนได้ดังนี้

$$\phi = \frac{V_d}{V_T} \quad (2.30)$$

เมื่อ V_d และ V_T เป็นปริมาตรของวัฏภาคกระจายและปริมาตรทั้งหมด ตามลำดับ

โดยค่าไฮลด์อัฟในหอสกัดแบบจานหมุน (Rotating disc column) สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ต่างๆ ที่มีผู้ศึกษามาก่อนแล้ว ดังนี้

- (1) จากงานวิจัยของ Laddha, Degaleesan และ Kannappan (Ladda, Degalessan and Kannappan, 1978) ได้ให้ความสัมพันธ์ของ Characteristic velocity ในหอสกัดแบบจานหมุน ดังนี้

$$\frac{V_o}{\left[\left(\frac{\gamma \Delta \rho g}{\rho_c^2} \right)^{1/4} G_f \right]} = 1.46 \left[F_r (\psi_2)^{1/2} \right]^{0.08} \quad (2.31)$$

$$\text{โดยที่ } G_f = \left[\left(\frac{h}{d} \right)^{0.9} \left(\frac{d_s}{d} \right)^{2.1} \left(\frac{d}{d_T} \right)^{2.4} \right]$$

$$F_r = \frac{g}{d N^2}$$

$$\psi_2 = \left[\left(\frac{\gamma^3 \rho_c}{\mu_c g} \right)^{1/4} \left(\frac{\Delta p}{\rho_c} \right)^{0.6} \right]$$

โดยสมการนี้ใช้ได้ทั้งระบบที่มีการถ่ายเทมวลจากวัฏภาคกระจายไปวัฏภาคต่อเนื่อง และจากวัฏภาคต่อเนื่องไปวัฏภาคกระจาย ที่ภาวะการปั่นกววนต่ำหรือที่การถ่ายเทของตัวถูกละลายจากวัฏภาคต่อเนื่องไปวัฏภาคกระจายภายใต้ภาวะ ดังนี้

$$(F_r)(\psi_2)^{1/2} > 25$$

จากค่า Characteristic velocity สามารถหาค่าไฮลด์ลัฟได้จากสมการของ Grayler ที่แสดงความสัมพันธ์ของค่า Characteristic velocity กับค่าไฮลด์ลัฟ (Coimbra, Mojola and Meirelles, 1998) ดังนี้

$$\frac{V_d}{\phi} + \frac{V_c}{1-\phi} = V_o(1-\phi) \quad (2.32)$$

(2) จากงานวิจัยของ Kumar และ Hartland (Kumar and Hartland, 1978) ได้ให้ความสัมพันธ์ของค่าไฮลด์ลัฟในหอสกัดแบบจานหมุน ดังนี้

$$\phi = \left[0.19 + \left[\frac{\epsilon}{g} \left(\frac{\rho_c}{g\gamma} \right)^{0.25} \right]^{0.67} \right] * \left[V_d \left(\frac{\rho_c}{g\gamma} \right)^{0.25} \right]^{0.69} * \exp \left[7.13 V_c \left(\frac{\rho_c}{g\gamma} \right)^{0.25} \right] * \left[\left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)^{-0.65} \left(\frac{\mu_d}{\mu_w} \right)^{0.14} \right] * \left[\left(\frac{d}{h} \right)^{0.62} \left(\frac{d_s^2}{D^2} \right)^{-0.26} \left[h \left(\frac{\rho_c g}{\gamma} \right)^{0.5} \right]^{-0.10} \right] \quad (2.33)$$

$$\text{โดยที่ } \epsilon = \frac{4N^3 d^5}{\pi D^2 h} \left[\frac{109.36}{Re} + 0.74 \left[\frac{1000 + 1.2 Re^{0.72}}{1000 + 3.2 Re^{0.72}} \right]^{3.30} \right] \quad (2.34)$$

โดยสมการนี้ใช้กับระบบที่มีการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคต่อเนื่องไปยังวัฏภาคกระจาย

2.6 ขนาดของหยด (Drop size)

ความรู้เรื่องขนาดของหยด เป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบหอสกัดของเหลวด้วยของเหลว ซึ่งจะมีผลต่อค่าไฮลด์อัฟของวัฏภาคกระจาย ค่า Residence time ของวัฏภาคกระจายและค่า Throughput โดยสามารถทำนายขนาดของหยดในฟังก์ชันของลักษณะทางเรขาคณิตของหอสกัด ภาวะในการกวนของระบบ สมบัติทางกายภาพของของเหลวในระบบ และทิศทางของการถ่ายเทมวล (Kumar and Hartland, 1996)

ในระบบที่ไม่มีการกวนหรือ มีการกวนความเร็วรอบต่ำ การแตกของหยดจะถูกควบคุมโดยสัดส่วนของแรงลอยตัว (Buoyancy) ต่อแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค สามารถทำนายขนาดของหยดได้ ดังนี้

$$d_{32} = c_1 (\gamma / \Delta \rho g)^{1/2} \quad (2.35)$$

เมื่อ ค่าคงที่ C_1 เป็นฟังก์ชันของลักษณะทางเรขาคณิตของหอสกัด, ทิศทางการถ่ายเทมวล และอาจจะขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของของเหลวในระบบด้วย

ในระบบที่มีการกวนปานกลางนั้นยังไม่มีทฤษฎีสำหรับผลของการแตกของหยดที่ยอมรับมากนัก และในระบบที่มีการกวนภายใต้ภาวะปั่นป่วน (Turbulent condition) หรือการกวนความเร็วรอบสูง หยดจะเกิดการแตกตัวถ้าแรงที่เกิดจากเคลื่อนไหวของวัฏภาคต่อเนื่องมากกว่าแรงประสาน (Cohesive force) ของหยด เนื่องจากแรงตึงผิวและความหนืดของวัฏภาคกระจาย

ในระบบที่มีค่าความหนืดของวัฏภาคกระจายต่ำ แรงตึงผิวจะมีความสำคัญต่อแรงประสานของหยด ซึ่งสามารถทำนายขนาดของหยดโดยสมการของ Hinze ดังนี้

$$d_{32} = c_2 \epsilon^{-0.4} (\gamma / \rho_c)^{0.6} \quad (2.36)$$

เมื่อ c_2 เป็นค่าคงที่ และเมื่อคิดผลกระทบของความหนืดของวัฏภาคกระจายด้วยนั้นสามารถทำนายขนาดของหยดโดยสมการของ Calabrese ได้ดังนี้

$$d_{32} = c_2 \epsilon^{-0.4} \left(\frac{\gamma}{\rho_c} \right)^{0.6} \left[1 + c_3 \left(\frac{\rho_c}{\rho_d} \right)^{0.5} \frac{\mu_d \epsilon^{1/3} d_{32}^{1/3}}{\gamma} \right]^{3/5} \quad (2.37)$$

โดยขนาดของหยดในหอสกัดแบบจานหมุน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่างๆ ที่มีผู้ศึกษามาก่อนแล้ว ดังนี้

- (1) จากงานวิจัยของ Marr, Husung และ Moser (Marr, Husung and Moser, 1978) ได้ให้ความสัมพันธ์ของขนาดของหยดในหอสกัดแบบจานหมุน ดังนี้

$$d_{32} / d = 0.17 (N^2 d^3 \rho_c / \gamma)^{-1/2} (Nd^2 \rho_c / \mu_c)^{0.6} \quad (2.38)$$

เมื่อ $6 * 10^3 < Re < 7 * 10^4$

$$Re = \frac{Nd^2 \rho_c}{\mu_c} \quad (2.39)$$

โดยผู้วิจัยได้ศึกษาพบว่าการทำงานภายในหอสกัดแบบจานหมุน แบ่งได้เป็น 2 ช่วงตามความเร็วรอบการกวน คือ ช่วงแรกที่มีความเร็วรอบการกวนต่ำ พบว่าขนาดของหยดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบการกวนเพียงเล็กน้อย และหอสกัดทำงานในลักษณะของหอสกัดแบบสเปรย์ (Spray column) และช่วงที่สองเกิดขึ้นที่ความเร็วรอบการกวนที่ค่าสูง $6 * 10^3 < Re < 7 * 10^4$ ซึ่งจะพบว่า ขนาดของหยดจะแปรผกผันกับความเร็วรอบการกวน

- (2) จากงานวิจัยของ Kumar และ Hartland (Kumar and Hartland, 1986) ได้ให้ความสัมพันธ์ของขนาดหยดในหอสกัดแบบจานหมุน ดังนี้

$$d_{32} / d = 0.17 (Nd^2 \rho_c / \mu_c)^{-1.12} \left(\mu_c / \sqrt{\gamma \rho_c d} \right)^{1.38} * (\Delta \rho / \rho_c)^{-0.24} (d^2 \rho_c g / \gamma)^{-0.05} (h / d)^{0.42} \quad (2.40)$$

เมื่อ $Re \leq 50,000$

โดยสมการนี้ใช้กับระบบที่มีการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคต่อเนื่องไปยังวัฏภาคกระจาย

(3) จากงานวิจัยของ Kumar และ Hartland (Kumar and Hartland, 1996) ได้ให้ความสัมพันธ์ของขนาดหยดในหอสกัดแบบจานหมุน ดังนี้

$$\frac{d_{32}}{h} = \frac{e^{0.64}}{\left[\frac{1}{2.54 \left(\frac{\gamma}{\Delta \rho g h^2} \right)^{0.5}} + \frac{1}{0.97 \left[\left(\frac{\epsilon}{g} \right) \left(\frac{\rho_c}{g \gamma} \right)^{0.25} \right]^{-0.45} \left[h \left(\frac{\rho_c g}{\gamma} \right)^{0.5} \right]^{-1.12}} \right]} \quad (2.41)$$

โดยสมการนี้ใช้กับระบบที่มีการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคต่อเนื่องไปยังวัฏภาคกระจาย

2.7 ประสิทธิภาพของเมอร์ฟรี (Murphree Efficiency) (ปิยะสาร ประเสริฐธรรม, 2536)

ขั้นตอนหรือเทอรี หมายถึง บริเวณที่มีการสัมผัสกันระหว่างวัฏภาค ในแต่ละวัฏภาคจะประกอบด้วยสารตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไป โดยที่ในแต่ละวัฏภาคจะต้องมีสารที่เหมือนกันอย่างน้อยหนึ่งตัว สารตัวนี้โดยทั่วไปเรียกว่าตัวถูกละลาย (Solute) และจะเกิดการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคหนึ่งไปสู่อีกวัฏภาคหนึ่ง

ขั้นตอนสมดุล หมายถึง ขั้นตอนใดๆ ที่ให้เวลาในการสัมผัสกันระหว่างวัฏภาคนานพอจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในทั้งสองวัฏภาค

โดยทั่วไป มักจะสมมติให้ขั้นตอนแต่ละขั้นตอนเป็นขั้นตอนสมดุล เพื่อสามารถจะคำนวณออกแบบความสูงของหอได้ คือคำนวณหาจำนวนขั้นตอนสมดุล ซึ่งจะพบว่าขั้นตอนจริงจะมากกว่าจำนวนขั้นตอนสมดุล ประสิทธิภาพทั้งหมด (Overall Efficiency, E_o) สามารถหาได้ดังนี้

$$E_o = \text{จำนวนชั้นตอนสมดุล/จำนวนชั้นตอนจริง} \quad (2.42)$$

แต่จะพบว่าในการหาจำนวนชั้นตอนจริงรวมหาได้ยากเพราะไม่ได้แสดงความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในชั้นตอน ดังนั้นจึงมีการกำหนดประสิทธิภาพใหม่เรียกว่า ประสิทธิภาพของชั้นตอนเมอร์ฟรี (Murphree stage efficiencies) ซึ่งใช้กับชั้นตอนเดียว โดยยังมีคำจำกัดความของประสิทธิภาพแบบเฉพาะตำแหน่งเมอร์ฟรี เพื่อให้สอดคล้องกับปรากฏการณ์จริงของการถ่ายเทที่เกิดขึ้นภายในชั้นตอน แต่ประสิทธิภาพของชั้นตอนเมอร์ฟรี ทั้งสองแบบจะเท่ากัน เมื่อภายในชั้นตอนมีการกวนอย่างดี ทำให้ความเข้มข้นของสาร A เท่ากันทุกๆ จุด และสามารถหาความสัมพันธ์ของระหว่างจำนวนหน่วยถ่ายเท (Transfer unit, NTU) กับประสิทธิภาพของชั้นตอนเมอร์ฟรี ได้ดังนี้

-ในวัฏภาคกระจาย

$$E_{Md} = 1 - \exp(-NTU_{od}) \quad (2.43)$$

-ในวัฏภาคต่อเนื่อง

$$E_{Mc} = 1 - \exp(-NTU_{oc}) \quad (2.44)$$

จำนวนหน่วยถ่ายเทสามารถคำนวณตามการถ่ายเทมวลได้ดังนี้ (Krishna and Shrikant, 1989)

1) จำนวนหน่วยถ่ายเทเนื่องจากการเกิดของหยด

$$NTU_{od,f} = 6k_{od,f}t_f / d_p \quad (2.45)$$

2) จำนวนหน่วยถ่ายเทเนื่องจากการลอยตัวของหยด

$$NTU_{od,f} = \frac{6k_{od,r}h}{V_s d_p} \quad (2.46)$$

3) จำนวนหน่วยถ่ายเทเนื่องจากการรวมตัวของหยด

โดยส่วนใหญ่จะสมมติให้จำนวนหน่วยถ่ายเทมวลในการรวมตัวของหยดเป็น 10% ของจำนวนหน่วยถ่ายเทเนื่องจากการเกิดของหยด (Treybal, 1980)

$$NTU_{od,co} = 0.1NTU_{od,f} \quad (2.47)$$

โดยสามารถหาค่าประสิทธิภาพของขั้นตอนเมอร์ฟรีได้ดังนี้คือ (Krishna and Shrikant, 1989)

$$E_M = 1 - (1 - E_{Md,f})(1 - E_{Md,r})(1 - E_{Md,co}) \quad (2.48)$$

โดยที่ $E_{Md,f} = 1 - \exp(-NTU_{od,f})$

$$E_{Md,r} = 1 - \exp(-NTU_{od,r})$$

$$E_{Md,co} = 1 - \exp(-NTU_{od,co})$$

และเมื่อสมมติให้เส้นสมดุลเป็นเส้นตรงและค่าแฟกเตอร์การสกัด (Extraction factor, E_f) มีค่าเป็นคงที่ สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพรวมของเมอร์ฟรีในเครื่องสกัดแบบไหลสวนทางกันได้ดังนี้คือ

$$E_o = \frac{\ln[1 + E_M(E_f - 1)]}{\ln E_f} \quad (2.49)$$

โดยที่ $E_f = m \frac{V_d}{V_c}$

2.8 การขยายขนาด (Scaleup) (Karr, 1991: 112-119)

จากข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดลองในหน่วยนำร่อง (Pilot unit) วิศวกรสามารถที่จะประยุกต์ใช้หลักการขยายขนาดได้ โดยหลักการจะแตกต่างกันตามชนิดของเครื่อง โดยหอสกัดที่มี

การกวนสามชนิดได้แก่ หอสกัดแบบจานหมุน, หอสกัดแบบ Karr reciprocating plate และหอสกัดแบบ Scheibel นั้น มีหลักในการขยายส่วนเหมือนกัน โดยค่าความสูงของหอทดสอบ (Height of test column, HETS) ในหอขนาดเล็กจะลดลงเรื่อยๆจนกว่าการกวนจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่หอท่วม (Flooding) แต่สำหรับในหอขนาดใหญ่ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของหอใหญ่ขึ้นตามกำลังการผลิต (Throughput) ที่ต้องการมากขึ้น จะพบว่าไม่สามารถหลีกเลี่ยงการผสมย้อนกลับได้ (Back-mixing) ซึ่งเป็นสาเหตุให้มีค่า HETS ต่ำสุดที่ระดับการกวนต่ำกว่าจุดที่หอท่วม โดยสามารถสรุปวิธีการขยายขนาดได้ดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลองขนาดนำร่อง และหาค่าที่ดีที่สุดของประสิทธิภาพทางปริมาตร (Volumetric efficiency) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังการผลิตทั้งต่อค่า HETS ต่ำสุดเมื่อทำการเพิ่มและลดกำลังการผลิต
2. ขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหอโดยใช้กำลังการผลิตต่อพื้นที่หน้าตัดของหอเป็น 70-80% ของค่ากำลังการผลิตที่ดีที่สุดต่อพื้นที่หน้าตัดของหอสกัดขนาดนำร่อง
3. ใช้จำนวนหน่วยถ่ายเทเท่าเดิมกับในหอสกัดขนาดนำร่อง แล้วหาความสูงของหอได้จากสมการ

$$(HETS)_2 / (HETS)_1 = (D_2 / D_1)^{0.5} = H_2 / H_1 \quad (2.50)$$

4. ตั้งความเร็วรอบการกวนให้มีค่ากำลัง (Power) ต่อหน่วยของปริมาตรให้เหมือนกับในหอขนาดนำร่อง

2.9 สารสกัด (Extractants)

2.9.1 การเลือกสารสกัดที่เหมาะสม (Cusack, Fremeaux and Glatz, 1991: 66-76)

การเลือกสารสกัดที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นเรื่องที่ยุ่งยากในการพิจารณาสมบัติ โดยสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดด้วยตัวทำละลายนั้นควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) มีค่าการเลือกสกัดสูง มีความสำคัญมากที่สุดในกระบวนการสกัดที่เหมาะสมในการสกัดด้วยตัวทำละลาย
- 2) ง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ มีความสำคัญเกือบเท่ากับค่าการเลือกสกัด เพราะว่าในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย การแยกตัวถูกละลายออกจากตัวทำละลายมีความจำเป็น ตัวทำละลายจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์
- 3) มีความสามารถละลายซึ่งกันและกันกับสารป้อนต่ำ
- 4) มีความหนาแน่นที่แตกต่างกับสารป้อนพอสมควร ในกระบวนการสกัดโดยทั่วไป จะผสมของเหลวทั้งสองวัฏภาคเข้าด้วยกัน แล้วปล่อยให้แยกชั้น โดยแรงขับของการแยกชั้นเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่น ซึ่งควรมีความแตกต่างกันอย่างน้อย 2 % และความแตกต่างที่เหมาะสมคือมากกว่า 5 % ซึ่งจะทำให้เวลาในการแยกชั้นมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
- 5) มีแรงตึงผิวพอสมควร แรงตึงผิวมีผลกระทบท่อการผสม ในระบบที่มีแรงตึงผิวต่ำ พลังงานที่ใช้ในการกระจายหยดของสารจะมีค่าต่ำ แต่ถ้ามีค่าต่ำมากคือน้อยกว่า 1 dyne/cm จะทำให้เกิดอิมัลชันได้ง่ายซึ่งไม่สามารถแยกชั้นกันได้ในทางกลับกัน ในระบบที่มีแรงตึงผิวสูงมากคือมากกว่า 50 dyne/cm ทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการกระจายหยดของสาร และหยดก็มีแนวโน้มที่จะรวมกันใหม่ (Re-coalesce)
- 6) มีความหนืดต่ำ ในกระบวนการสกัดโดยทั่วไปควรใช้สารที่มีความหนืดน้อยกว่า 10 cp เพื่อให้ง่ายต่อการถ่ายเทมวล ในการเลือกควรเลือกสารที่มีความหนืดต่ำๆ เท่าที่จะเป็นไปได้

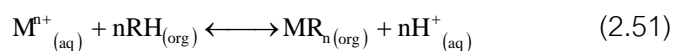
- 7) มีการกัดกร่อนต่ำ การกัดกร่อนของสารป้อนจะถูกกำหนดโดยระบบไว้อยู่แล้ว ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยการปรับภาวะของระบบทั้งอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างก็ตาม สิ่งที่พึงกระทำได้คือการเลือกสารสกัดที่กัดกร่อนน้อยกว่าสารป้อน
- 8) มีการติดไฟต่ำและมีความเป็นพิษต่ำ ถ้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงสารที่มีการติดไฟได้ การเลือกเครื่องมือและภาวะการทำงานควรพิจารณาเป็นพิเศษเพื่อลดปริมาณของสาร และถ้าสารมีความเป็นพิษสูง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงกระบวนการที่จะแยกสารสกัดออกจากระบบ
- 9) มีราคาถูกและหาได้ง่าย ในทางอุตสาหกรรมสารสกัดต้องมีราคาถูก และหาได้ง่ายในท้องตลาด

2.9.2 ชนิดของสารสกัด (Tavlarides, Bae, and Lee, 1987: 581-617)

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด ดังนี้

1) สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดชนิดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทกรด (Acidic extractant) เป็นสารสกัดที่มีส่วนทำปฏิกิริยาที่มีฟังก์ชันของ $-COOH$, $=P(O)OH$ หรือ $-SO_3H$ และประเภทคีเลท (Chelate extractant) เป็นสารสกัดที่ทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ดังนี้



ปฏิกิริยาข้างต้นแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลายป้อน นอกจากนั้นยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ

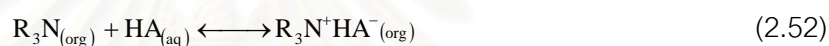
สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีการใช้ประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส อนุพันธ์ของกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic acids) และอนุพันธ์ของกรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric acids) ซึ่งเป็นสารสกัดที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (Di-2-ethylhexyl phosphoric acids, D2EHPA)

สารสกัดประเภทคีเลทได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วย กลุ่มดอนเนอร์ (Donor groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลทเชิงพาณิชย์มีอยู่ 2 ประเภท คือ กลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) เช่น สารสกัด LIX ของบริษัท Henkel Corporation สารสกัด Acorga ของบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ของบริษัท Shell Chemical USA และกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) เช่น สารสกัด Kelex ของบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA)

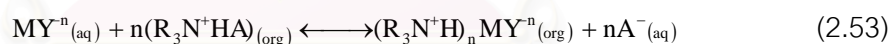
2) สารสกัดชนิดต่าง (Basic Extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีสภาพกรดแล้ว เปลี่ยนเป็นเกลือ สารสกัดที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีน และแอมโมเนียม เฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium halides) และมีการใช้เอมีนของ เกลือแอมโมเนียมชนิดต่างๆ เช่น ชนิดปฐมภูมิ (Primary, RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary, R_2NH) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary, R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary, R_4N^+)

