

การแยกไอออนผสมของแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

นางสาวเดือนเพ็ญ บัวช่วง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

SEPARATION OF MIXTURE BETWEEN TANTALUM AND NIOBIUM IONS VIA  
HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

Miss. Duenphen Buachuang

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกไอออนผสมของแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง
โดย	นางสาวเดือนเพ็ญ บัวช่วง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกร รามกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกร รามกุล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ พัฒนะศรี)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

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

เดือนเพ็ญ บัวช่วง: การแยกไอออนผสมของแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. (SEPARATION OF MIXTURE BETWEEN TANTALUM AND NIOBIUM IONS VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.อุรา ปานเจริญ, อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.ประกร รามกุล, 100 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมจากสารละลายป้อนสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นแบบไหลสวนทางกันและมีอัตราการไหลเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ชนิดของสารสกัดที่ศึกษา คือ TBP และ Aliquat 336 ปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อน จากผลการทดลองพบว่าสามารถเลือกสกัดไอออนแทนทาลัมจากไอออนไนโอเบียมได้ โดยใช้ Aliquat 336 ความเข้มข้น 3% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.3 โมลต่อลิตร ร้อยละการสกัดไอออนแทนทาลัมสูงสุด คือ 78 สำหรับการนำกลับไอออนแทนทาลัมใช้สารละลายโซเดียมเปอร์คลอเรต ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ร้อยละการนำกลับไอออนแทนทาลัมเท่ากับ 67 การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนในช่วง 10-90 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน ( $k_p$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) เท่ากับ  $1.19 \times 10^{-5}$  และ  $1.44 \times 10^{-7}$  เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าขั้นตอนควบคุมอัตราการถ่ายเทมวลคือการแพร่ซึมของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมและ Aliquat 336 ผ่านชั้นของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว นอกจากนี้สามารถใช้แบบจำลองการถ่ายเทมวลคำนวณความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลาต่างๆ เพื่อหาเวลาในการสกัดไอออนแทนทาลัมได้ พบว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับผลการทดลองเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ต่ำกว่า 4% โดยปริมาตร

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554 ..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

## 5270302621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HOLLOW FIBER / LIQUID MEMBRANE / TANTALUM / NIOBIUM / SEPARATION

DUENPHEN BUACHUANG: SEPARATION OF MIXTURE BETWEEN TANTALUM AND NIOBIUM IONS VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D. Eng., Sc. D., CO-ADVISOR: ASSIST. PROF. PRAKORN RAMAKUL, D. Eng., 100 pp.

This research studied the separation of mixture of tantalum and niobium ions from synthetic feed via hollow fiber supported liquid membrane. The feed and stripping solutions were fed counter-currently at equal flow rate of 100 ml/min. The extractants or carrier were TBP and Aliquat 336. Other parameters were studied: concentration of hydrofluoric in feed solution, concentration of the carrier in the membrane phase, types of stripping solutions and their concentration, and initial concentration of tantalum and niobium ions in feed solution. From the experimental results, tantalum ions of about 78% could be selectively extracted by 3% (v/v) Aliquat 336 with 0.3 M hydrofluoric in feed solution. The highest percentage of stripping of tantalum ions about 67% could be retrieved by 0.2 M NaClO<sub>4</sub>. The increasing of tantalum and niobium ions concentration in the feed solution in the range of 10-90 ppm showed no effect on the percentages of extraction and stripping. The mass transfer coefficient of tantalum ions in the aqueous feed ( $k_f$ ) and that of complex ions in the organic membrane phase ( $k_m$ ) were estimated as  $1.19 \times 10^{-5}$  and  $1.44 \times 10^{-7}$  cm/s, respectively. It is indicated that the mass transfer controlling step is the diffusion of the complex ions of tantalum and Aliquat 336 across the liquid membrane. Furthermore, in this paper a mass-transfer modeling was used to calculate the concentration of tantalum ions with time to estimate the separation time. The model was validated as the theoretical values from the model were found to