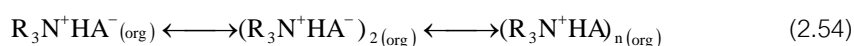
ในการสกัด เอมีนจะทำปฏิกิริยากับกรดแล้วเปลี่ยนเป็นอยู่ในรูปของเกลือ เอมีนที่เหมาะสมซึ่งมีขั้ว $\text{R}_3\text{N}^+\text{HA}^-$ ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ดังนี้



เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วย ไอออนโลหะ MY^- จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังนี้



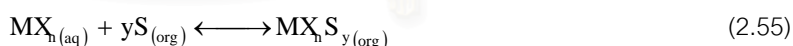
ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคน้ำเกิดเป็นสารที่มีประจุลบ (Anionic species) ที่ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน และความสามารถในการรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวขึ้นกับสมบัติของตัวทำละลาย และธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังนี้



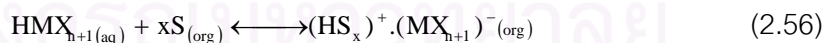
การเกิดวิฤภาคที่สามทำให้วิฤภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารเติมแต่ง (Modifiers) เช่นพวก long-chain aliphatic alcohol

3) สารสกัดชนิดโซลเวท (Solvating Extractant)

สารสกัดประเภทโซลเวท (Solvating) หรือสารสกัดประเภทกลาง (Neutral) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะกลุ่มคอนเนอร์ จึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไฮดรอกซิลที่มีประจุบวกหรือไฮดรอกซิลที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไฮดรอกซิลในวิฤภาคสารละลายป้อนจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาขึ้นกับความสามารถของไฮดรอกซิลในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวิฤภาคสารละลายป้อนเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมที่มีประจุเป็นกลางของสารประกอบเชิงซ้อนหรือเป็นการรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



หรือ



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดโซลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวิฤภาคสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดโซลเวทดังปฏิกิริยาที่ (2.55) และ (2.56) สารสกัดประเภท

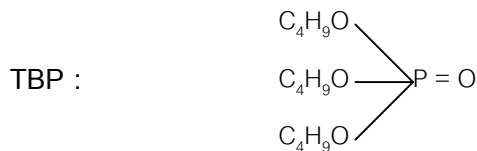
โซลเวนท์ที่พบว่ามีการใช้ประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ เช่น ไตรบิวทิลฟอสเฟต (TBP) ไตรออกทิวฟอสไฟน์ออกไซด์ (TOPO) เป็นต้น

2.10 ไตรบิวทิลฟอสเฟต (Tri-n-butyl phosphate, TBP) (ดวงพร ถนอมงาม, 2539; Alegret, 1988)

สารสกัด TBP บริสุทธิ์มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสีและไม่มีกลิ่น แต่อาจจะพบว่ามีสีเหลืองน้ำตาลอ่อนได้ใน TBP คุณภาพระดับพาณิชย์ โดย TBP ถูกนำมาใช้เป็นสารสกัดอย่างกว้างขวางในการสกัดยูเรเนียมและทอเรียมออกจากแร่ และถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ในกระบวนการ PUREX (Plutonium Uranium Recovery by EXtraction) แต่เนื่องจาก TBP มีความหนืดสูงและความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำทำให้ยากต่อการแยกชั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเจือจาง TBP ด้วยตัวเจือจาง (Diluents) ได้แก่ น้ำมันก๊าด (Aliphatic) หรือสารผสมของพาราฟิน (n-paraffin) เพื่อลดความหนืดและความหนาแน่น โดยทำให้เจือจางลงไปเป็น 5-30% โดยปริมาตร ตามความเหมาะสมของกระบวนการ แม้ว่าความสามารถในการสกัดจะลดลงไปแต่สารเจือปนอื่นๆ ที่จะถูกสกัดออกมาก็จะลดลงด้วยเช่นกัน โดย TBP จะมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.2 และมีสูตรโครงสร้างดังในรูปที่ 2.11

สูตรโมเลกุล	$C_{12}H_{27}O_4P$
มวลโมเลกุล	266.32
ความหนาแน่น, g/cm^3	0.97
ความหนืด, cP	3.5-4.0
ค่าดัชนีหักเห ที่ $20\text{ }^\circ\text{C}$ (Refractive index, n_D)	1.425
ความสามารถในการละลายน้ำ ที่ $20\text{ }^\circ\text{C}$, g/l	6
จุดเดือด, $^\circ\text{C}$	289
จุดหลอมเหลว, $^\circ\text{C}$	-79
จุดวาบไฟ, $^\circ\text{C}$	146
ความดันไอ, hPa	0.008

ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติของ TBP (Merck, 1999-2000)



รูปที่ 2.11 แสดงสูตรโครงสร้างของสารสกัด TBP

TBP เป็นสารสกัดที่ดีและเหมาะสมในการใช้เป็นสารสกัดในกระบวนการเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่มีรังสี เนื่องจาก

- 1) อัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio) ของยูเรเนียมและทอเรียมมีค่ามากกว่าธาตุหายาก
- 2) สามารถทำการนำกลับสารสกัดกลับมาใช้ใหม่ได้
- 3) มีความเสถียรต่อสารเคมีและการเสื่อมจากการถูกรังสี
- 4) มีค่าการระเหยและความสามารถในการละลายน้ำน้อย
- 5) จุดวาบไฟมีค่าสูง ทำให้ลดอันตรายที่เกิดจากการเกิดไฟไหม้ได้
- 6) ทำการสังเคราะห์ได้ง่าย หาซื้อได้ง่ายในท้องตลาดและราคาไม่แพง

2.11 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการอาบรังสีนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการอาบรังสีนิวตรอนเป็นวิธีการวิเคราะห์ธาตุโดยการยิงธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยอนุภาคนิวตรอน ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส (Nuclear transformation) ของอะตอมของธาตุนั้น เกิดเป็นไอโซโทปรังสีซึ่งจะมีสมบัติเฉพาะตัว คือ ครึ่งชีวิต ชนิดของรังสี และพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา จากสมบัติเฉพาะตัวนี้ จะทำให้ทราบได้ว่าเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุใด และจากปริมาณรังสีที่วัดได้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีของ

สารมาตรฐานของธาตุนั้นๆ ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน จะสามารถคำนวณปริมาณของธาตุที่ทำกรวิเคราะห์ได้

2.11.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการอาบรังสีนิวตรอน มี 2 แบบ คือ

- 1) การวิเคราะห์ด้วยการอาบรังสีนิวตรอนโดยใช้เฉพาะเครื่องมือนับรังสี (Instrumental Neutron Activation Analysis, INAA) เป็นการวิเคราะห์โดยนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกันแล้ววัดความแรงรังสีแกมมาจากไอโซโทปรังสีของธาตุที่ต้องการหาปริมาณเทียบกับสารมาตรฐานโดยตรง การวัดปริมาณรังสีจำเป็นต้องใช้เครื่องมือนับรังสีที่สามารถแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาตามขนาดพลังงานต่าง ๆ ได้
- 2) การวิเคราะห์ด้วยการอาบรังสีนิวตรอนโดยผ่านกระบวนการแยกทางเคมี (Radiochemical Neutron Activation Analysis, RNAA) เป็นการวิเคราะห์ที่ต้องนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานผ่านกระบวนการทางเคมี ซึ่งอาจจะทำได้ก่อนหรือหลังการอาบรังสีนิวตรอน เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของธาตุที่ต้องการ หรือทำให้ปราศจากการรบกวนจากไอโซโทปรังสีของธาตุอื่นๆ ในสารตัวอย่าง เช่น การตกตะกอน การกลั่น การสกัด เป็นต้น

2.11.2 ปฏิกริยาของนิวตรอนต่อนิวเคลียส (อาภรณ์ บูษมงคล, 2542: 1-14)

เมื่อยิงอนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุแล้ว ปฏิกริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นมีได้หลายแบบคือ

- 1) ปฏิกริยานิวตรอน-แกมมา (n, γ) เป็นปฏิกริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วทำให้อะตอมของธาตุเปลี่ยนเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุเดิมพร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา
- 2) ปฏิกริยานิวตรอน-โปรตอน (n, p) เป็นปฏิกริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วทำให้อะตอมของธาตุนั้นเปลี่ยนไปเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุใหม่ พร้อมกับปล่อยอนุภาคโปรตอนออกมา

- 3) ปฏิกิริยานิวตรอน-แอลฟา (n, α) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการยิงอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุ แล้วทำให้อะตอมของธาตุนั้นเปลี่ยนไปเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุใหม่ พร้อมทั้งปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา

ปฏิกิริยา (n, γ) เหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA เพราะทำได้สะดวก ส่วนปฏิกิริยา (n, p) และปฏิกิริยา (n, α) นั้นนิยมใช้ในการผลิตสารไอโซโทป ทั้งนี้เนื่องจากสารไอโซโทปที่เกิดขึ้นนั้นเป็นของธาตุใหม่ซึ่งเป็นคนละชนิดกับธาตุเดิม ทำให้สะดวกในการแยกสารไอโซโทปนั้นออกมาอย่างบริสุทธิ์

2.11.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA (จรัญ บงกช ศิริบุญวานิช, 13-17

กรกฎาคม 2541: 129-149)

2.11.3.1 การเก็บและการเตรียมตัวอย่าง (Collection and preparation of sample and standard)

ตัวอย่างที่ใช้อาจเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ ควรใช้ปริมาณให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ควรบรรจุในภาชนะพลาสติกที่สะอาดและบริสุทธิ์ เพื่อป้องกันการถูกรบกวนจากสารเจือปนในขณะที่ทำการวิเคราะห์ ตัวอย่างและสารมาตรฐานควรอยู่ในสถานะเดียวกันเพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดจากการวิเคราะห์อันเนื่องมาจากตัวอย่างหรือสารมาตรฐานเอง

2.11.3.2 การบรรจุตัวอย่างในภาชนะที่ใช้อบนิวตรอน (Canning for neutron activation)

ภาชนะที่นิยมใช้ในการบรรจุตัวอย่างอบนิวตรอน มี 3 อย่าง คือ อะลูมิเนียม ซิลิกา และพอลิเอทิลีน ในกรณีที่อบนิวตรอนที่มีความเข้มข้นนิวตรอนสูง (High neutron flux) นิยมใช้อะลูมิเนียมและซิลิกา แต่ทั้งสองอย่างจะถูกทำให้เกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีได้ พอลิเอทิลีนที่มีความบริสุทธิ์สูงจะเป็นภาชนะที่ดีที่สุดสำหรับการอบนิวตรอนระยะสั้น แต่จะหลอมได้ง่ายถ้าอุณหภูมิสูงเกิน 110°C และจะเปราะเมื่อนำไปอบนิวตรอนที่มีความเข้มข้นมากกว่า 10^{18} n/cm^2

2.11.3.3 การอาบรังสีนิวตรอน (Activation by neutron)

แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่นิยมใช้ คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งมีนิวตรอนในช่วง 10^{12} - 10^{15} n/cm².sec และความสามารถหรือโอกาส (Cross section, σ) ที่ธาตุแต่ละชนิดจะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนได้ไม่เท่ากัน ขึ้นกับพลังงานของนิวตรอนด้วย หากนิวตรอนพลังงานสูงๆ หรือนิวตรอนเร็ว จะก่อให้เกิดปฏิกิริยา (n, α), (n,p) หรือ (n, 2n) แต่ถ้าเป็นนิวตรอนช้าจะก่อให้เกิดปฏิกิริยา (n, γ) และวิธีการอาบตัวอย่างด้วยนิวตรอนนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีการ คือ

- 1) วิธีอาบเชิงเดี่ยวอย่างสัมบูรณ์ (Absolute single standard method) เป็นการนำตัวอย่างและสารมาตรฐานไปอาบนิวตรอนแยกกันเป็นการอาบเดี่ยวๆ แต่ในภาวะและเงื่อนไขเดียวกัน
- 2) วิธีเปรียบเทียบ (Comparative method) เป็นการนำตัวอย่างและสารมาตรฐานไปอาบนิวตรอนพร้อมๆ กัน ในภาวะและเงื่อนไขเดียวกัน

2.11.4 กระบวนการแยกสารรังสีออกก่อนวัดรังสี (Radiochemical separation)

ในตัวอย่างบางชนิด หลังจากอาบรังสีแล้วจะไม่สามารถนำไปวัดรังสีได้เลย จึงต้องผ่านการแยกทางเคมีก่อน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ RNAA โดยการเพิ่มความเข้มข้นของธาตุที่ต้องการหรือแยกธาตุที่ต้องการออกจากสิ่งเจือปนอื่นๆ ในระดับหนึ่งก่อน เพื่อให้ได้ค่าความแรงรังสีพอในการวิเคราะห์ อาจจะมีการเติมสารประกอบของธาตุนั้นๆ (Inactive carrier) เพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อสาร ทำให้การแยกทำได้ง่ายขึ้นและลดความผิดพลาดลงได้

2.11.3.5 การวัดกัมมันตภาพรังสี (Determination of radioactivity)

เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการทางรังสี เมื่อมีการวัดรังสีโดยใช้เครื่องวัดซึ่งมีหลายชนิดประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นระบบหัววัด (Detector system) ประกอบด้วย หัววัด และที่กำบังรังสี ส่วนที่เป็นระบบวิเคราะห์ (Analyzer system) ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multi-Channel Analyzer, MCA) และเครื่องขยายสัญญาณ และระบบแปรรูป (Processor system) ประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์

โดยปริมาณรังสีที่วัดได้สามารถคำนวณปริมาณธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากความเข้มข้นของนิวตรอนในระหว่างการอบรังสีอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ และความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุไม่สามารถทำได้อย่างถูกต้องแน่นอน ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA จึงใช้วิธีเปรียบเทียบระหว่างธาตุในสารตัวอย่างกับธาตุในสารมาตรฐาน โดยการนำสารมาตรฐานเข้าอบรังสีในตำแหน่งและระยะเวลาเดียวกันกับสารตัวอย่างแล้ววัดความแรงรังสีเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$W_u = W_s(A_u/A_s) \quad (2.57)$$

เมื่อ W_u = น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง
 W_s = น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน
 A_u = ค่านับรังสีของสารตัวอย่าง
 A_s = ค่านับรังสีของสารมาตรฐาน

และในกรณีที่ต้องแก้ค่าเวลาการสลายตัวให้มีภาวะเดียวกันสามารถใช้สมการดังนี้

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.58)$$

เมื่อ A_0 = ความนับรังสีที่เวลา $t=0$
 A_t = ความนับรังสีที่เวลา $t=t$
 λ = ค่าคงที่การสลายตัว (Decay constant)
 t = ระยะเวลาที่สลายตัว

2.11.3.6 ขีดความสามารถของ NAA (Detection limit)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า INAA นั้นเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ให้ได้หลากหลายชนิด จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า มี 68 ธาตุที่สามารถวิเคราะห์โดยวิธี INAA ได้ผลดีมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ขีดความสามารถในการวิเคราะห์	ชนิดของธาตุที่วิเคราะห์
$1-3 \times 10^{-7} \mu\text{g}$	In, Eu, Dy
$4-9 \times 10^{-7} \mu\text{g}$	Ho
$1-3 \times 10^{-6} \mu\text{g}$	Mn, Sm, Au
$4-9 \times 10^{-6} \mu\text{g}$	Rh, Lu, Re, Ir
$1-3 \times 10^{-5} \mu\text{g}$	Co, Cu, Ga, As, I, Cs, La, Er, W, Hg, U
$4-9 \times 10^{-5} \mu\text{g}$	Na, V, Br, Ru, Pd, Sb, Yb, Th
$1-3 \times 10^{-4} \mu\text{g}$	Sc, Ge, Sr, Te, Ba, Nd, Ta
$4-9 \times 10^{-4} \mu\text{g}$	Cl, Se, Cd, Gd, Tb, Tm, Hf, Pt
$1-3 \times 10^{-3} \mu\text{g}$	Al, Zn, Mo, Ag, Sn, Ce, Os
$4-9 \times 10^{-3} \mu\text{g}$	K, Ti, Cr, Ni, Rb, Y, Pr
$1-3 \times 10^{-2} \mu\text{g}$	Mg
$4-9 \times 10^{-2} \mu\text{g}$	Zr
$1-3 \times 10^{-1} \mu\text{g}$	F, Ca, Nb
$1-3 \mu\text{g}$	Fe
$4-9 \mu\text{g}$	Si
$10-30 \mu\text{g}$	S

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าขีดความสามารถในการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธี INAA (กรณีที่ไม่มีการรบกวนจากธาตุอื่นๆ) เมื่อ $\phi_{\text{th}} = 10^{13} \text{ ncm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $t_i = 5 \text{ hrs. max.}$, $t_d = 0$, $t_c = 100 \text{ minutes max.}$, $40 \text{ cm}^3 \text{ Ge(Li) detector 2 cm distance, largest photopeak}$ (จัษฎ์บังกช ศิริบุญวานันท์, 13-17 กรกฎาคม 2541: 129-149)

2.12 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES) (จิรวัจน์ อีซอ, 2541; อัมพิกา อภิชัยบุคคล, 2543)

เป็นเทคนิคที่สะดวก รวดเร็ว ได้ค่าถูกต้องแม่นยำ นอกจากนั้นการเตรียมสารตัวอย่างยังทำได้ง่ายและรวดเร็ว ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างจะถูกสับชนิดเป็นฝอยในส่วนที่เป็นนิวบิวไลเซอร์ (Nubilizer) แล้วถูกส่งต่อไปยังส่วนที่เป็นเปลวพลาสมาของอาร์กอนเรียกว่า ไอซีพีทอช (ICP-Torch) ซึ่งถูกสปาร์ค (Spark) ในสนามของคลื่นวิทยุ โดยตัวอย่างจะระเหยและกลายเป็นไอ เปลี่ยนเป็นอะตอมและไอออน ทั้งอะตอมและไอออนจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในภาวะกระตุ้น (Excited state) เมื่ออะตอมคืนกลับสู่ภาวะพื้น (Ground state) ก็จะคายพลังงานออกมาในรูปของ Characteristic radiation แสดงในรูปของความยาวคลื่น โดยความเข้มของแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าและผ่านเข้าเครื่องขยายสัญญาณ (PMT) แล้วจึงผ่านหน่วยประมวลผลต่อไป

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายมาตรฐานของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารตัวอย่าง
 - ถ้าสารตัวอย่างเป็นของเหลว สามารถนำไปวัดได้ทันที
 - ถ้าสารตัวอย่างเป็นของแข็ง ให้นำสารตัวอย่างประมาณ 0.1 กรัม ละลายด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 2-3 มิลลิลิตร ถ้าไม่ละลายให้นำไปอุ่น แล้วทิ้งให้เย็น ปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้กรดไนตริกเข้มข้น 5%
- 3) นำสารละลายมาตรฐานและสารวางไร้สิ่งตัวอย่าง (Blank) ซึ่งเป็นกรดไนตริกเข้มข้น 5% มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP เพื่อทำเส้นโค้งเทียบมาตรฐาน (Calibration curve)
- 4) นำสารตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP ถ้าหากสารตัวอย่างมีความเข้มข้นมากให้เจือจางด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 5% โดยผลที่ได้อยู่ในรูปของความเข้มข้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก รวมถึงวิธีการทดลองในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุน มีรู ได้แก่ เวลาในการสกัด ความเร็วรอบการหมุน ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ และอัตราส่วนอัตราการใช้ของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

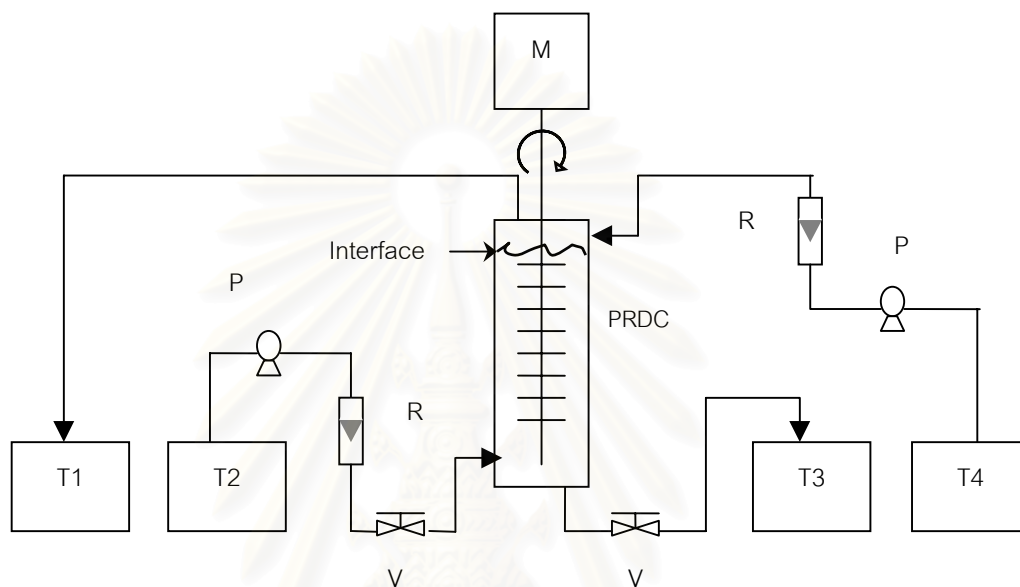
- 1) วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมสารละลายป้อน คือ เค้กสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะ (Hydrous metal oxide cake) ซึ่งได้จากการย่อยแร่โมนาไซต์ด้วยไฮโดรฟลูออริกแอซิด ซึ่งมีส่วนประกอบคือ ธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียม โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ
- 2) สารเคมีที่ใช้ในการทดลองสรุปไว้ในตารางที่ 3.1

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	ระดับคุณภาพ	บริษัทผู้ผลิต
กรดไนตริก	HNO ₃	Commercial	บ. ไนเตรทไทย จำกัด
โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	Analytical	Merck
ไตรบิวทิลฟอสเฟต	TBP	Commercial	Wendt Chemie
อินดิเคเตอร์ฟีนอล์ฟทาลีน	-	Analytical	BDH
น้ำมันก๊าด (kerosene)	-	Commercial	บ. บางจากปิโตรเลียม จำกัด

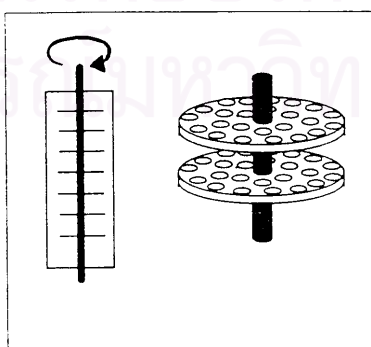
ตารางที่ 3.1 แสดงรายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

หอสกัดแบบจานหมุนมีรู (Perforated rotating disc column) ตัวหอทำด้วยแก้ว และภายในบรรจุ Perforated discs ทำด้วยเหล็กไร้สนิมเบอร์ 304 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 นอกจากนี้รายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ภายในหอจะแสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงชุดการทดลองการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู โดยที่ PRDC คือหอสกัดแบบจานหมุนมีรู, M คือมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วได้, P คือเครื่องสูบลม, R คือมาตรวัดอัตราการไหล, T1 คือถังของสารละลายอินทรีย์ขาออก, T2 คือถังของสารละลายอินทรีย์ขาเข้า, T3 คือถังของสารป้อนขาออก, T4 คือถังของสารป้อนขาเข้า, V คือวาล์ว



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของจานหมุนมีรูที่ใช้ภายในหอสกัด (จตุรพร บ้านแก่ง, 2539)

ส่วนประกอบ	ขนาด/จำนวน
จำนวนจานหมุน	35
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของจานหมุน	7.3 เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของรู	0.66 เซนติเมตร
ระยะห่างระหว่างจานหมุน	2.61 เซนติเมตร
จำนวนรูนบนจานหมุน	38
พื้นที่เสรี (Free area)	50.95% ต่อจานหมุน
ความสูงของหอสกัด	1.5 เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอสกัด	8 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ภายในหอสกัด

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- 1) เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometer) รุ่น M ของบริษัท Spectro Analytical Instruments เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุหายาก
- 2) เทคนิคการอาบรังสีนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รังสีแบบแยกพลังงาน (Multi-Channel Analysis, MCA) ซึ่งประกอบด้วยหัววัด HpGe รุ่น Gem 25185 และโปรแกรมวิเคราะห์ Maestro ของบริษัท EG&G Ortec Model Dspec เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียมและทอเรียม

3.4 วิธีการทดลอง

การเตรียมแค้กสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะ (Hydrous metal oxide cake) ให้เป็นสารละลายในเตรท

นำเค็กลสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะมาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ติดค้างในแร่ออก และนำมาย่อยสลายด้วยกรดไนตริก (HNO_3) 68% ที่อุณหภูมิ 95 °C แล้วจึงนำสารละลายที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 50 เพื่อแยกเอาตะกอนของแกงก์ (Gangue) ออก นำสารละลายที่ผ่านการกรองมาวัดความเข้มข้นของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก และนำมาไทเทรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อหาความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลาย จากนั้นนำสารละลายที่วัดความเข้มข้นแล้วมาใช้เป็นสารละลายป้อนในการทดลองต่อไป

3.4.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสกัดและหาเวลาในการสกัดที่เหมาะสมโดยใช้ หอสกัดแบบจานหมุนมีรุ โดยมิขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งประกอบด้วยไอออนของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากรวมกันที่ความเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เป็นปริมาตร 15 ลิตร ปรับความเข้มข้นของกรดไนตริกเป็น 4 โมลต่อลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารละลายอินทรีย์ซึ่งเป็นสารละลายผสมของ TBP ในน้ำมันก๊าด (Kerosene) ความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร เป็นปริมาตร 15 ลิตร แล้วจึงนำมาทำให้อิ่มตัวด้วยสารละลายกรดไนตริก
- 3) ป้อนสารละลายป้อนเข้าในหอสกัดให้ได้ระดับความสูงประมาณ 90% ของหอสกัด แล้วจึงป้อนสารละลายอินทรีย์เข้าหอสกัด เมื่อชั้นรอยต่อระหว่างสารละลายอินทรีย์กับสารละลายป้อน (Interface) คงที่ จึงเริ่มปั่นกวนที่ 200 รอบต่อนาที และใช้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์ไหลผ่านหอสกัดแบบไหลผ่านครั้งเดียว
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้วที่ก้นหอที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ

- 5) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ ยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก

3.4.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบการกวน ที่มีผลต่อการสกัดโดยใช้หอสกัด แบบจานหมุนมีรู โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งประกอบด้วยไอออนของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากรวมกันที่ความเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วน เป็นปริมาตร 15 ลิตร ปรับความเข้มข้นของกรดไนตริกเป็น 4 โมลต่อลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารละลายอินทรีย์ซึ่งเป็นสารละลายผสมของ TBP ในน้ำมันก๊าด ความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร เป็นปริมาตร 15 ลิตร แล้วจึงนำมาทำให้อิ่มตัวด้วยสารละลายกรดไนตริก
- 3) ป้อนสารละลายป้อนเข้าในหอสกัดให้ได้ระดับความสูงประมาณ 90% ของหอสกัด แล้วจึงป้อนสารละลายอินทรีย์เข้าหอสกัด เมื่อชั้นรอยต่อระหว่างสารละลายอินทรีย์กับสารละลายป้อนคงที่ จึงเริ่มปั่นกวนที่ 100 รอบต่อนาที และใช้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์ไหลผ่านหอสกัดแบบไหลผ่านครั้งเดียว
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้วที่ก้นหอ เพื่อนำไปวิเคราะห์
- 5) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนเป็น 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ตรวจวัดความเข้มข้นของ ยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก

3.4.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งประกอบด้วยไอออนของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากรวมกันที่ความเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วน เป็นปริมาตร 15 ลิตร ปรับความเข้มข้นของกรดไนตริกเป็น 1 โมลต่อลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารละลายอินทรีย์ซึ่งเป็นสารละลายผสมของ TBP ในน้ำมันก๊าด ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร เป็นปริมาตร 15 ลิตร แล้วจึงนำมาทำให้อิ่มตัวด้วยสารละลายกรดไนตริก
- 3) ป้อนสารละลายป้อนเข้าในหอสกัดให้ได้ระดับความสูงประมาณ 90% ของหอสกัด แล้วจึงป้อนสารละลายอินทรีย์เข้าหอสกัด เมื่อชั้นรอยต่อระหว่างสารละลายอินทรีย์กับสารละลายป้อนคงที่ จึงเริ่มปั่นกวนที่ 200 รอบต่อนาที และใช้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์ไหลผ่านหอสกัดแบบไหลผ่านครั้งเดียว
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้วที่ก้นหอ เพื่อนำไปวิเคราะห์
- 5) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเป็น 2, 3, 4 และ 5 โมลต่อลิตร โดยปริมาตรในน้ำมันก๊าด ตามลำดับ
- 6) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1) ถึง (5) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์เป็น 5, 10, 20 และ 30% TBP โดยปริมาตรในน้ำมันก๊าด ตามลำดับ
- 7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ตรวจวัดความเข้มข้นของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก

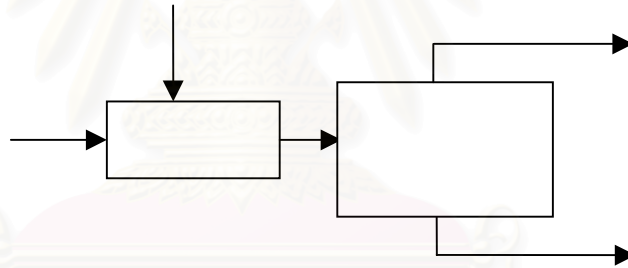
3.4.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายป้อนซึ่งประกอบด้วยไอออนของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากรวมกันที่ความเข้มข้น 1000 ส่วนในล้านส่วน เป็นปริมาตร 15 ลิตร ให้ความเข้มข้นของกรดไนตริกเป็น 3 โมลต่อลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารละลายอินทรีย์ซึ่งเป็นสารละลายผสมของ TBP ในน้ำมันก๊าด ความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร เป็นปริมาตร 15 ลิตร แล้วจึงนำมาทำให้อิ่มตัวด้วยสารละลายกรดไนตริก
- 3) ป้อนสารละลายป้อนเข้าในหอสกัดให้ได้ระดับความสูงประมาณ 90% ของหอสกัด แล้วจึงป้อนสารละลายอินทรีย์เข้าหอสกัด เมื่อชั้นรอยต่อระหว่างสารละลายอินทรีย์กับสารละลายป้อนคงที่ จึงเริ่มปั่นกวานที่ 200 รอบต่อนาที และใช้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์ไหลผ่านหอสกัดแบบไหลผ่านครั้งเดียว
- 4) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้วที่ก้นหอ เพื่อนำไปวิเคราะห์
- 5) ทำการทดลองซ้ำจากข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนเป็น 200, 300, 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ตรวจวัดความเข้มข้นของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากในแร่โมนาไซต์โดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการสกัด ความเร็วรอบการกวน ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ และอัตราส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี รวมถึงการวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้ โดยงานวิจัยนี้ศึกษาถึงการสกัดแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากธาตุหายากในแร่โมนาไซต์โดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู ซึ่งมีขั้นตอนการสกัดแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากธาตุหายากดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการสกัดแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากธาตุหายาก

สารสกัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ TBP ซึ่งเป็นสารสกัดชนิดไฮโดรเฟสที่มีเฉพาะกลุ่มดอนเนอร์ จึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง กลไกการสกัดที่เกิดขึ้นเป็นการรวมกันของอะตอมที่มีประจุเป็นกลางของสารประกอบเชิงซ้อนหรือเป็นการรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังปฏิกิริยาที่ (2.55) และ (2.56)



4.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการสกัดและหาเวลาในการสกัดที่เหมาะสม โดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู

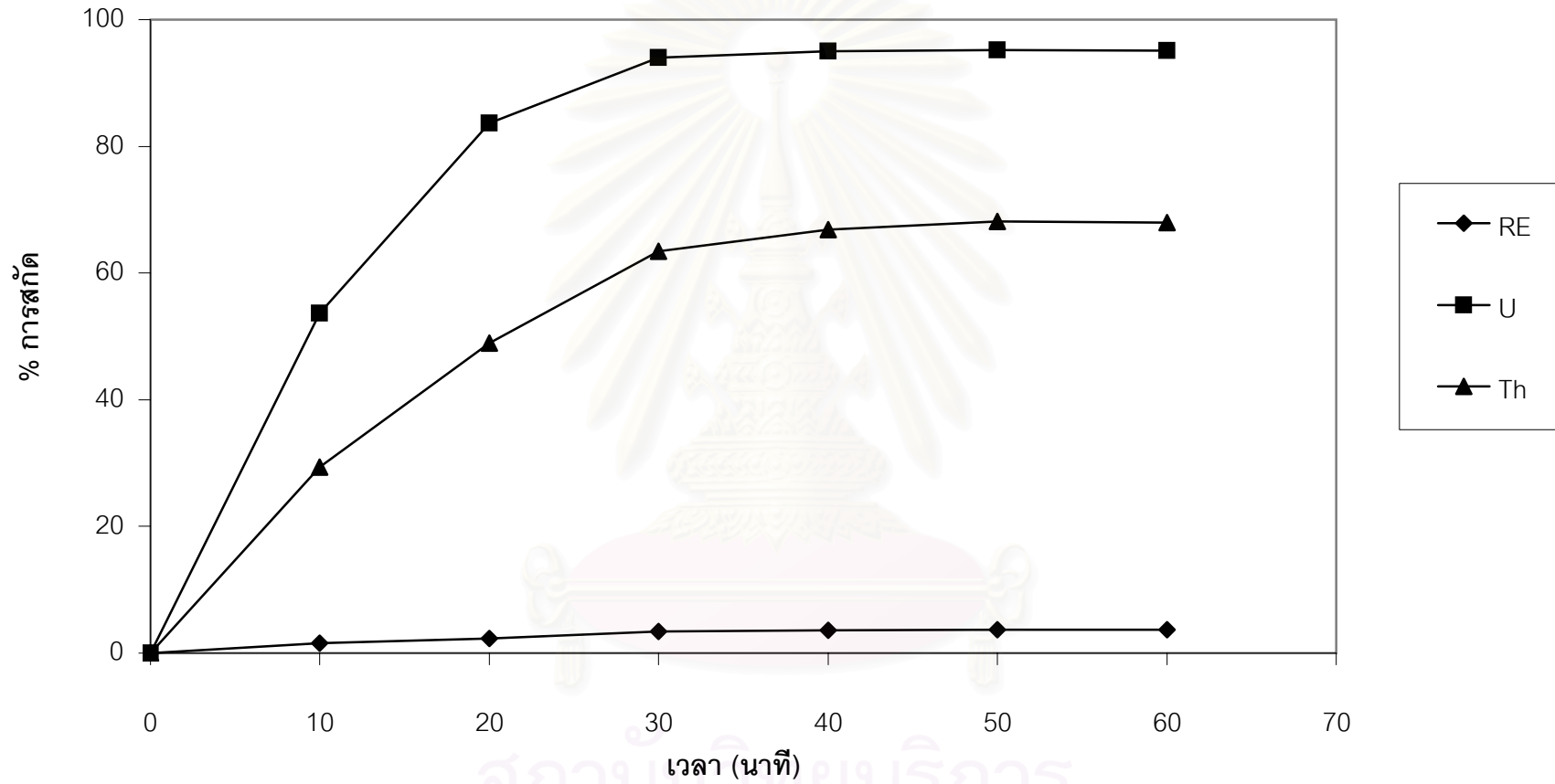
การทดลองนี้ทำการศึกษาเพื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการสกัด และหาเวลาในการสกัด โดยศึกษาที่เวลาในการสกัดเท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาทีตามลำดับ เพื่อหาเวลาในการสกัดที่เหมาะสมต่อการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยอื่นๆ ต่อไป จากการทดลองได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2 (ข้อมูลการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก: ตารางที่ ก-1, ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดดูได้จากภาคผนวก ข: ตารางที่ ข-1)

ในรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อใช้เวลาในการสกัดมากขึ้น จะทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนใช้เวลาในการสกัดมากกว่า 40 นาที เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากจะมีค่าคงที่ตลอดจนถึงสิ้นสุดการทดลอง นั่นคือเวลาในการสกัดผ่านไป 40 นาทีแล้ว ระบบจะเริ่มเข้าสู่สถานะคงที่ (Steady state) จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ในการทดลองเพื่อศึกษาการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู สามารถใช้เวลาในการสกัดเป็นเวลา 50 นาทีก็เพียงพอต่อการศึกษา เนื่องจากเวลาในการสกัดดังกล่าวเป็นเวลาที่เราเริ่มเข้าสู่สถานะคงที่แล้ว

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก โดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู พบว่า สามารถสกัดยูเรเนียมได้ประมาณ 95% และสามารถสกัดทอเรียมได้ประมาณ 70% ในขณะที่ทำการสกัดธาตุหายากได้น้อยกว่า 5% แสดงให้เห็นว่าการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรูนั้น สามารถที่จะแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากธาตุหายากได้ โดยที่ยูเรเนียมและทอเรียมจะถูกสกัดจากสารละลายป้อนไปอยู่ในสารละลายอินทรีย์ ในขณะที่ธาตุหายากยังคงอยู่ในสารละลายป้อน

4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบการกวน ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู

การทดลองนี้ทำการศึกษาเพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความเร็วรอบการกวน ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู โดยศึกษาที่ความเร็วรอบการกวนเท่ากับ 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที เพื่อหาความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมต่อการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากกับเวลาในการสกัด เมื่อ $[Feed] = 1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน = 200 rpm, $[TBP]_{org} = 20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed} = 4$ M, $Q_{feed} = Q_{org} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

อื่นๆ ต่อไป จากการทดลองได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 (ข้อมูลในการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก: ตารางที่ ก-2, ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดดูได้จากภาคผนวก ข: ตารางที่ ข-2)

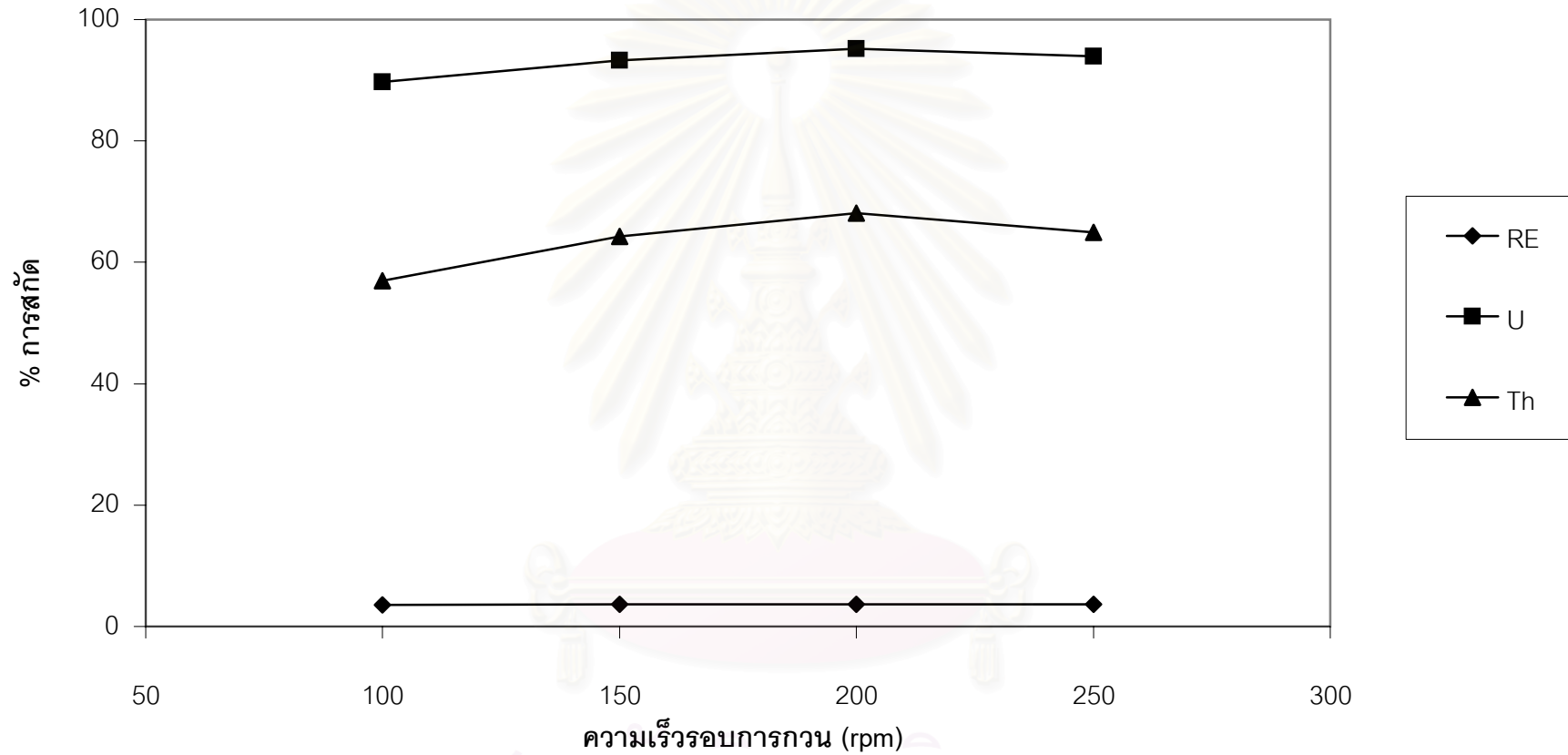
ในรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อความเร็วรอบการกวนมีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุดที่ความเร็วรอบการกวนเท่ากับ 200 รอบต่อนาที และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบการกวนมากกว่า 200 รอบต่อนาที เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจะมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความเร็วรอบการกวนในช่วงที่มีค่าต่ำกว่า 200 รอบต่อนาที พบว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบการกวนมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วรอบการกวนที่เพิ่มขึ้น จะไปปั่นกวนสารละลายอินทรีย์ ทำให้เกิดการแตกกระจายของสารละลายอินทรีย์เป็นหยดที่มีขนาดเล็กลง เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มมากขึ้นและความเร็วรอบการกวนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายอินทรีย์กับสารละลายป้อนนั้นลดลงด้วย ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient) มีค่ามากขึ้น จากผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวล (Rate of mass transfer) ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$N_A = kA(C - C_i) \quad (4.1)$$

เมื่อ N_A คือ อัตราการถ่ายเทมวล k คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล A คือ พื้นที่ผิวสัมผัส C คือ ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายป้อน และ C_i คือ ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายป้อนที่ติดกับผิวสัมผัส

จากสมการที่ (4.1) เมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้อัตราการถ่ายเทมวลมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสกัดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วรอบการกวนในช่วงที่มีค่าต่ำกว่า 200 รอบต่อนาที ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัด ยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ โชคชัย (โชคชัย สุทธิปรีชา, 2537)



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากกับความเร็วรอบการกวน เมื่อ ความเร็วรอบการกวน = 100, 150, 200 และ 250 rpm, [Feed] = 1,000 ppm, [TBP]_{org} = 20% v/v, [HNO₃]_{feed} = 4 M, Q_{feed} = Q_{org} = 100 ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความเร็วยรอบการกวนในช่วงที่มีค่ามากกว่า 200 รอบต่อนาที พบว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเร็วยรอบการกวนมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วยรอบการกวนที่เพิ่มขึ้นที่ความเร็วยรอบสูงจะสามารถลดขนาดของหยดและลดความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายอินทรีย์กับสารละลายป้อนได้เพียงเล็กน้อย แต่พบว่าความเร็วยรอบการกวนที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความปั่นป่วนที่ผิวหน้า (Interfacial turbulence) ของหยดสารละลายอินทรีย์และทำให้การไหลเวียนภายในหยดสารละลายอินทรีย์มีค่าลดลง นอกจากนี้ ความเร็วยรอบการกวนที่เพิ่มขึ้นยังไปเพิ่มการเกิดการผสมย้อนกลับ (Back-mixing) จากลักษณะดังกล่าวที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะทำให้ ประสิทธิภาพในการสกัดมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเร็วยรอบการกวนในช่วงที่มีค่าสูงกว่า 200 รอบต่อนาที ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากมีแนวโน้มลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับเนื้อหาในหนังสือของ Hanson (Hanson, 1971) และ Schweitzer (Schweitzer, 1997)

ในการพิจารณาหาความเร็วยรอบการกวนที่เหมาะสมต่อการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู พบว่าความเร็วยรอบการกวนที่ 200 รอบต่อนาที เป็นความเร็วยรอบที่เหมาะสมในการสกัด

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบการกวนในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเร็วรอบต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์

การทดลองนี้ทำการศึกษาเพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความเร็วรอบการกวนในสารละลายป้อนที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู โดยศึกษาที่ความเร็วรอบการกวนในสารละลายป้อนเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 โมลต่อลิตรที่ความเร็วรอบต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ เพื่อหาความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสม

ผลการทดลองที่ได้สามารถพิจารณาถึงอิทธิพลของความเร็วรอบการกวนในสารละลายป้อนที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียม โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การสกัด สามารถแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมกับความเร็วยรอบการกวนในสารละลายป้อนที่ความเร็วรอบต่างๆ ของ TBP ในสารละลาย

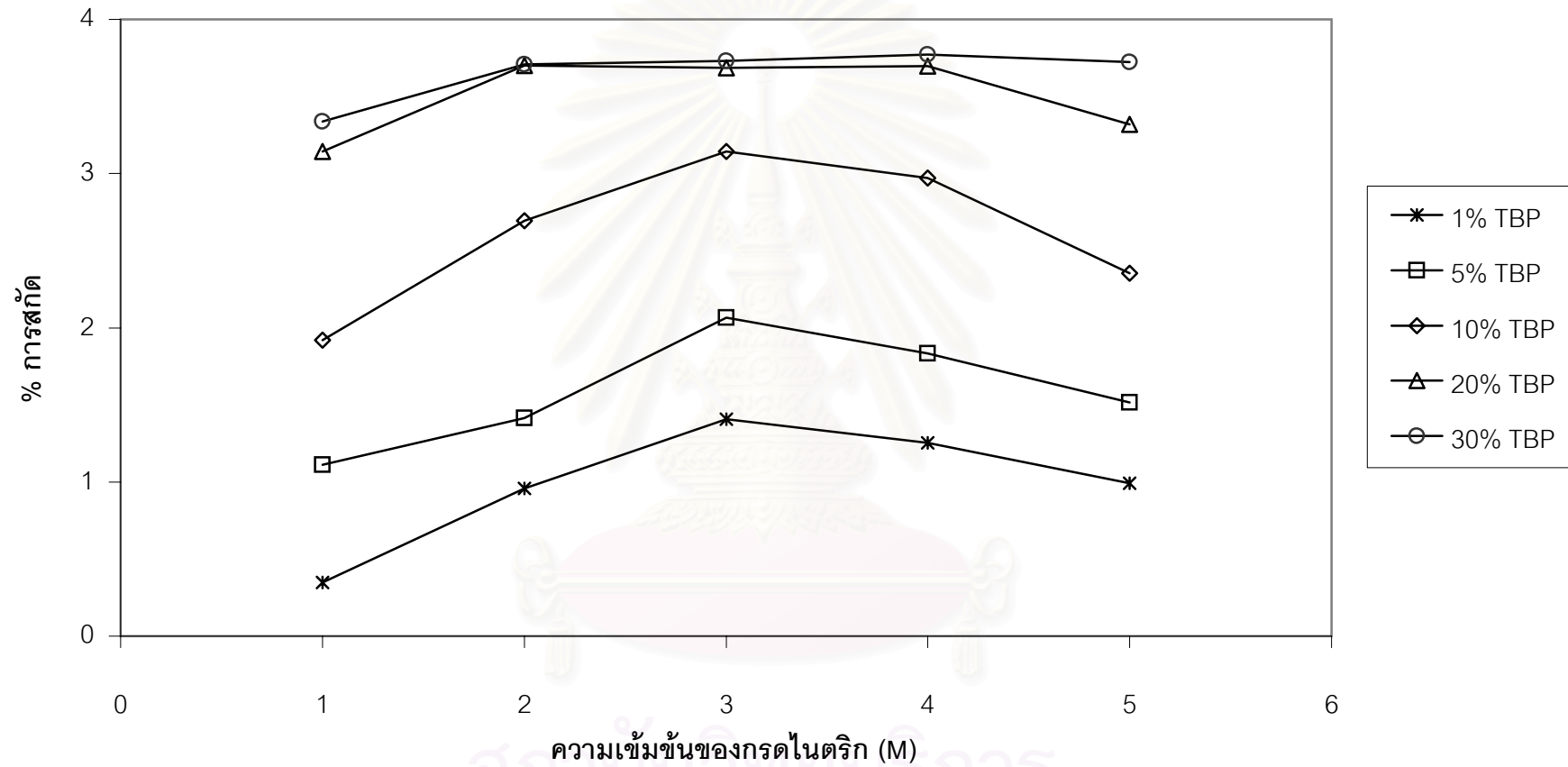
อินทรีย์ได้ดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ (ข้อมูลในการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก: ตารางที่ ก-3, ก-4 และ ก-5 ตามลำดับ, ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดดูได้จากภาคผนวก ข: ตารางที่ ข-3, ข-4 และ ข-5 ตามลำดับ)

ในรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายากจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุดที่ค่าความเข้มข้นของกรดไนตริกเท่ากับ 3 โมลต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกมากกว่า 3 โมลต่อลิตร เปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายากจะมีค่าลดลง ซึ่งจะมีแนวโน้มในการสกัดนี้เหมือนกันทุกๆ ค่าความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ จะให้แนวโน้มของความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายากกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่มีลักษณะเหมือนกัน

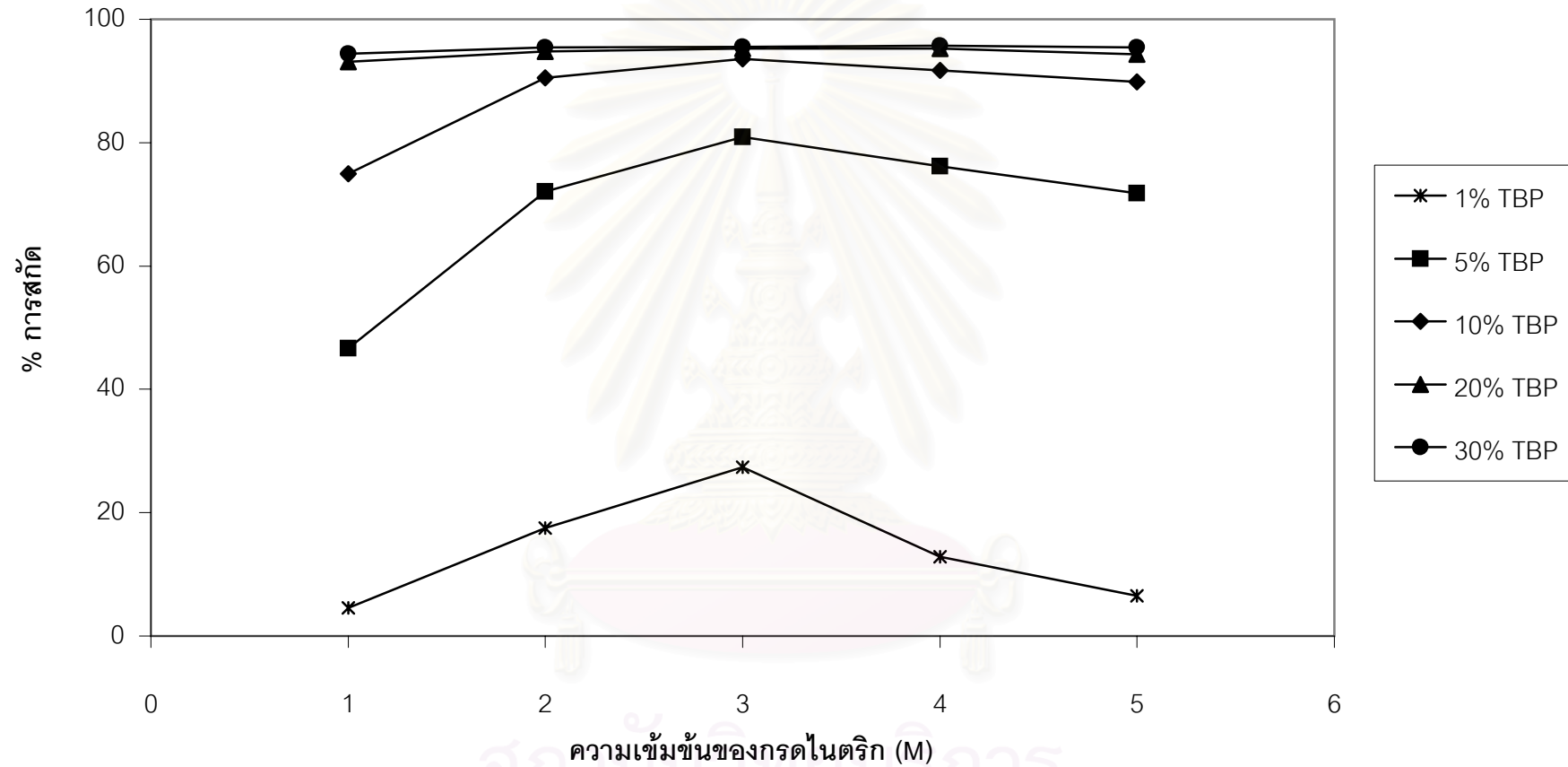
ในรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุดที่ค่าความเข้มข้นของกรดไนตริกเท่ากับ 3 โมลต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกมากกว่า 3 โมลต่อลิตร เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียมจะมีค่าลดลง ซึ่งจะมีแนวโน้มในการสกัดนี้เหมือนกันทุกๆ ค่าความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ จะให้แนวโน้มของความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดยูเรเนียมกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่มีลักษณะเหมือนกัน

ในรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของทอเรียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุดที่ค่าความเข้มข้นของกรดไนตริกประมาณ 3 โมลต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกมากกว่า 3 โมลต่อลิตร เปอร์เซ็นต์การสกัดของทอเรียมจะมีค่าลดลง ซึ่งจะมีแนวโน้มในการสกัดนี้เหมือนกันทุกๆ ค่าความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ จะให้แนวโน้มของความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดทอเรียมกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่มีลักษณะเหมือนกัน

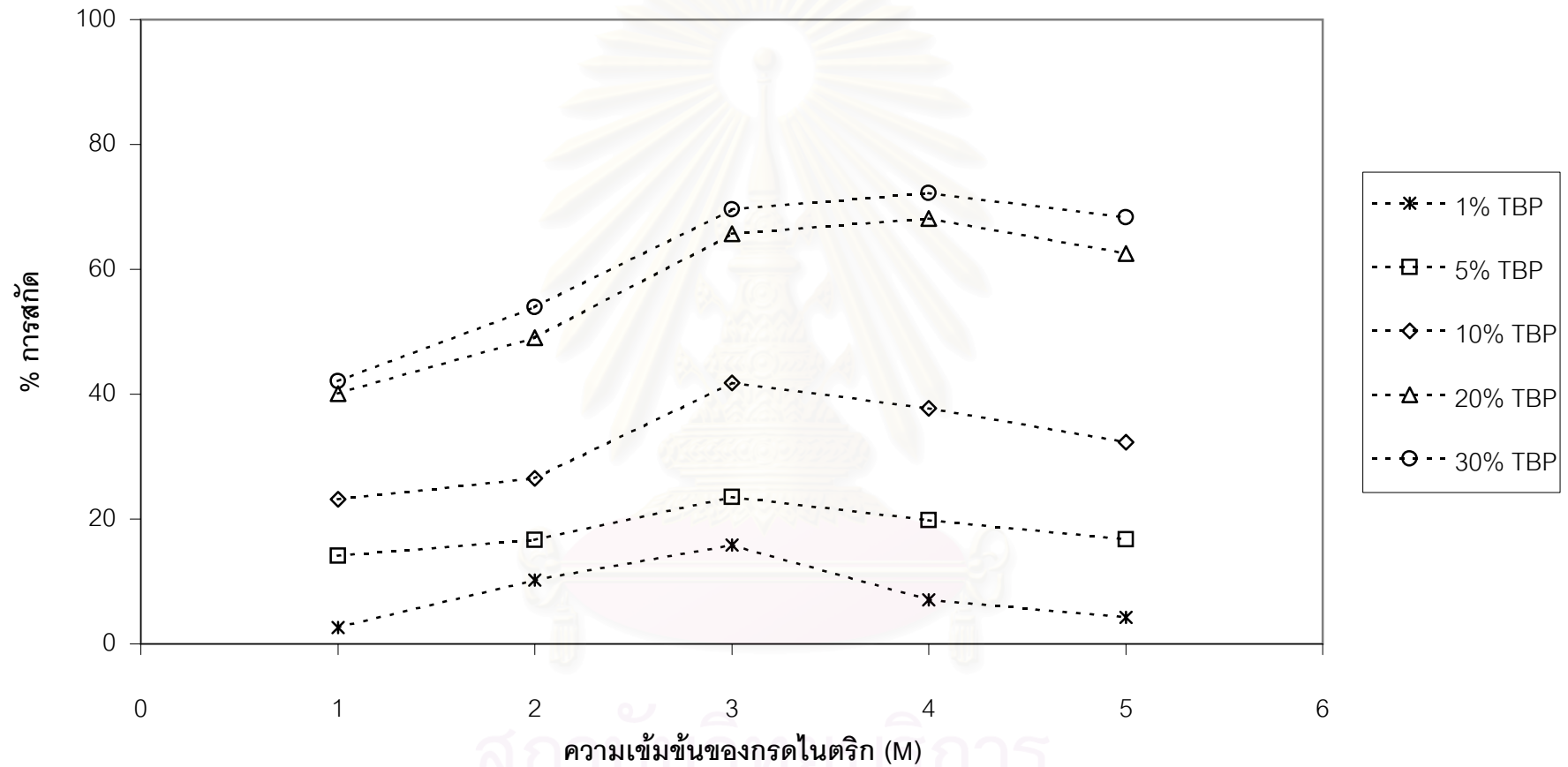
ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับนั้น สามารถที่จะพิจารณาความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายาก



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายากกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ เมื่อ $[\text{HNO}_3]_{\text{feed}} = 1, 2, 3, 4$ และ 5 M , $[\text{Feed}] = 1,000 \text{ ppm}$, ความเร็ว รอบการกวน = 200 rpm , $[\text{TBP}]_{\text{org}} = 1\text{-}30\% \text{ v/v}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{org}} = 100 \text{ ml/min}$ โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดยูเรเนียมกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ เมื่อ $[\text{HNO}_3]_{\text{feed}} = 1, 2, 3, 4$ และ 5 M , $[\text{Feed}] = 1,000 \text{ ppm}$, ความเร็วรอบการกวน = 200 rpm , $[\text{TBP}]_{\text{org}} = 1\text{-}30\% \text{ v/v}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{org}} = 100 \text{ ml/min}$ โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

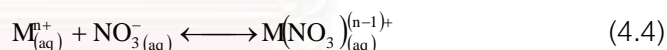
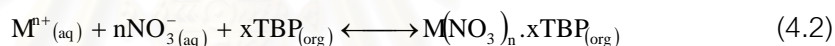


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดทองแดงกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ เมื่อ $[\text{HNO}_3]_{\text{feed}} = 1, 2, 3, 4$ และ 5 M , $[\text{Feed}] = 1,000 \text{ ppm}$, ความเร็วรอบการกวน = 200 rpm , $[\text{TBP}]_{\text{org}} = 1\text{-}30\% \text{ v/v}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{org}} = 100 \text{ ml/min}$ โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

ยูเรเนียมและทอเรียมกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนร่วมกันได้ดังรูปที่ 4.7 (ข้อมูลในการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก: ตารางที่ ก-6, ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดดูได้จากภาคผนวก ข: ตารางที่ ข-6)

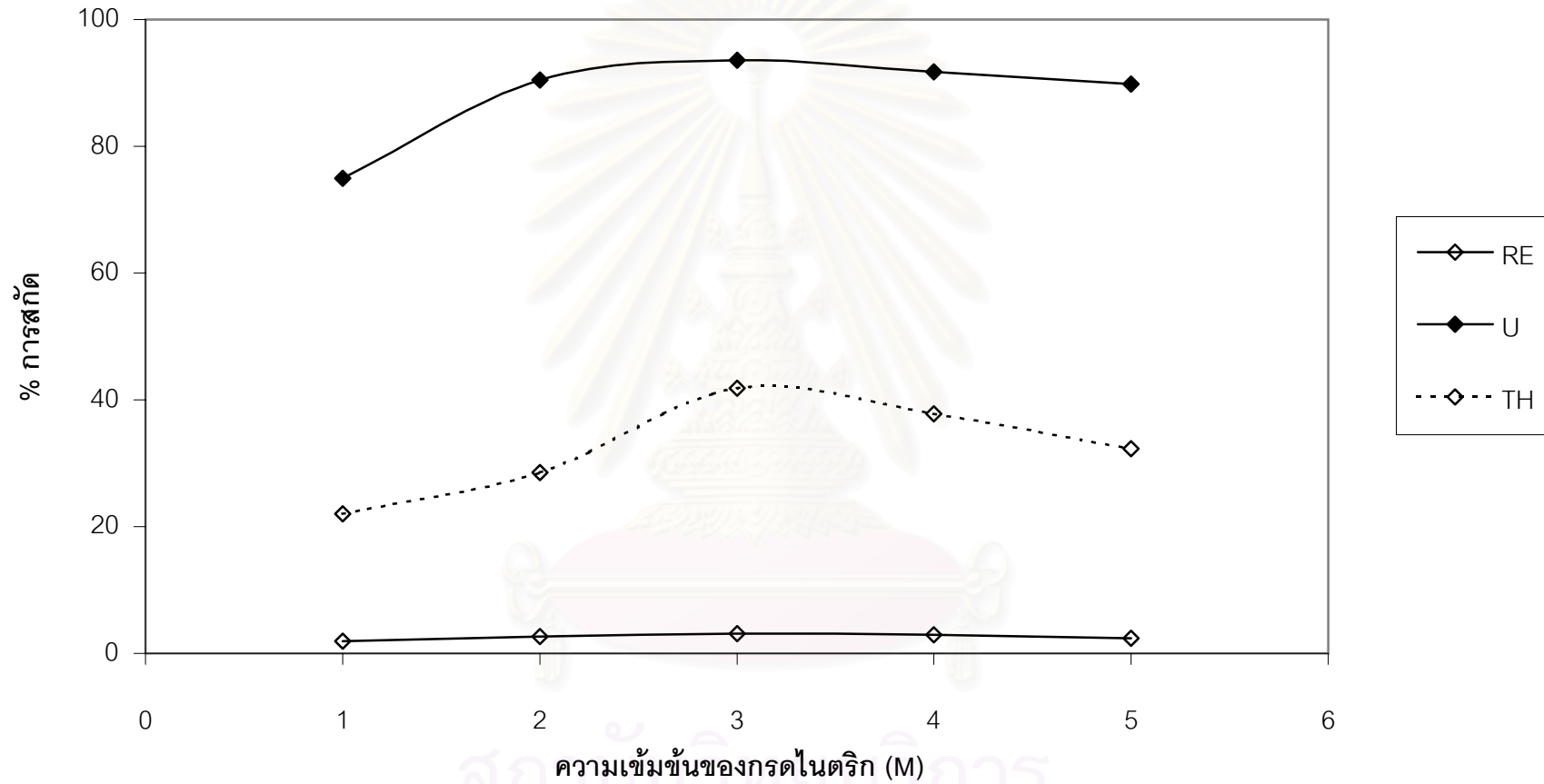
ในรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุดที่ค่าความเข้มข้นของกรดไนตริกเท่ากับ 3 โมลต่อลิตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกมากกว่า 3 โมลต่อลิตร เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจะมีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

จากกลไกการถ่ายเทมวลของกระบวนการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากด้วยหอสกัด การถ่ายเทมวลจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีในภาวะสมดุลของระบบดังต่อไปนี้ (Borong et al., 1992: 391-398; Chaohong et al., 1994: 91-98)



เมื่อ M คือ ไอออนโลหะ โดยในที่นี้ ได้แก่ยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก และ n, x, y คือ จำนวนโมล

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนในช่วงที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 3 โมลต่อลิตร พบว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้น จะรบกวนภาวะสมดุลในปฏิกิริยาที่ (4.2) ตามหลักเลอชาเตอลิเยร์ (Principle of Le Chatelier) ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาการสกัดดำเนินจากซ้ายไปขวา ส่งผลให้การสกัดเกิดได้ดีขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลาย
 ป้อน เมื่อ $[\text{HNO}_3]_{\text{feed}} = 1, 2, 3, 4$ และ 5 M , $[\text{Feed}] = 1,000 \text{ ppm}$, ความเร็วรอบการกวน = 200 rpm , $[\text{TBP}]_{\text{org}} = 10\% \text{ v/v}$,
 $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{org}} = 100 \text{ ml/min}$ โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

ของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนในช่วงที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 3 โมลต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น

และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนในช่วงที่มีความเข้มข้นมากกว่า 3 โมลต่อลิตร พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของกรดไนตริกที่เพิ่มขึ้น นอกจากจะรบกวนภาวะสมดุลในปฏิกิริยาที่ (4.2) แล้ว ยังไปรบกวนภาวะสมดุลในปฏิกิริยาที่ (4.3) และ (4.4) ด้วย ตามหลักเลอชาเตอลิเยร์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ปฏิกิริยาที่ (4.3) จะดำเนินจากซ้ายไปขวา ส่งผลให้ความเข้มข้นของ TBP อิสระในสารละลายอินทรีย์มีค่าลดลง และในปฏิกิริยาที่ (4.4) ก็ดำเนินจากซ้ายไปขวาด้วย ส่งผลให้ความเข้มข้นของไอออนอิสระของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากในสารละลายป้อนมีค่าลดลงด้วยเช่นเดียวกัน จากการลดลงของทั้งความเข้มข้นของ TBP อิสระในสารละลายอินทรีย์และความเข้มข้นของไอออนอิสระของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากในสารละลายป้อน ทำให้ปฏิกิริยาการสกัดที่ (4.2) เกิดการดำเนินปฏิกิริยาย้อนกลับจากขวามาซ้าย ทำให้การสกัดเกิดขึ้นได้น้อยลง เปอร์เซ็นต์การสกัดจึงลดลง แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนในช่วงที่ความเข้มข้นมากกว่า 3 โมลต่อลิตร ทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Borong et al. (Borong et al., 1992: 391-398) และ Chaohong et al. (Chaohong et al., 1994: 91-98)

ในการพิจารณาหาความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสมต่อการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก พบว่าความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่ 3 โมลต่อลิตร เป็นค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม

4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน

การทดลองนี้ทำการศึกษาเพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของ TBP ในสาร

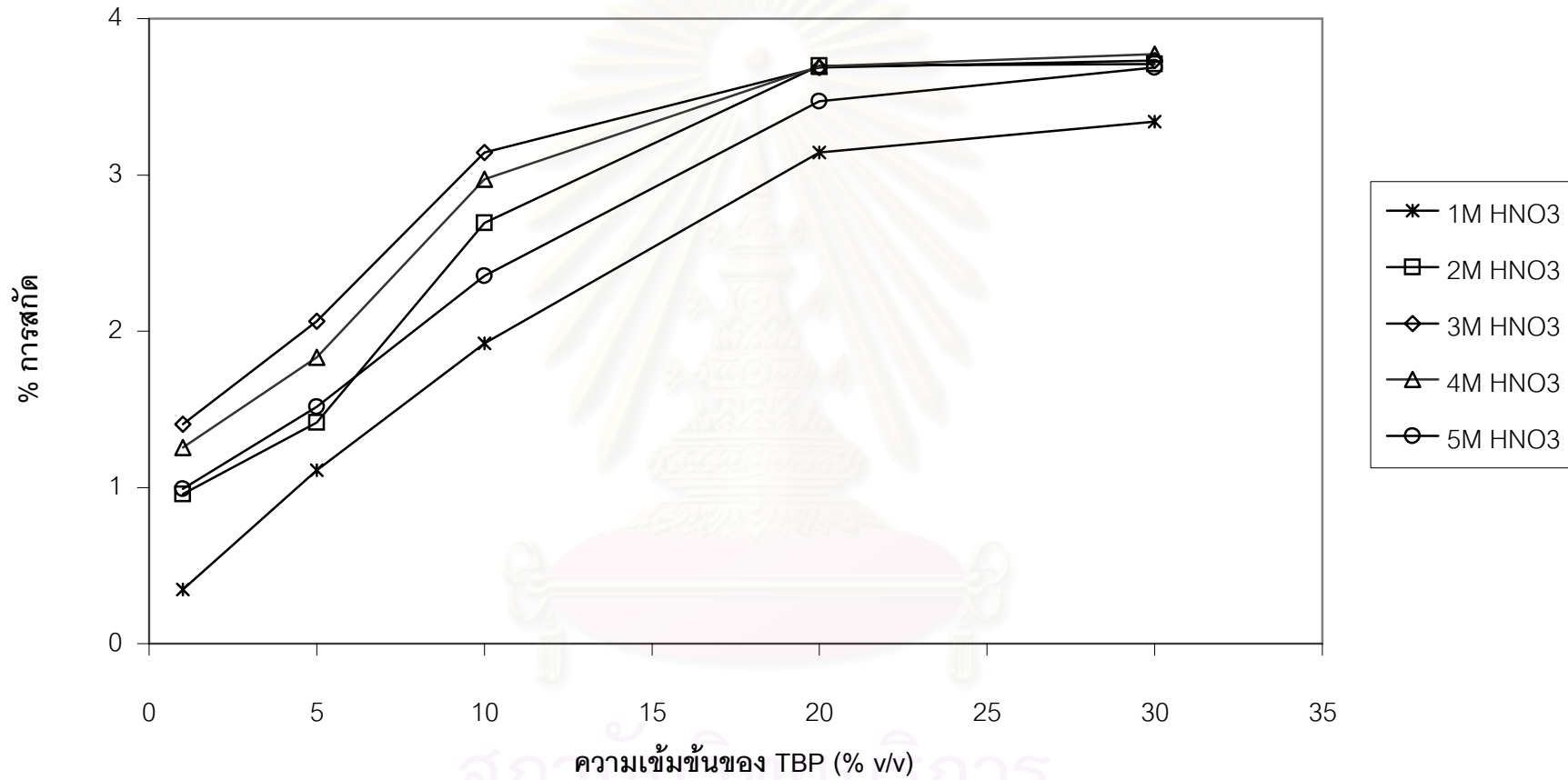
ละลายอินทรีย์เท่ากับ 1, 5, 10, 20 และ 30% โดยปริมาตรที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน เพื่อหาความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่เหมาะสม

ผลการทดลองที่ได้สามารถพิจารณาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียม โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การสกัดสามารถแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อนได้ดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 (ข้อมูลในการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก: ตารางที่ ก-7, ก-8 และ ก-9, ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดดูได้จากภาคผนวก ข: ตารางที่ ข-7, ข-8 และ ข-9)

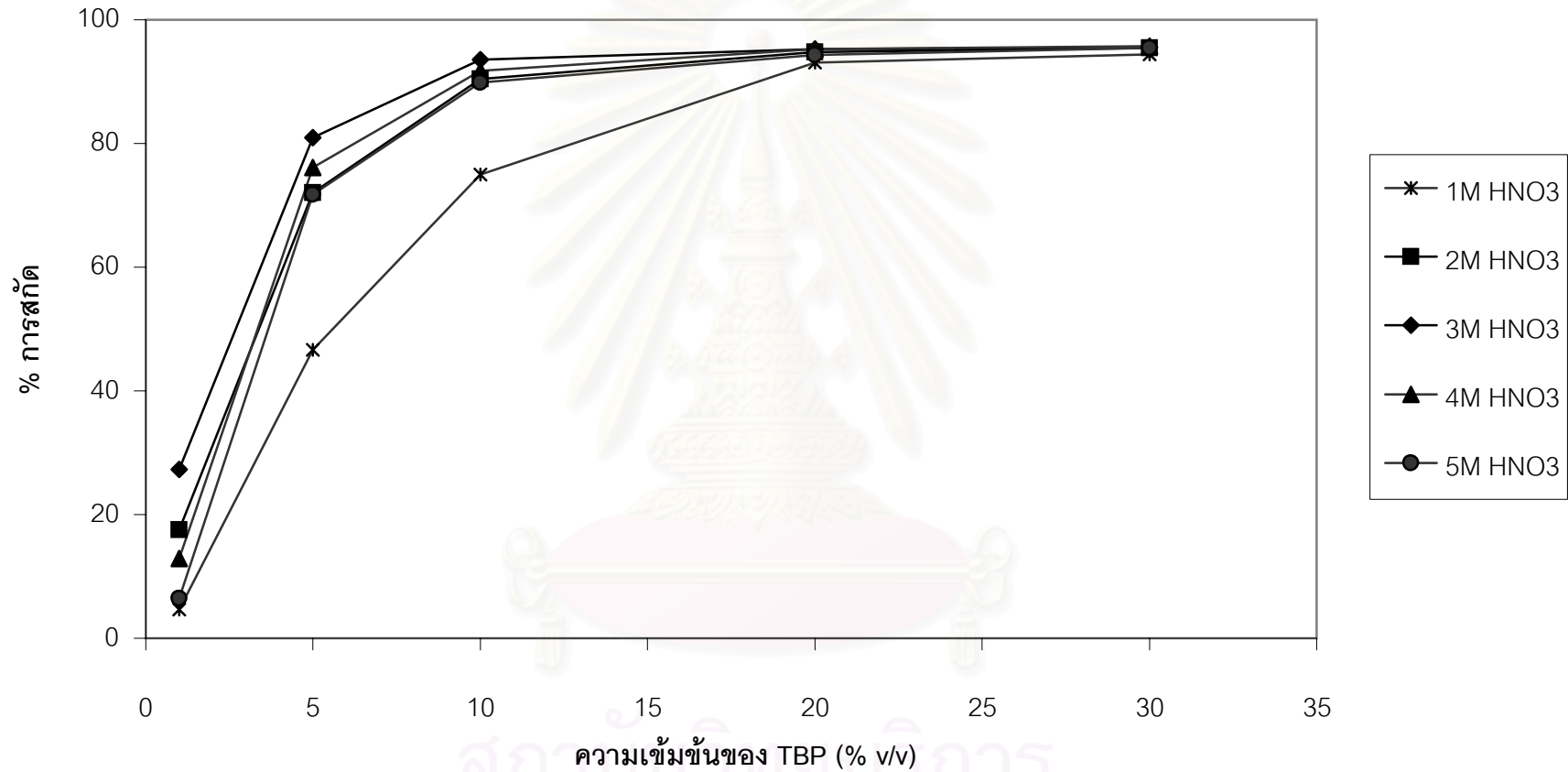
ในรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายากจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TBP มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายากก็จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีแนวโน้มในการสกัดนี้เหมือนกันทุกๆ ค่าความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน จะให้แนวโน้มของความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายากกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่มีลักษณะเหมือนกัน

ในรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TBP มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียมก็จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีแนวโน้มในการสกัดนี้เหมือนกันทุกๆ ค่าความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน จะให้แนวโน้มของความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดยูเรเนียมกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่มีลักษณะเหมือนกัน

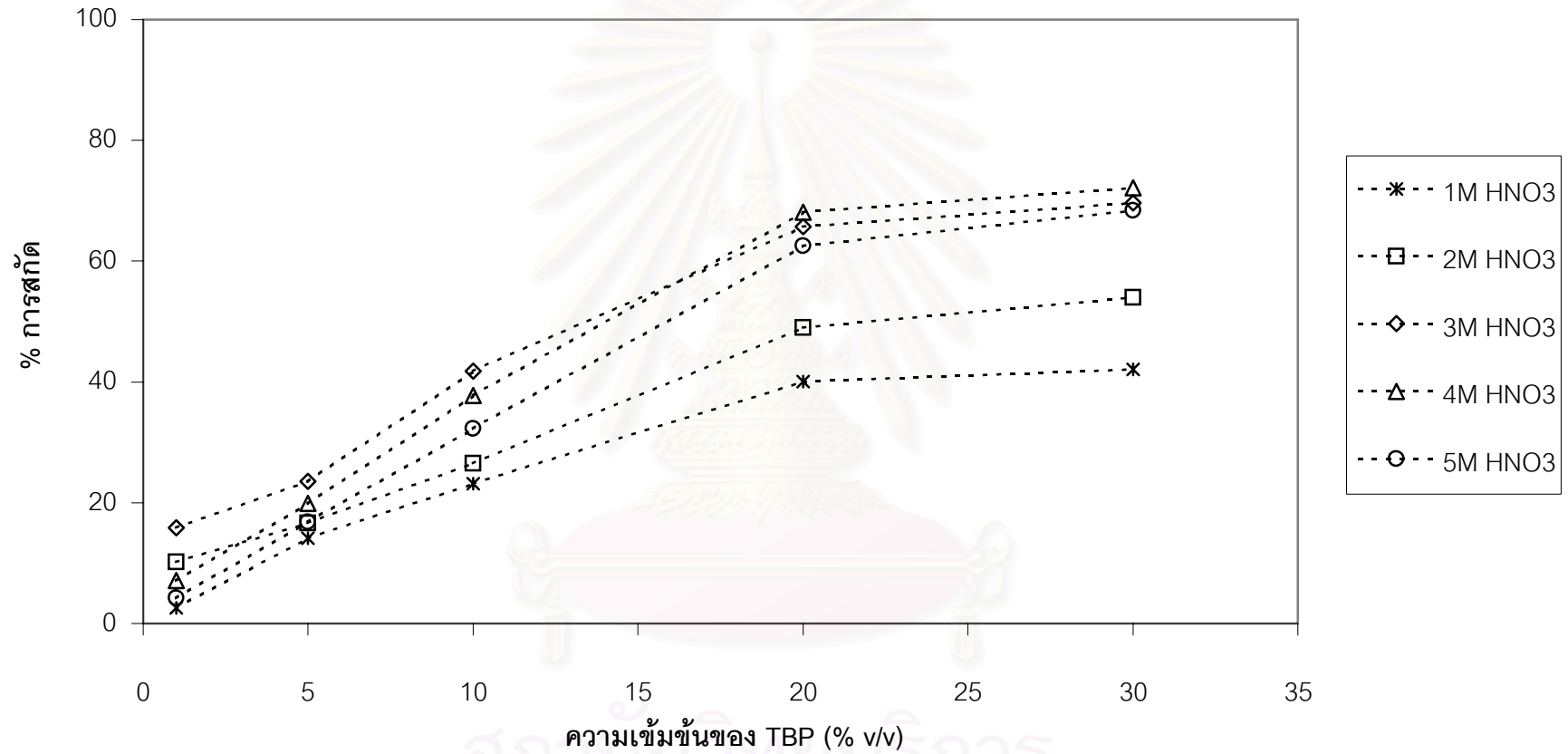
ในรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของทอเรียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จนมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TBP มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของทอเรียมก็จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะมีแนวโน้มในการสกัดนี้เหมือนกันทุกๆ ค่าความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน จะให้แนวโน้มของความสัมพันธ์ของ



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายากกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน เมื่อ $[TBP]_{org} = 1, 5, 10, 20$ และ 30% v/v, $[Feed] = 1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน = 200 rpm, $[HNO_3]_{feed} = 1-5$ M, $Q_{feed} = Q_{org} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดยูเรเนียมกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน เมื่อ $[TBP]_{org} = 1, 5, 10, 20$ และ 30% v/v, $[Feed] = 1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน $= 200$ rpm, $[HNO_3]_{feed} = 1-5$ M, $Q_{feed} = Q_{org} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดทอเร็มกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน เมื่อ $[TBP]_{org} = 1, 5, 10, 20$ และ 30% v/v, $[Feed] = 1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน = 200 rpm, $[HNO_3]_{feed} = 1-5$ M, $Q_{feed} = Q_{org} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

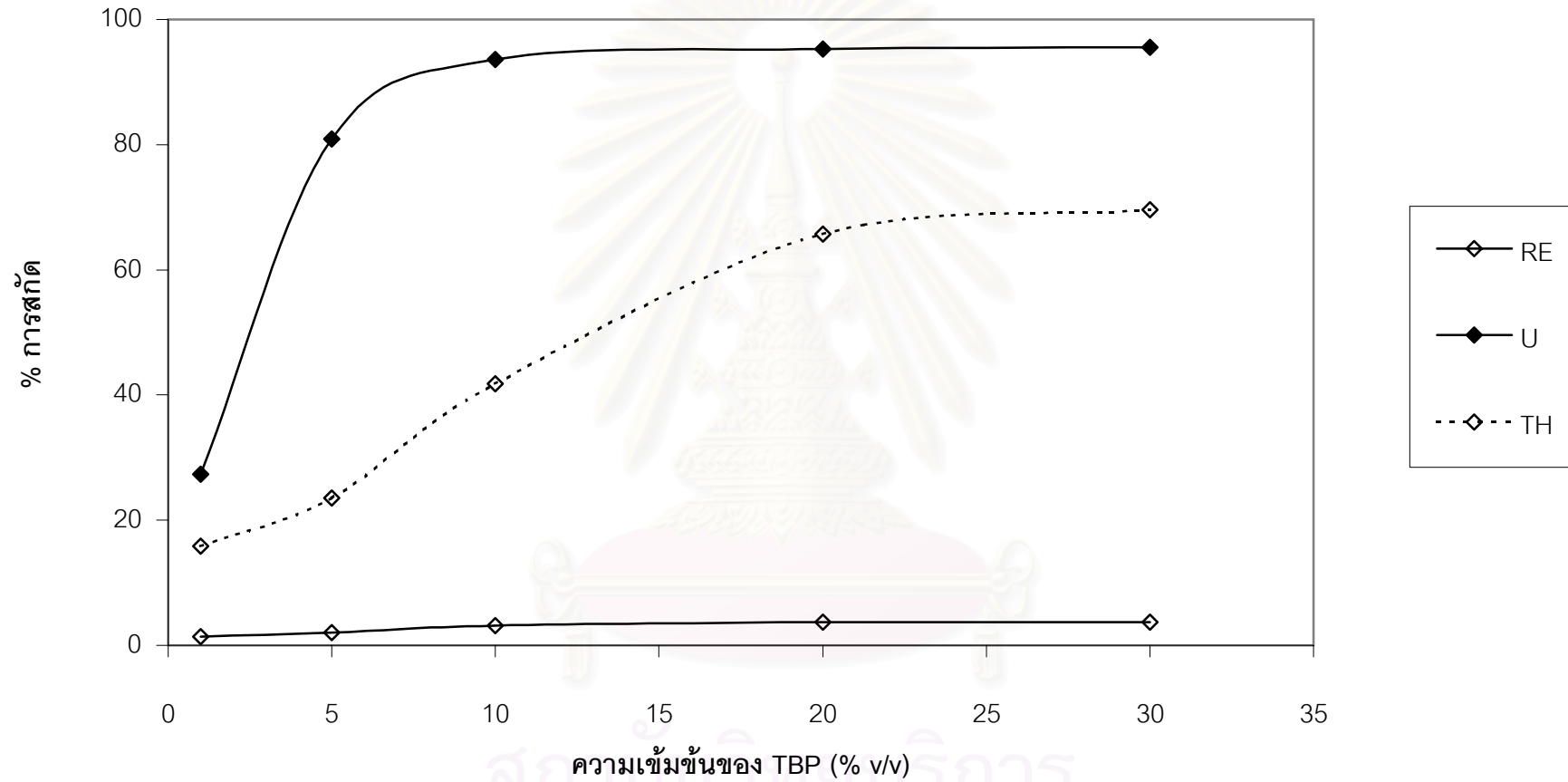
เปอร์เซ็นต์การสกัดทอเร็มกับความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายบ่อนที่มีลักษณะเหมือนกัน

ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเร็มดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับนั้น สามารถที่จะพิจารณาความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเร็มกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ร่วมกันได้ดังรูปที่ 4.11 (ข้อมูลในการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก: ตารางที่ ก-10, ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดดูได้จากภาคผนวก ข: ตารางที่ ข-10)

ในรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเร็ม และธาตุหายากจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนมีค่าเป็นค่าคงที่ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TBP มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเร็ม และธาตุหายากก็จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ในช่วงก่อนที่ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเร็มและธาตุหายากจะมีค่าเป็นค่าคงที่ พบว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเร็มและธาตุหายากจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมดุลในปฏิกิริยาที่ (4.2) ความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น จะรบกวนภาวะสมดุลของปฏิกิริยาตามหลักเลอชาเตอลิเยร์ ทำให้ปฏิกิริยาการสกัดดำเนินจากซ้ายไปขวา ส่งผลให้การสกัดได้ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ในช่วงก่อนที่ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเร็มและธาตุหายากมีค่าเป็นค่าคงที่ จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ในช่วงหลังจากค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเร็มและธาตุหายากมีค่าเป็นค่าคงที่ พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเร็มและธาตุหายาก ทั้งนี้เนื่องจากในการทดลอง จะทำการควบคุมความเร็วรอบการกวนให้คงที่ ทำให้หยดมีขนาดมีค่าคงที่ พื้นที่ผิวสัมผัสผิวดังที่ ขณะที่สารสกัด TBP ที่จะเข้าทำปฏิกิริยาการสกัดในปฏิกิริยาที่ (4.2) จะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของหยด ทำให้สารสกัด TBP ที่จะทำปฏิกิริยามีข้อจำกัดของพื้นที่ผิว



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ เมื่อ $[TBP]_{org} = 1, 5, 10, 20$ และ 30% v/v, $[Feed] = 1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน = 200 rpm, $[HNO_3]_{feed} = 3$ M, $Q_{feed} = Q_{org} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

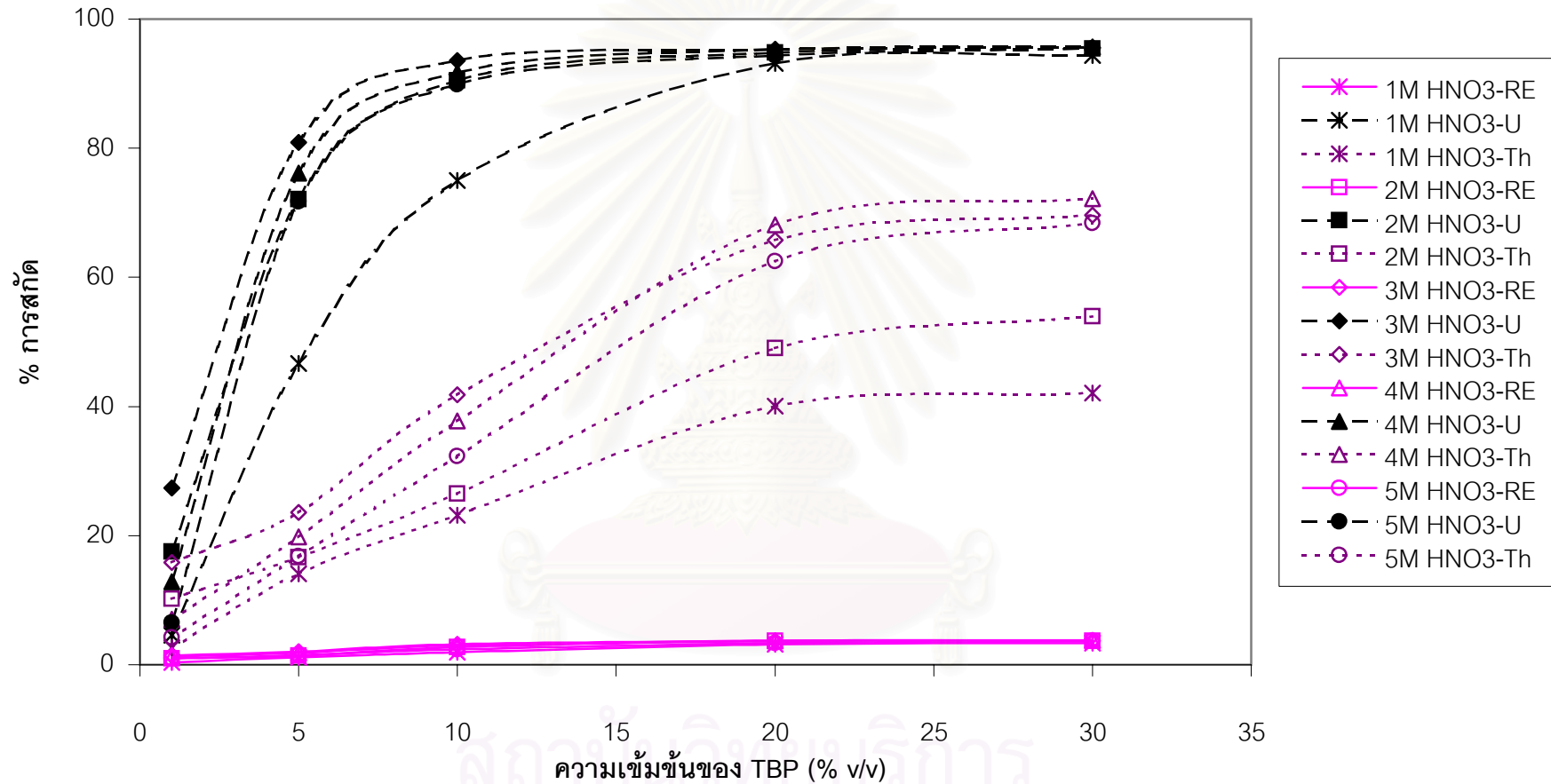
สัมผัส เปอร์เซ็นต์การสกัดจึงมีอัตราการการเพิ่มลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเป็นค่าคงที่ที่ความเข้มข้นของ TBP มีค่าสูงๆ

ในการพิจารณาหาความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่เหมาะสม พบว่าเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 20% โดยปริมาตร เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจะมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรูในเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ 20% โดยปริมาตร เป็นค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม

ผลการทดลองที่ได้สามารถพิจารณาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน โดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การสกัด สามารถแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อนได้ดังรูปที่ 4.12 (ข้อมูลในการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก: ตารางที่ ก-7, ก-8 และ ก-9, ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดดูได้จากภาคผนวก ข: ตารางที่ ข-7, ข-8 และ ข-9)

ในรูปที่ 4.12 พบว่า เส้นกราฟเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากสามารถจะแบ่งแยกออกจากกันเป็น 3 กลุ่มได้ชัดเจนตามแต่ชนิดของธาตุที่มีความสามารถในการสกัดที่แตกต่างกัน และจากความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์กับเปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน จะพบว่า มีพฤติกรรมและแนวโน้มในการสกัดเหมือนกันตามแต่ชนิดของธาตุ

เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์และค่าความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสม พบว่า ความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ 20% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่ 3 โมลต่อลิตร เป็นค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสกัด จากภาวะที่เหมาะสม สามารถสกัดยูเรเนียมได้ประมาณ 95% และสามารถสกัดทอเรียมได้ประมาณ 70% ในขณะที่ทำการสกัดธาตุหายากได้น้อยกว่า 5% สรุปได้ว่าการสกัดยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายากโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรูนั้น สามารถที่จะแยก



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมกับความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่

ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน เมื่อ $[TBP]_{org} = 1, 5, 10, 20$ และ $30\% v/v$, $[Feed] = 1,000$ ppm,

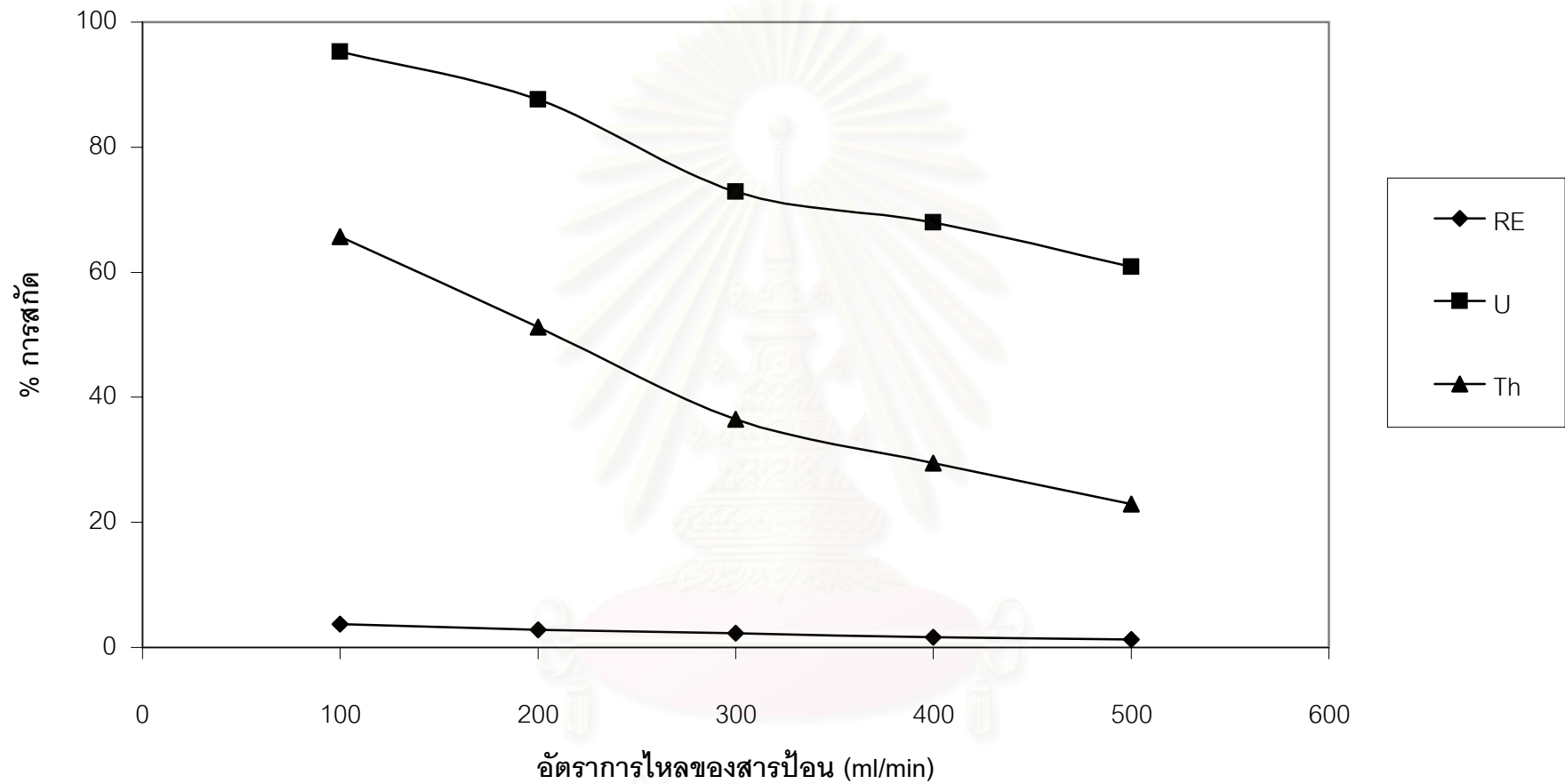
ความเร็วรอบการกวน = 200 rpm, $[HNO_3]_{feed} = 1-5$ M, $Q_{feed} = Q_{org} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

ยูเรเนียมและทอเรียมออกจากธาตุหายากได้ โดยที่ยูเรเนียมและทอเรียมจะถูกสกัดจากสารละลายป้อนไปอยู่ในสารละลายอินทรีย์ ในขณะที่ธาตุหายากยังคงอยู่ในสารละลายป้อน

4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรุ

การทดลองนี้ทำการศึกษาเพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อนที่มีผลต่อการสกัดโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรุ โดยศึกษาที่อัตราส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อนเท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 ซึ่งในการทดลองจะใช้อัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์คงที่ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับ 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ และใช้ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรุ ได้แก่ ความเร็วรอบการหมุนเท่ากับ 200 รอบต่อนาที ความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่ 20% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่ 3 โมลต่อลิตร สามารถแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมกับอัตราการไหลของสารป้อนดังรูปที่ 4.13 (ข้อมูลในการทดลองดูได้จากภาคผนวก ก: ตารางที่ ก-11, ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดดูได้จากภาคผนวก ข: ตารางที่ ข-11)

ในรูปที่ 4.13 พบว่า เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสัดส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน โดยพิจารณาจากอัตราการไหลของสารละลายป้อน เมื่อให้อัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์มีค่าคงที่ที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อน ทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของสารละลายป้อนมีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก ทั้งนี้เนื่องจากการที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่างสารละลายป้อนกับสารละลายอินทรีย์ (Residence time) มีค่าน้อยลง ซึ่งส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาการสกัดลดน้อยลง ประสิทธิภาพในการสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจึงมีค่าลดลง นั่นคือการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อนเมื่ออัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์มีค่าคงที่ หรือการลดสัดส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดของยูเรเนียม



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์การสกัดของธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมกับอัตราการไหลของสารป้อน เมื่อ $Q_{\text{feed}} = 100, 200, 300, 400$ และ 500 ml/min, $[\text{Feed}] = 1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน = 200 rpm, $[\text{TBP}]_{\text{org}} = 20\%$ v/v, $[\text{HNO}_3]_{\text{feed}} = 3$ M, $Q_{\text{org}} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

ทอเรียมและธาตุหายากมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของวีรวุฒิ (วีรวุฒิ ปัททวิคคา, 2541) และไพศาล (ไพศาล อภินพพัฒน์, 2541)

4.6 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี

การศึกษานี้ทำเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดยูเรเนียม, ทอเรียมและธาตุหายากที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี โดยศึกษาที่ความเร็วรอบการกวาดเท่ากับ 100, 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที ที่การคำนวณทฤษฎีต่างๆ กัน ดังรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ (ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดได้จากภาคผนวก ข: ตารางที่ ข-12, ข-13 และ ข-14 ตามลำดับ) ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดทางทฤษฎี ทุกสมการที่ใช้จะได้รับการทดลองในหอสกัดแบบจวนหมุนซึ่งมีลักษณะการทำงานเหมือนกับหอสกัดที่ใช้ในงานวิจัย โดยจะสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

การคำนวณไฮลด์อัฟ

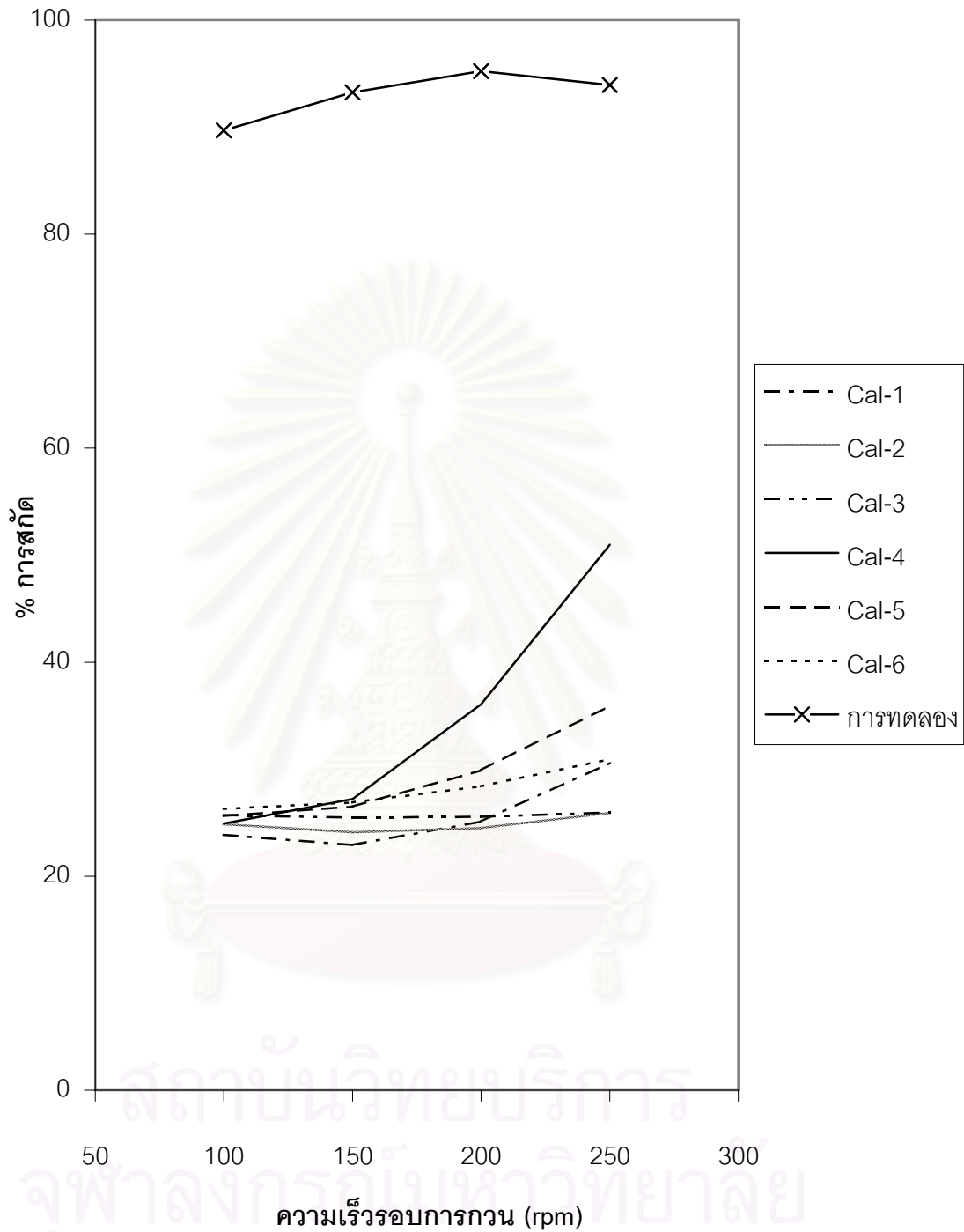
1. การคำนวณไฮลด์อัฟของ Laddha, Degalleesan และ Kannappan สมการที่ (2.31)
2. การคำนวณไฮลด์อัฟของ Kumar และ Hartland สมการที่ (2.33)

การคำนวณขนาดของหยด

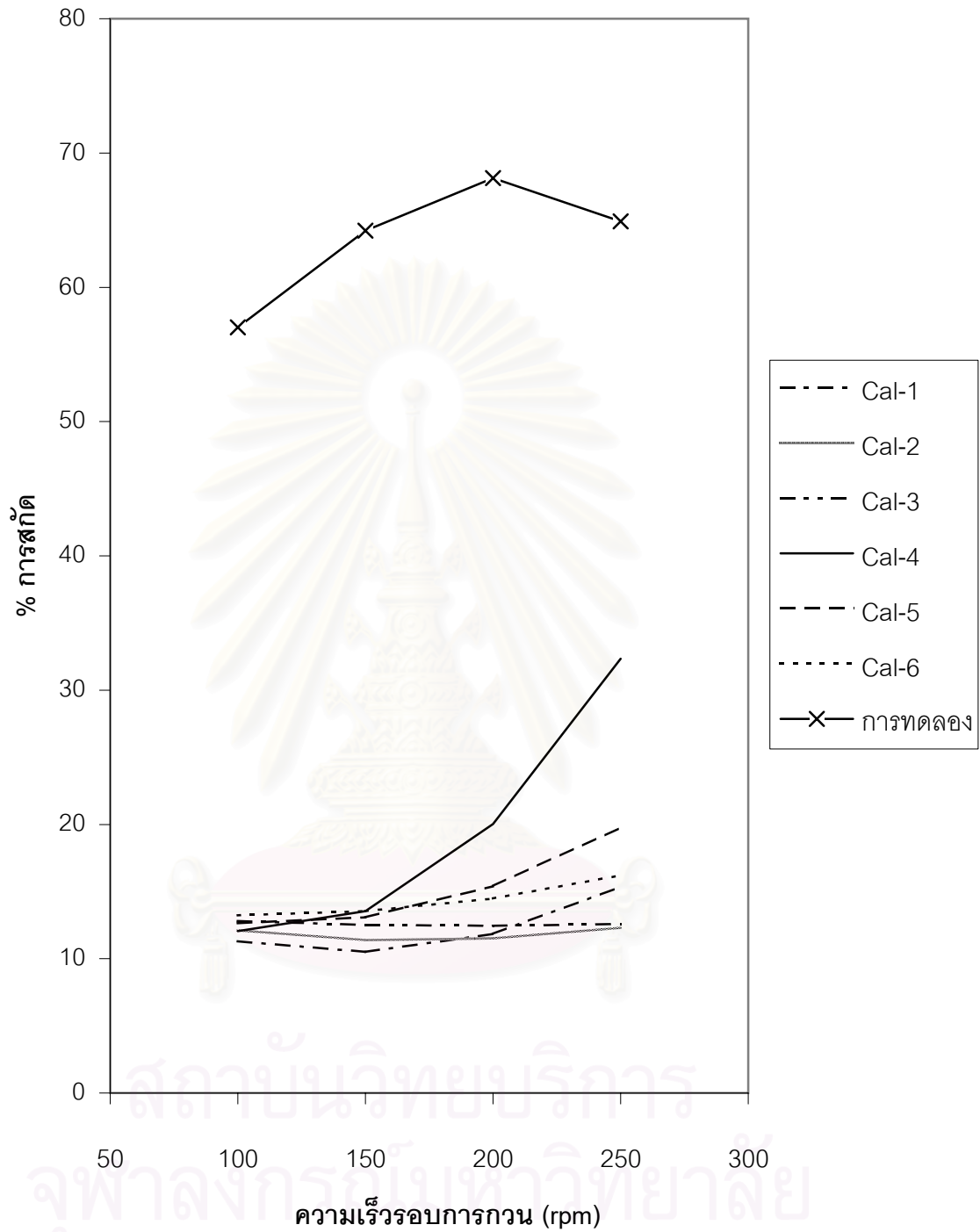
1. การคำนวณขนาดของหยดของ Marr, Husung และ Moser สมการที่ (2.38)
2. การคำนวณขนาดของหยดของ Kumar และ Hartland ในปี 1986 สมการที่ (2.40)
3. การคำนวณขนาดของหยดของ Kumar และ Hartland ในปี 1996 สมการที่ (2.41)

ในแต่ละชุดการคำนวณทางทฤษฎีใช้สมการดังต่อไปนี้

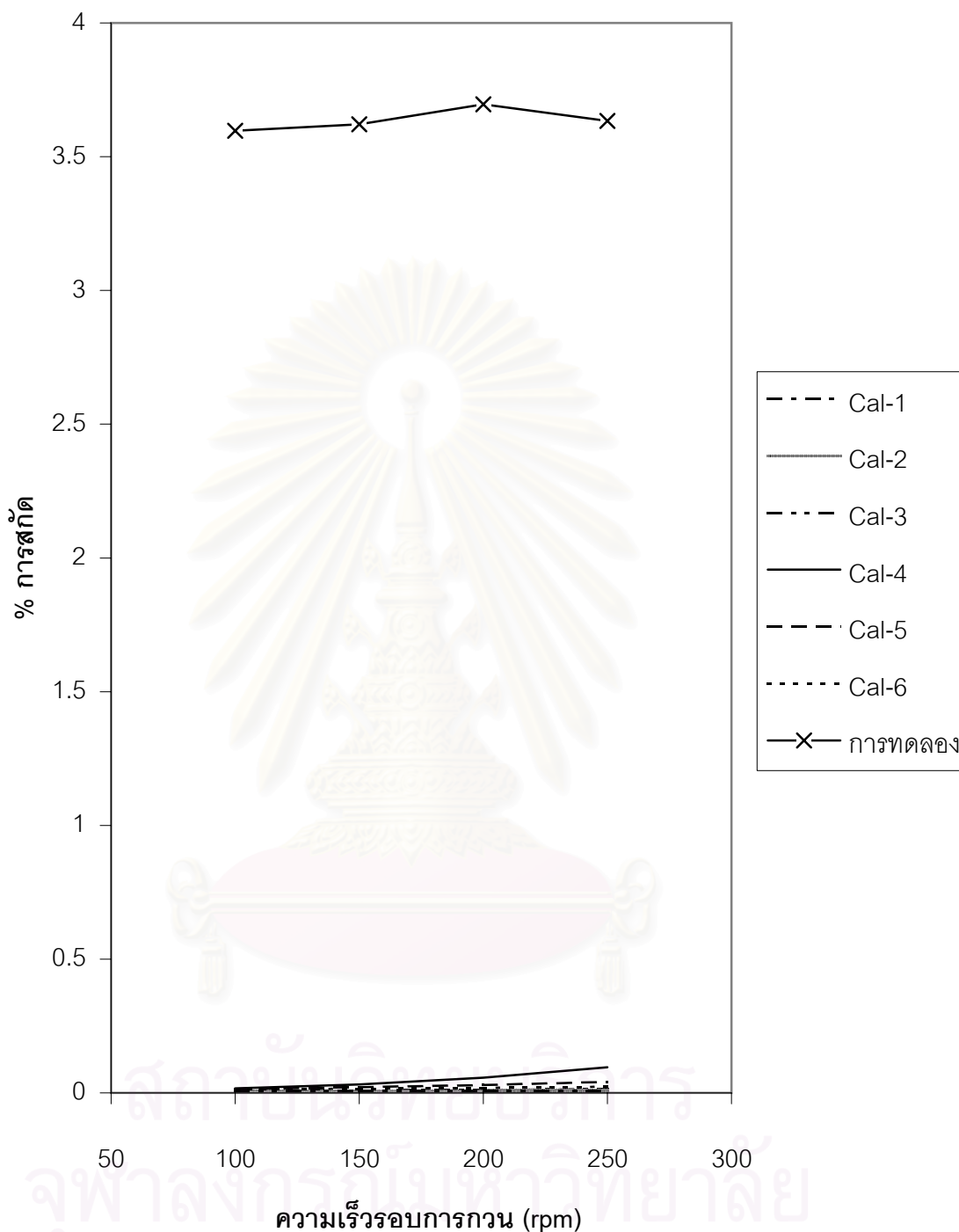
- เส้น Cal-1 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 1 และขนาดของหยดของในสมการที่ 1
 เส้น Cal-2 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 1 และขนาดของหยดของในสมการที่ 2
 เส้น Cal-3 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 1 และขนาดของหยดของในสมการที่ 3
 เส้น Cal-4 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 2 และขนาดของหยดของในสมการที่ 1
 เส้น Cal-5 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 2 และขนาดของหยดของในสมการที่ 2
 เส้น Cal-6 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 2 และขนาดของหยดของในสมการที่ 3



รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดยูเรเนียมที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี เมื่อความเร็วรอบการกวน = 100, 150, 200 และ 250 rpm, $[Feed] = 1,000$ ppm, $[TBP]_{org} = 20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed} = 4$ M, $Q_{feed} = Q_{org} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน



รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดทอเร็มที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี เมื่อความเร็วรอบการกวน = 100, 150, 200 และ 250 rpm, [Feed] = 1,000 ppm, [TBP]_{org} = 20% v/v, [HNO₃]_{feed} = 4 M, Q_{feed} = Q_{org} = 100 ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน



รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดธาตุหายากที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี เมื่อความเร็วรอบการกวน = 100, 150, 200 และ 250 rpm, $[Feed] = 1,000$ ppm, $[TBP]_{org} = 20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed} = 4$ M, $Q_{feed} = Q_{org} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน

จากรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 พบว่าประสิทธิภาพในการสกัดของยูเรเนียม ทอเรียมและ ธาตุหายากที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างกับการคำนวณทางทฤษฎี โดยที่เปอร์เซ็นต์ในการ สกัดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีในแต่ละชุดสมการนั้น จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันและมีลักษณะ ของเส้นกราฟในทิศทางเดียวกัน และพบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจะ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดที่น้อยกว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากชุด สมการที่ใช้ในการคำนวณทางทฤษฎี ทุกสมการได้จากการทดลองที่เกิดการสกัดสกัดโดยอาศัย สมบัติการละลายทางกายภาพ แต่ในการทดลอง การสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากโดยใช้ TBP เป็นสารสกัด จะมีทั้งการสกัดโดยอาศัยสมบัติการละลายทางกายภาพและจากการเกิด ปฏิกิริยาในระบบด้วย และอาจเกิดจากความแตกต่างของขนาดของหยดและไฮลด์อัฟที่ได้จากการ คำนวณทางทฤษฎีกับการทดลองจริงในหอสกัดแบบจานหมุน ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดที่ได้ จากจากการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าที่แตกต่างกันและน้อยกว่าประสิทธิภาพในการสกัดที่ได้จากการ ทดลอง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการสกัดแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากแรมโมนาไซต์โดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู โดยมีสารสกัด TBP ผสมในน้ำมันก๊าดเป็นสารละลายอินทรีย์ และทำการปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ยูเรเนียมและทอเรียมสามารถสกัดแยกออกจากธาตุหายากในแรมโมนาไซต์โดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรูได้ โดยมีสารสกัด TBP (Tri-n-butyl phosphate) ผสมในน้ำมันก๊าดเป็นสารละลายอินทรีย์
2. เมื่อใช้เวลาในการสกัดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสกัดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนเมื่อเวลาในการสกัดมากกว่า 40 นาที ประสิทธิภาพในการสกัดจะมีค่าคงที่
3. ความเร็วรอบการกวนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการสกัดจะมีค่าลดลง เมื่อความเร็วรอบการกวนมีค่ามากกว่า 200 รอบต่อนาที
4. ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการสกัดจะมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของกรดไนตริกมีค่ามากกว่า 3 โมลต่อลิตร
5. ความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการสกัดจะมีค่าเป็นค่าคงที่ เมื่อความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์มีค่าสูงๆ
6. อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากมีค่าลดลง เมื่ออัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์เป็นค่าคงที่
7. ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดยูเรเนียมและทอเรียมออกจากธาตุหายากในแรมโมนาไซต์โดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู มีดังนี้

- ความเร็วรอบการกวนเท่ากับ 200 รอบต่อนาที

- ความเข้มข้นของกรดไนตริกเท่ากับ 3 โมลต่อลิตร
- ความเข้มข้นของ TBP เท่ากับ 20 % โดยปริมาตร
- อัตราส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อนเท่ากับ 1:1

จากภาวะในการสกัดที่เหมาะสม สามารถสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมเท่ากับ 3.686%, 95.291% และ 65.729 % ตามลำดับ

8. ประสิทธิภาพในการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี จะมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพในการสกัดที่ได้จากการทดลอง อาจเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ ขนาดของหยดและไฮลด์อัฟ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรติดตั้งหอสตรีป (Stripping column) เพื่อเป็นการนำสารสกัดกลับมาใช้ใหม่ในระบบ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณสารสกัดที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการได้
2. การทดลองที่ความเร็วรอบการกวนสูงๆ นั้น การควบคุมอุปกรณ์จะกระทำได้ยากขึ้น และอาจเกิดการเสียหายได้ เนื่องจากเกิดการสั่น และแกว่งของแกนเหล็กและแผ่นจานภายในหอสกัด
3. หากมีการนำหอสกัดแบบจานหมุนมีรูนี้ไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม ควรมีการขยายความสูงของหอสกัดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการสกัดที่สูงขึ้น
4. ควรทำการทดลองหาขนาดของหยดและไฮลด์อัฟเพิ่มเติม และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี เพื่อศึกษาผลของขนาดของหยดและไฮลด์อัฟที่มีผลต่อการสกัดในหอสกัดแบบจานหมุนมีรู
5. จากผลการทดลองที่ได้ พบว่า ที่ความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์เท่ากับ 5-10% โดยปริมาตร ประสิทธิภาพในการสกัดของยูเรเนียมกับทอเรียมจะมีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องจากในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวยูเรเนียมจะมีค่าอัตราส่วนการกระจายที่มากกว่าทอเรียมมาก ซึ่งสามารถนำข้อมูลจากการทดลองที่ได้นี้ไปศึกษาการสกัดแยกยูเรเนียมออกจากทอเรียมโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรูได้ต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จตุรพร บ้านแก่ง. 2539. ผลของสารเซอร์แฟกแตนต์ต่อการสกัดไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีจากน้ำมันหล่อลื่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จักร์บังกช ศรีบุญญาวัฒน์. 2541, กรกฎาคม. การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน. ในหนังสือประกอบการฝึกอบรมหลักเรื่อง การฝึกอบรมหลักสูตรพลังงานนิวเคลียร์และการใช้ประโยชน์ สำหรับอาจารย์ราชภัฏ, หน้า 129-149. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ.
- จีรวาจน์ อีชอ. 2541. ผลของการป้อนเวียนรอบต่อการสกัดแยกธาตุกลุ่มแอร์ไธต์โดยอุปกรณ์พัลส์คอลด์มันน์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เขาวเลข ชยวัฒน์นางกุล, อารมณ์ บุชมงคล, แสงนวล หงษ์ศิริวิชร, เขาวน รอดทองคำ และกรรติกา ศิริเสนา. 2529. การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีละลาย และวิธีชะล้างในการแยกแอร์ไธต์ ยูเรเนียม และทอเรียม ออกจาก Hydrous metal oxide cake จากการย่อยแร่โมนาไซต์ด้วยต่าง. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ.
- โชคชัย สุทธิปริษา. 2537. การแยกน้ำออกจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานโดยกระบวนการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดวงพร ถนอมงาม. 2539. การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่ซีโนไทม์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นัยนา ศรีदारณพ. 2517. การสกัดและหาปริมาณของธาตุทอเรียมจากทรายโมนาไซต์ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต แผนกวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะสาร ประเสริฐธรรม. 2536. หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพศาล อภินพพัฒน์. 2541. การสกัดแยกและนำกลับโครเมตด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใย
กลวงในหลอดเดียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรพัฒน์ อรรถยุติ. 2526. การศึกษากระบวนการสกัดของเหลวที่จะเป็นประโยชน์ต่อการ
อุตสาหกรรมในประเทศไทย. โครงการวิจัย, เลขที่ 25-IE-2521. ศูนย์ส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรม
ศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีรวัฒน์ ปัตทวิคคง. 2541. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติกกับไซโตเดียม
อะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิต
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมิทธิ์ ฉัตรภุติ. 2542. เทคนิคอัลตราโซนิกสำหรับวัดค่าไฮลด์อัฟในคอลัมน์สกัดแบบจานหมุน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต แผนกวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ บัณฑิต
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อัมพิกา อภิชัยบุคคล. 2543. การสกัดซีเรียมจากแร่โมนาไซต์ด้วยตัวสกัดชนิดที่เป็นกรดและตัว
สกัดชนิดที่เป็นกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อาภรณ์ บุษมมงคล. 2542. Neutron Activation Analysis. ในเอกสารประกอบการบรรยายเรื่อง
การฝึกอบรมเจ้าหน้าที่เดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1, หน้า 1-14. กองเคมี
สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ.

เอกสารเผยแพร่, ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ.

ภาษาอังกฤษ

Alegret, S. 1988. Developments in solvent extraction. (n.p.): Ellis Horwood Limited.

Borong, B., et al. 1992. New extractants for reprocessing of spent Th-U fuel: Extraction of
U(VI), Th(IV) from nitric acid media by di(2-ethylhexyl)sulfoxides(DEHSO).
J. Radioanal. Nucl. Chem. 162(2): 391-398.

- Chaohong, S., et al. 1994. Extraction of U(VI), Th(IV) and some fission products nitric acid medium by sulfoxides and effect of γ -irradiation on the extraction. J. Radioanal. Nucl. Chem. 178(1): 91-98.
- Coimbra, J. S. R., Mojola, F., and Meirelles, A. J. A. 1998. Dispersed phase hold-up in a perforated rotating disc contactor (PRDC) using aqueous two-phase systems. Journal of Chemical Engineering of Japan 31: 227-280.
- Cusack, R. W., Fremeaux, P., and Glatz, A. D. 1991, February. Fresh look at liquid-liquid extraction. Chemical Engineering: 67-76.
- Cussler, E. L. 1997. Diffusion, mass transfer in fluid systems. Cambridge University Press.
- Hines, A. L., and Maddox, R. N. 1985. Mass transfer: fundamentals and applications. New Jersey: Prentice-Hall.
- Karr, A. 1991, April. A fresh look at liquid-liquid extraction. Chemical Engineering: 112-119.
- Krishna, R., and Shrikant, M. N. 1989. Mass transfer efficiency of sieve tray extraction columns. Industrial Engineering Chemical Research 28: 642-644.
- Kumar, A., and Hartland, S. 1986. Prediction of drop size in rotating disc extractors. Canadian Journal of Chemical Engineering 64: 915-924.
- Kumar, A., and Hartland, S. 1995. A unified correlation for the prediction of dispersed-phase hold-up in liquid-liquid extraction columns. Industrial & Engineering Chemistry Research 34(11): 3925-3940.
- Kumar, A., and Hartland, S. 1996. A unified correlation for the prediction of drop size in liquid-liquid extraction columns. Industrial & Engineering Chemistry Research 35 (8): 2682-2695.
- Laddha, G. S., Degaleesan, T. E., and Kannappan, R. 1978. Hydrodynamics and mass transport in rotary disk contactors. Canadian Journal of Chemical Engineering 64: 137-150.

- McCabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P. 1993. Unit operations of chemical engineering. 5 th ed. (n.p.): McGraw-Hill.
- Merck. 1999-2000. Chemicals reagents. Germany: Merck.
- Perry, R. H. 1997. Perry's chemical engineers' handbook. 7th ed. New York: McGraw-Hill.
- Pina, C. G., and Meirelles, A. J. 2000. Deacidification of corn oil by solvent extraction in a perforated rotating disc column. Journal of the American Oil Chemists' Society 11(9): 553-559.
- Porto, A. L. F., Lima-Filho, J. L., Aires-Barros, M. R., Cabral, J. M. S., and Tambourgi, E. B. 1997. Extraction of recombinant cytochrome b_5 from disrupted *Escherichia coli* cells with an aqueous two-phase system in a continuous perforated rotating disc contactor. Biotechnology Techniques 11(9): 641-643.
- Schweitzer, P. A. 1997. Handbook of separation techniques for chemical engineers. 3 rd ed. (n.p.): McGraw-Hill.
- Seader, J. D., and Henley, J. E. 1998. Separation process principles. (n.p.): John Wiley & Sons.
- Tavlarides, L. L., Bae, J. H., and Lee, C. K. 1987. Solvent extraction, membranes, and ion exchange in hydrometallurgical dilute metals separation. Separation Science and Technology 22(2&3): 581-617.
- Thronton, J. D., et al. eds. 1992. Science and practice of liquid – liquid extraction. Oxford: Clarendon Press.
- Treybal, R. E. 1981. Mass-transfer operation. 3 rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Zhu, S. L., and Luo, G. S. 1997, August. Hydrodynamic and mass transfer performance of multiple upcomer extraction trays. The Canadian Journal of Chemical Engineering 75: 797-800.
- Perry, R. H. 1997. Perry's chemical engineers' handbook. 7th ed. New York: McGraw-Hill.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 แสดงข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพของการสกัด และหาเวลาในการสกัดที่เหมาะสม โดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=4$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

Time of extraction (min)	$[M]_{out}$: ppm		
	RE	U	Th
0	831.618	5.514	145.841
10	818.250	2.557	103.070
20	812.180	0.901	74.470
30	803.140	0.332	53.295
40	801.310	0.276	48.360
50	800.880	0.263	46.476
60	801.160	0.269	46.795

ตาราง ก-2 แสดงข้อมูลการศึกษาคิทธิพลของความเร็วยรอบการกวน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=100-250 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=4$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

ความเร็วรอบการกวน (rpm)	$[M]_{in}$: ppm			$[M]_{out}$: ppm		
	RE	U	Th	RE	U	Th
100	833.946	5.557	146.101	803.950	0.572	62.810
150	832.285	5.518	146.012	802.150	0.372	52.240
200	831.618	5.514	145.841	800.880	0.263	46.476
250	834.628	5.568	146.028	804.300	0.337	51.250

ตาราง ก-3 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายากโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed} = Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[TBP]_{org}$ (% v/v)	$[RE]_{in}$: ppm					$[RE]_{out}$: ppm				
	$[HNO_3]_{feed}$: M									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	810.814	825.416	813.519	833.461	820.374	808.000	817.501	802.087	823.012	812.250
5	809.124	827.617	815.988	834.916	823.682	800.143	815.903	799.143	819.621	811.210
10	807.214	822.618	813.215	830.319	824.318	791.709	800.454	787.651	805.650	804.902
20	814.321	824.358	808.384	833.254	822.164	788.731	793.856	778.582	802.430	793.612
30	809.215	823.813	809.972	835.617	821.364	782.194	793.254	779.754	804.100	791.068

ตาราง ก-4 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

[TBP] _{org} (% v/v)	[U] _{in} : ppm					[U] _{out} : ppm				
	[HNO ₃] _{feed} : M									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	5.147	5.124	5.388	5.493	5.391	4.910	4.225	3.915	4.786	5.042
5	5.124	5.214	5.431	5.531	5.531	2.735	1.457	1.037	1.320	1.561
10	5.012	5.131	5.342	5.561	5.561	1.255	0.489	0.342	0.460	0.565
20	5.121	5.156	5.310	5.534	5.491	0.353	0.267	0.250	0.264	0.310
30	5.087	5.168	5.431	5.681	5.461	0.286	0.236	0.241	0.244	0.250

ตาราง ก-5 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[TBP]_{org}$ (% v/v)	$[Th]_{in}$: ppm					$[Th]_{out}$: ppm				
	$[HNO_3]_{feed}$: M									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	141.321	145.125	143.641	145.684	144.685	137.617	130.321	120.901	135.361	138.545
5	140.124	146.128	144.745	145.813	145.813	120.354	121.811	110.652	116.884	121.352
10	139.874	144.654	143.364	144.843	145.216	107.500	106.361	83.436	90.121	98.350
20	140.852	144.528	141.986	146.084	145.638	84.420	73.701	48.659	46.551	54.628
30	139.854	143.941	142.384	146.842	144.941	80.964	66.284	43.268	40.861	45.861

ตาราง ก-6 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=10\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[HNO_3]_{feed} : M$	$[M]_{in} : ppm$			$[M]_{out} : ppm$		
	RE	U	Th	RE	U	Th
1	807.214	5.012	139.874	791.709	1.255	107.500
2	822.618	5.131	144.654	800.454	0.489	106.361
3	813.215	5.342	143.364	787.651	0.342	83.436
4	830.319	5.561	144.843	805.650	0.460	90.121
5	824.318	5.561	145.216	804.902	0.565	98.350

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก-7 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายากโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[HNO_3]_{feed}$ (M)	$[RE]_{in}$: ppm					$[RE]_{out}$: ppm				
	$[TBP]_{org}$: % v/v									
	1	5	10	20	30	1	5	10	20	30
1	810.814	809.124	807.214	814.321	809.215	808.001	800.143	791.709	788.731	782.194
2	825.416	827.617	822.618	824.358	823.813	817.501	815.903	800.454	793.856	793.254
3	813.519	815.988	813.215	808.384	809.972	802.087	799.143	787.651	778.582	779.754
4	833.461	834.916	830.319	833.254	835.617	823.012	819.621	805.650	802.430	804.100
5	820.374	823.682	824.318	822.164	821.364	812.250	811.210	804.902	793.612	791.068

ตาราง ก-8 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรั้ว ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[HNO_3]_{feed}$ (M)	$[U]_{in}$: ppm					$[U]_{out}$: ppm				
	$[TBP]_{org}$: % v/v									
	1	5	10	20	30	1	5	10	20	30
1	5.147	5.124	5.012	5.121	5.087	4.910	2.735	1.255	0.353	0.286
2	5.124	5.214	5.131	5.156	5.168	4.225	1.457	0.489	0.267	0.236
3	5.388	5.431	5.342	5.310	5.431	3.915	1.037	0.342	0.250	0.241
4	5.493	5.531	5.561	5.534	5.681	4.786	1.320	0.460	0.264	0.244
5	5.391	5.531	5.561	5.491	5.461	5.042	1.561	0.565	0.310	0.250

ตาราง ก-9 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดทอเรียมโดยสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[HNO_3]_{feed}$ (M)	$[Th]_{in}$: ppm					$[Th]_{out}$: ppm				
	$[TBP]_{org}$: % v/v									
	1	5	10	20	30	1	5	10	20	30
1	141.321	140.124	139.874	140.852	139.854	137.617	120.354	107.500	84.420	80.964
2	145.125	146.128	144.654	144.528	143.941	130.321	121.811	106.361	73.701	66.284
3	143.641	144.745	143.364	141.986	142.384	120.901	110.652	83.436	48.659	43.268
4	145.684	145.813	144.843	146.084	146.842	135.361	116.884	90.121	46.551	40.861
5	144.685	145.813	145.216	145.638	144.941	138.545	121.352	98.350	54.628	45.861

ตาราง ก-10 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=3$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[TBP]_{org}$: % v/v	$[M]_{in}$: ppm			$[M]_{out}$: ppm		
	RE	U	Th	RE	U	Th
1	813.519	5.388	143.641	802.087	3.915	120.901
5	815.988	5.431	144.745	799.143	1.037	110.652
10	813.215	5.342	143.364	787.651	0.342	83.436
20	808.384	5.310	141.986	778.582	0.250	48.659
30	809.972	5.431	142.384	779.754	0.241	43.268

ตาราง ก-11 แสดงข้อมูลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=3$ M, $Q_{org}=100$ ml/min, $Q_{feed}=100-500$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

อัตราการไหลของสารป้อน : ml/min	$[M]_{in}$: ppm			$[M]_{out}$: ppm		
	RE	U	Th	RE	U	Th
100	808.384	5.310	141.986	778.582	0.250	48.659
200	804.889	4.529	118.203	781.973	0.561	57.621
300	805.947	5.117	133.317	787.329	1.386	84.618
400	806.984	5.089	133.541	793.747	1.629	94.117
500	806.148	4.587	118.468	795.861	1.796	91.312

ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาประสิทธิภาพของการสกัด และหาเวลาในการสกัดที่เหมาะสมโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=4$ M, $Q_{feed} = Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

Time of extraction (min)	% การสกัด		
	RE	U	Th
10	1.607	53.626	29.327
20	2.337	83.659	48.938
30	3.424	93.979	63.457
40	3.644	94.994	66.841
50	3.696	95.230	68.132
60	3.662	95.121	67.914

ตาราง ข-2 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความเร็วยรอบการกวน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยใช้หอสกัดแบบจานหมุนมีรู (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=100-250 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=4$ M, $Q_{feed} = Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

ความเร็วรอบการกวน (rpm)	% การสกัด		
	RE	U	Th
100	3.597	89.707	57.009
150	3.621	93.258	64.222
200	3.696	95.230	68.132
250	3.634	93.948	64.904

ตาราง ข-3 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายากโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการหมุน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[TBP]_{org}$ (% v/v)	% การสกัดธาตุหายาก				
	$[HNO_3]_{feed} : M$				
	1	2	3	4	5
1	0.347	0.959	1.405	1.254	0.990
5	1.110	1.415	2.064	1.832	1.514
10	1.921	2.694	3.144	2.971	2.355
20	3.142	3.700	3.687	3.699	3.320
30	3.339	3.709	3.731	3.772	3.723

ตาราง ข-4 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการหมุน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[TBP]_{org}$ (% v/v)	% การสกัดยูเรเนียม				
	$[HNO_3]_{feed} : M$				
	1	2	3	4	5
1	4.604	17.544	27.339	12.870	6.473
5	46.623	72.056	80.905	76.136	71.779
10	74.960	90.469	93.597	91.728	89.840
20	93.106	94.821	95.291	95.229	94.354
30	94.377	95.433	95.562	95.705	95.422

ตาราง ข-5 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[TBP]_{org}$ (% v/v)	% การสกัดทอเรียม				
	$[HNO_3]_{feed} : M$				
	1	2	3	4	5
1	2.621	10.200	15.831	7.085	4.243
5	14.108	16.640	23.553	19.839	16.775
10	23.145	26.472	41.801	37.780	32.273
20	40.064	49.005	65.729	68.134	62.490
30	42.108	53.950	69.611	72.173	68.358

ตาราง ข-6 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=10\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[HNO_3]_{feed} : M$	% การสกัด		
	RE	U	Th
1	1.920	74.960	23.145
2	2.694	90.469	26.472
3	3.143	93.597	41.801
4	2.971	91.728	37.780
5	2.355	89.840	32.273

ตาราง ข-7 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายากโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการหมุน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed} = Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[HNO_3]_{feed}$ (M)	% การสกัดธาตุหายาก				
	$[TBP]_{org}$: % v/v				
	1	5	10	20	30
1	0.347	1.110	1.920	3.142	3.339
2	0.958	1.415	2.694	3.700	3.709
3	1.405	2.064	3.143	3.686	3.730
4	1.253	1.831	2.971	3.696	3.771
5	0.990	1.514	2.355	3.320	3.722

ตาราง ข-8 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการหมุน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed} = Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[HNO_3]_{feed}$ (M)	% การสกัดยูเรเนียม				
	$[TBP]_{org}$: % v/v				
	1	5	10	20	30
1	4.604	46.623	74.960	93.106	94.377
2	17.544	72.056	90.469	94.821	95.433
3	27.339	80.905	93.597	95.291	95.562
4	12.870	76.136	91.728	95.230	95.705
5	6.473	71.779	89.840	94.354	95.422

ตาราง ข-9 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=1-30\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=1-5$ M, $Q_{feed} = Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[HNO_3]_{feed}$ (M)	% การสกัดทอเรียม				
	$[TBP]_{org}$: % v/v				
	1	5	10	20	30
1	2.621	14.108	23.145	40.064	42.108
2	10.200	16.640	26.472	49.005	53.950
3	15.831	23.553	41.801	65.729	69.611
4	7.085	19.839	37.780	68.132	72.173
5	4.243	16.775	32.273	62.490	68.358

ตาราง ข-10 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ TBP ในสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียม โดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกในสารละลายป้อน (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=3$ M, $Q_{feed} = Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

$[TBP]_{org}$: % v/v	% การสกัด		
	RE	U	Th
1	1.405	27.339	15.831
5	2.064	80.905	23.553
10	3.143	93.597	41.801
20	3.686	95.291	65.729
30	3.730	95.562	69.611

ตาราง ข-11 แสดงผลการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารละลายอินทรีย์ต่อสารละลายป้อน ที่มีผลต่อการสกัดธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมโดยหอสกัดแบบจานหมุนมีรู (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=200 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=3$ M, $Q_{org}=100$ ml/min, $Q_{feed}=100-500$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

อัตราการไหลของ สารป้อน : ml/min	% การสกัด		
	RE	U	Th
100	3.687	95.292	65.730
200	2.847	87.612	51.252
300	2.310	72.915	36.529
400	1.640	67.990	29.522
500	1.276	60.846	22.923

ตาราง ข-12 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดยูเรเนียมที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=100-250 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=4$ M, $Q_{feed}=Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

ความเร็วรอบ การกวน (rpm)	% การสกัดยูเรเนียม						การ ทดลอง
	Cal-1*	Cal-2*	Cal-3*	Cal-4*	Cal-5*	Cal-6*	
100	23.876	24.881	25.711	24.922	25.642	26.294	89.707
150	22.921	24.096	25.468	27.209	26.493	26.894	93.258
200	25.110	24.489	25.546	36.061	29.898	28.386	95.230
250	30.597	25.927	25.947	50.980	35.942	30.951	93.948

ตาราง ข-13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดทอเร็ียมที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=100-250 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=4$ M, $Q_{feed} = Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

ความเร็วรอบการกวน (rpm)	% การสกัดทอเร็ียม						การทดลอง
	Cal-1*	Cal-2*	Cal-3*	Cal-4*	Cal-5*	Cal-6*	
100	11.311	12.113	12.810	12.046	12.653	13.227	57.009
150	10.502	11.387	12.522	13.535	13.084	13.538	64.222
200	11.855	11.508	12.454	20.033	15.404	14.400	68.132
250	15.363	12.299	12.590	32.338	19.776	16.218	64.904

ตาราง ข-14 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดธาตุหายากที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี (เมื่อ $[Feed]=1,000$ ppm, ความเร็วรอบการกวน=100-250 rpm, $[TBP]_{org}=20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed}=4$ M, $Q_{feed} = Q_{org}=100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

ความเร็วรอบการกวน (rpm)	% การสกัดธาตุหายาก						การทดลอง
	Cal-1*	Cal-2*	Cal-3*	Cal-4*	Cal-5*	Cal-6*	
100	0.00757	0.00802	0.00864	0.01692	0.01494	0.01402	3.597
150	0.00829	0.00765	0.00824	0.03128	0.02056	0.01604	3.621
200	0.01087	0.00799	0.00802	0.05659	0.02911	0.01906	3.696
250	0.01480	0.00870	0.00795	0.09607	0.04093	0.02327	3.634

หมายเหตุ * หมายถึงการคำนวณโดยใช้สมการต่างๆ ดังต่อไปนี้

การคำนวณไฮลด์อัฟ

1. การคำนวณไฮลด์อัฟของ Laddha, Degalleesan และ Kannappan
2. การคำนวณไฮลด์อัฟของ Kumar และ Hartland

การคำนวณขนาดของหยด

1. การคำนวณขนาดของหยดของ Marr, Husung และ Moser
2. การคำนวณขนาดของหยดของ Kumar และ Hartland ในปี 1986
3. การคำนวณขนาดของหยดของ Kumar และ Hartland ในปี 1996

Cal-1 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 1 และขนาดของหยดของในสมการที่ 1

Cal-2 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 1 และขนาดของหยดของในสมการที่ 2

Cal-3 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 1 และขนาดของหยดของในสมการที่ 3

Cal-4 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 2 และขนาดของหยดของในสมการที่ 1

Cal-5 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 2 และขนาดของหยดของในสมการที่ 2

Cal-6 ได้จากการคำนวณไฮลด์อัฟในสมการที่ 2 และขนาดของหยดของในสมการที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

คำนิยาม

ค-1 ประสิทธิภาพในการสกัด (% การสกัด)

$$\% \text{ Extraction } = \frac{[M]_{in} - [M]_{out}}{[M]_{in}} * 100$$

เมื่อ $[M]_{in}$ คือความเข้มข้นโลหะในสารละลายป้อนเข้า $[M]_{out}$ คือความเข้มข้นโลหะในสารละลายป้อนออก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

ง-1 เปอร์เซนต์การสกัดที่ได้จากการทดลอง

ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซนต์การสกัดในภาคผนวก ข: ตาราง ข-2 โดยใช้ข้อมูลจากภาคผนวก ก: ตาราง ก-2 (พิจารณาข้อมูลที่ความเร็วรอบการกวนเท่ากับ 200 rpm เมื่อ [Feed] = 1,000 ppm, [TBP]_{org} = 20% v/v, [HNO₃]_{feed} = 4 M, Q_{feed} = Q_{org} = 100 ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

- ความเข้มข้นของธาตุหายากในสารละลายป้อนขาเข้า	=	831.618	ppm
- ความเข้มข้นของธาตุหายากในสารละลายป้อนขาออก	=	800.880	ppm
- ความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลายป้อนขาเข้า	=	5.514	ppm
- ความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลายป้อนขาออก	=	0.263	ppm
- ความเข้มข้นของทอเรียมในสารละลายป้อนขาเข้า	=	145.841	ppm
- ความเข้มข้นของทอเรียมในสารละลายป้อนขาออก	=	46.476	ppm

$$\begin{aligned}\% \text{ การสกัดธาตุหายาก} &= \left[\frac{831.618 - 800.880}{831.618} \right] * 100 \\ &= 3.696\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{ การสกัดยูเรเนียม} &= \left[\frac{5.514 - 0.263}{5.514} \right] * 100 \\ &= 95.230\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{ การสกัดทอเรียม} &= \left[\frac{145.841 - 46.476}{145.841} \right] * 100 \\ &= 68.132\%\end{aligned}$$

ง-2 เปอร์เซนต์การสกัดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซนต์การสกัดในภาคผนวก ข: ตาราง ข-13 โดยใช้ข้อมูลต่างๆ ในการคำนวณ ดังต่อไปนี้ (พิจารณาข้อมูลที่ความเร็วรอบการกวน 200 rpm เมื่อ $[Feed] = 1,000$ ppm, $[TBP]_{org} = 20\%$ v/v, $[HNO_3]_{feed} = 4$ M, $Q_{feed} = Q_{org} = 100$ ml/min โดยปฏิบัติการแบบไหลสวนทางกัน)

- ความเร่งของแรงโน้มถ่วง, g	=	9.81 m/s^2
- แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค, γ	=	0.0045 N/m
- ความหนาแน่นของวัฏภาคต่อเนื่อง, ρ_c	=	1200 kg/m^3
- ความหนาแน่นของวัฏภาคกระจาย, ρ_d	=	834 kg/m^3
- ความแตกต่างของความหนาแน่น, $\Delta\rho$	=	366 kg/m^3
- ความหนืดของวัฏภาคต่อเนื่อง, μ_c	=	1.14×10^{-3} Pa·s
- ความหนืดของวัฏภาคกระจาย, μ_d	=	1.512×10^{-3} Pa·s
- ความหนืดของน้ำ, μ_w	=	0.911×10^{-3} Pa·s
- ระยะห่างระหว่างจานหมุน, h	=	0.0261 m
- เส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน, d	=	0.073 m
- เส้นผ่านศูนย์กลางของ stator, d_s	=	0.08 m
- เส้นผ่านศูนย์กลางของหอ, D	=	0.08 m
- ความเร็วรอบการกวน, N	=	3.33 r/s
- Superficial velocity ของวัฏภาคต่อเนื่อง, V_c	=	3.316×10^{-4} m/s
- Superficial velocity ของวัฏภาคกระจาย, V_d	=	3.316×10^{-4} m/s
- จำนวนของรูบนจานหมุน, N_o	=	38
- อัตราการไหลของวัฏภาคกระจาย, Q_d	=	1.667×10^{-6} m^3/s
- π	=	3.1416

ข้อมูลเฉพาะของแต่ละสาร

- สัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรเนียมในวัฏภาคต่อเนื่อง, $D_{AB,C,U}$	=	2.710×10^{-9} m^2/s
--	---	--------------------------------

- สัมประสิทธิ์การแพร่ของทอเรียมในวัฏภาคต่อเนื่อง, $D_{AB,C,Th} = 2.058 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$
- สัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุหายากในวัฏภาคต่อเนื่อง, $D_{AB,C,RE} = 1.990 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$
- สัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรเนียมในวัฏภาคกระจาย, $D_{AB,d,U} = 3.620 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$
- สัมประสิทธิ์การแพร่ของทอเรียมในวัฏภาคกระจาย, $D_{AB,d,Th} = 3.620 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$
- สัมประสิทธิ์การแพร่ของธาตุหายากในวัฏภาคกระจาย, $D_{AB,d,RE} = 2.960 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$
- ค่า Partition coefficient ของยูเรเนียม, $m_U = 2.5$
- ค่า Partition coefficient ของทอเรียม, $m_{Th} = 1.1$
- ค่า Partition coefficient ของธาตุหายาก, $m_{RE} = 2.0 \times 10^{-3}$

ในตัวอย่างการคำนวณนี้จะทำการหาประสิทธิภาพในการสกัดของทอเรียมที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

การหาไฮลด์อัฟ

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.31) และ (2.32) ของ Laddha, Degaleesam และ Kannappan หรือ สมการที่ (2.33) ของ Kumar และ Hartland (พิจารณาโดยใช้สมการของ Kumar และ Hartland)

$$Re = Nd^2 \rho_c / \mu_c = 3.33(7.3 \times 10^{-2})^2 (1200) / (1.14 \times 10^{-3}) = 18,679.54$$

$$\epsilon = \frac{4N^3 d^5}{\pi D^2 h} \left[\frac{109.36}{Re} + 0.74 \left[\frac{1000 + 1.2 Re^{0.72}}{1000 + 3.2 Re^{0.72}} \right]^{3.30} \right] \quad (2.34)$$

$$\epsilon = \frac{4(3.33)^3 (0.073)^5}{\pi * (8 * 10^{-2})^2 * 0.0261} \left[\frac{109.36}{18679.54} + 0.74 \left[\frac{1000 + 1.2(18679.54)^{0.72}}{1000 + 3.2(18679.54)^{0.72}} \right]^{3.30} \right]$$

$$= 0.0487 \quad W / kg$$

$$\phi = \left[0.19 + \left[\frac{\epsilon}{g} \left(\frac{\rho_c}{g\gamma} \right)^{0.25} \right]^{0.67} \right] * \left[V_d \left(\frac{\rho_c}{g\gamma} \right)^{0.25} \right]^{0.69} \quad (2.3)$$

$$\exp \left[7.13 V_c \left(\frac{\rho_c}{g\gamma} \right)^{0.25} \right] * \left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)^{-0.65} \left(\frac{\mu_d}{\mu_w} \right)^{0.14} \right] * \left[\left(\frac{d}{h} \right)^{0.62} \left(\frac{d_s^2}{D^2} \right)^{-0.26} \left[h \left(\frac{\rho_c g}{\gamma} \right)^{0.5} \right]^{-0.10} \right]$$

$$\phi = \left[0.19 + \left[\frac{0.0487}{9.81} * \left(\frac{1200}{9.81 * 0.045} \right)^{0.25} \right]^{0.67} \right] * \left[\left[(3.316 * 10^{-4}) \left(\frac{1200}{9.81 * 0.045} \right)^{0.25} \right]^{0.69} \right] *$$

$$\exp \left[7.13 (3.316 * 10^{-4}) \left(\frac{1200}{9.81 * 0.045} \right)^{0.25} \right] * \left[\left(\frac{366}{1200} \right)^{-0.65} \left(\frac{1.512 * 10^{-3}}{0.911 * 10^{-3}} \right)^{0.14} \right] *$$

$$\left[\left(\frac{0.073}{0.0261} \right)^{0.62} \left(\frac{0.08^2}{0.08^2} \right)^{-0.26} \right] \left[\left[0.261 * \left(\frac{1200 * 9.81}{0.045} \right)^{0.5} \right]^{-0.10} \right]$$

$$= 0.0267$$

และจากสมการที่ (2.32) สามารถหาค่า slip velocity ได้ดังนี้

$$V_s = \frac{V_d}{\phi} + \frac{V_c}{1 - \phi} \quad (2.32)$$

$$= \frac{(3.316 * 10^{-4})}{0.0267} + \frac{(3.316 * 10^{-4})}{(1 - 0.0267)}$$

$$= 0.0127 \quad \text{m/s}$$

$$\text{ดังนั้น } V_o = V_s / (1 - \phi)$$

$$= 0.723 \quad \text{m/s}$$

การหาขนาดของหยด

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.38) ของ Marr, Husung และ Moser หรือสมการที่ (2.40) ของ Kumar และ Hartland ในปี ค.ศ. 1986 หรือสมการที่ (2.41) ของ Kumar และ Hartland ในปี ค.ศ. 1986 (พิจารณาโดยใช้สมการของ Kumar และ Hartland ในปี ค.ศ. 1986)

$$d_{32} / d = 0.17(Nd^2\rho_c / \mu_c)^{-1.12}(\mu_c / \sqrt{\gamma\rho_c d})^{-1.38} * (\Delta\rho / \rho_c)^{-0.24} (d^2\rho_c g / \gamma)^{-0.05} (h / d)^{0.42} \quad (2.40)$$

$$\frac{d_{32}}{0.073} = 0.17 \left(\frac{3.33 * 0.073^2 * 1200}{1.14 \times 10^{-3}} \right)^{-1.12} * \left(\frac{1.14 * 10^{-3}}{(0.045 * 1200 * 0.073)^{0.5}} \right)^{-1.38} * \left(\frac{366}{1200} \right)^{-0.24} \left(\frac{0.073^2 * 1200 * 9.81}{0.045} \right)^{-0.05} \left(\frac{0.0261}{0.073} \right)^{0.42}$$

$$d_{32} = 0.00364 \quad \text{m}$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

(1) เนื่องจากการเกิดของหยด

$$t_f = \left(\frac{\pi d_p^3}{6} \right) \left(\frac{N_o}{Q_d} \right)$$

$$= \left(\frac{\pi * 0.00364^3}{6} \right) \left(\frac{38}{1.667 * 10^{-6}} \right)$$

$$= 0.576 \text{ s}$$

$$k_{d,f} = 0.0432 \frac{d_p}{t_f} \left(\frac{V_0^2}{d_p g} \right)^{0.089} \left(\frac{d_p^2}{t_f D_{AB,d}} \right)^{-0.334} \left(\frac{\mu_d}{(\rho_d d_p \gamma)^{1/2}} \right)^{-0.601} \quad (2.17)$$

$$k_{d,f} = 0.0432 \left(\frac{0.00364}{0.576} \right) \left(\frac{0.0723^2}{0.00364 * 9.81} \right)^{0.089} \left(\frac{0.00364}{0.576 * 3.62 * 10^{-10}} \right)^{-0.334} * \left(\frac{1.512 * 10^{-2}}{(834 * 0.00364 * 0.045)^{0.5}} \right)^{-0.601}$$

$$= 1.361 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$k_{c,f} = 0.386 \left(\frac{D_{AB,c}}{t_f} \right)^{0.5} \left(\frac{\rho_c \gamma}{\Delta \rho g t_f \mu_c} \right)^{0.407} \left(\frac{g t_f^2}{d_p} \right)^{0.148} \quad (2.18)$$

$$k_{c,f} = 0.386 \left(\frac{2.058 * 10^{-9}}{0.579} \right)^{0.5} \left(\frac{1200 * 0.045}{366 * 9.81 * 0.576 * 1.14 * 10^{-3}} \right)^{0.407} * \left(\frac{9.81 * 0.576^2}{0.00364} \right)^{0.148}$$

$$= 2.255 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$\frac{1}{k_{oc,f}} = \frac{1}{k_{c,f}} + \frac{1}{m k_{d,f}} = \frac{1}{2.255 * 10^{-4}} + \frac{1}{1.1(1.361 * 10^{-4})}$$

$$k_{oc,f} = 9 * 10^{-5} \text{ m/s}$$

(2) เนื่องจากการลอยตัวของหยด

จากการพิจารณาพบว่าพฤติกรรมของหยดเป็นแบบ oscillation ตามเกณฑ์ของ Klee และ Treybal ดังนี้

$$d_p > \frac{0.33 \mu_c^{0.3} \gamma^{0.24}}{\rho_c^{0.14} \Delta \rho^{0.43}}$$

$$d_p > 0.0006$$

และสามารถหาค่าความเร็วปลาย (Terminal velocity) ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned}
 V_T &= \left[\frac{4g\Delta\rho\gamma}{\rho_c^2} \right] \\
 &= \left[\frac{4 * 9.81 * 366 * 0.045}{1200^2} \right]^{1/4} \\
 &= 0.1455 \text{ m/s} \\
 k_{d,r} &= \frac{0.00375 V_t}{(1 + \mu_d / \mu_c)} \quad (2.19) \\
 &= \frac{0.00375 * 0.14555}{\left(1 + \frac{1.512 * 10^{-3}}{1.14 * 10^{-3}} \right)} \\
 &= 2.346 * 10^{-4} \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

และในวิภภาคต่อเนื่องใช้สมการที่ (2.25) ซึ่งเป็นระบบที่มีการวน

$$\frac{k_{c,r} d_p}{D_{AB,c}} = 1.237 (10^{-5}) \left(\frac{\mu_c}{\rho_c D_{AB,c}} \right)^{1/3} \left(\frac{d^2 N \rho_c}{\mu_c} \right)^{2/3} \left(\frac{d N^2}{g} \right)^{5/12} \left(\frac{d}{d_p} \right)^2 \left(\frac{d_p}{D} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_d d_p^2 g}{\gamma} \right)^{5/4} \phi^{-1/2} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{k_{c,r} * 0.00364}{2.058 * 10^{-9}} &= \left(1.237 * 10^{-5} \right) \left(\frac{1.14 * 10^3}{1200 * 2.058 * 10^{-9}} \right)^{1/3} \left(\frac{0.073^2 * 0.33 * 1200}{1.14 * 10^{-3}} \right)^{2/3} \left(\frac{0.073 * 0.33^2}{9.81} \right)^{5/12} \\
 &\quad \left(\frac{0.073}{0.00364} \right)^2 \left(\frac{0.0364}{0.008} \right)^{1/2} \left(\frac{834 * 0.00364^2 * 9.81}{0.045} \right)^{5/4} * 0.0267
 \end{aligned}$$

$$k_{c,r} = 2.119 * 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$\frac{1}{k_{oc,r}} = \frac{1}{k_{c,r}} + \frac{1}{mk_{d,r}}$$

$$\begin{aligned}
 k_{oc,r} &= \frac{1}{2.119 * 10^{-5}} + \frac{1}{1.1(2.346 * 10^{-4})} \\
 &= 1.96 * 10^{-5} \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

การหาค่าประสิทธิภาพของเมอร์ฟรี

- 1) จำนวนหน่วยถ่ายเทเนื่องจากการเกิดของหยด

$$\begin{aligned}
 NTU_{oc,f} &= \frac{6k_{oc,f}t_f}{d_p} & (2.45) \\
 &= \frac{6 * (9 * 10^{-5}) * 0.576}{0.00364} \\
 &= 8.55 * 10^{-2}
 \end{aligned}$$

- 2) จำนวนหน่วยถ่ายเทเนื่องจากการลอยตัวของหยด

$$\begin{aligned}
 NTU_{oc,r} &= \frac{6k_{oc,r}h}{V_s d_p} & (2.46) \\
 &= \frac{6 * 1.96 * 10^{-5} * 0.0261}{0.0127 * 0.00364} \\
 &= 6.6028 * 10^{-5}
 \end{aligned}$$

- 3) จำนวนหน่วยถ่ายเทเนื่องจากการรวมตัวของหยด

$$\begin{aligned}
 NTU_{oc,co} &= 0.1NTU_{co,f} & (2.47) \\
 &= 0.1 * 8.55 * 10^{-2} \\
 &= 0.00855
 \end{aligned}$$

สามารถนำจำนวนหน่วยถ่ายเทมาคำนวณหาประสิทธิภาพเมอร์ฟรีได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_{Mc,f} &= 1 - \exp(-NTU_{oc,f}) \\ &= 1 - \exp(-8.55 * 10^{-2}) \\ &= 0.0812 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{Mc,r} &= 1 - \exp(-NTU_{oc,r}) \\ &= 1 - \exp(-6.6028 * 10^{-5}) \\ &= 0.0639 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{Mc,co} &= 1 - \exp(-NTU_{oc,rc}) \\ &= 1 - \exp(-8.55 * 10^{-3}) \\ &= 0.00851 \end{aligned}$$

$$E_M = 1 - (1 - E_{Md,f})(1 - E_{Md,r})(1 - E_{Md,co}) \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} &= 1 - (1 - 0.0812)(1 - 0.0639)(1 - 0.00851) \\ &= 0.148 \end{aligned}$$

การหาเปอร์เซ็นต์การสกัด

เมื่อสมมุติให้เส้นสมดุลเป็นเส้นตรงและค่าแฟกเตอร์การสกัดมีค่าเป็นค่าคงที่

$$\begin{aligned}
 E_o &= \frac{\ln[1 + E_M(E_f - 1)]}{\ln E_f} \\
 &= \frac{\ln[1 + 0.148(1.1 - 1)]}{\ln 1.1} \\
 &= 0.154 \\
 &= 15.4\%
 \end{aligned}$$

จากนิยามของค่าเมอร์ฟรี (ปิยะสาร ประเสริฐธรรม, 2536)

$$E_L = \frac{X_{a,n-1} - X_{an}}{X_{a,n-1} - X_{an}^*}$$

สามารถคิดค่าเมอร์ฟรีรวมให้เป็นค่าเมอร์ฟรีชั้นตอนเดียวได้ ซึ่งจะมีสมการดังนี้

$$E_o = \frac{X_{a\infty} - X_{fi}}{X_{a\infty} - my_{a\infty}}$$

โดยที่ $y_{เข้า} = 0$

$$\therefore E_o = \frac{X_{a\infty} - X_{fi}}{X_{a\infty}}$$

= ประสิทธิภาพการสกัด

\therefore เปอร์เซ็นต์การสกัดทอเร็มที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี = 15.4 %

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบัญชา คำสิงห์ เกิดวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย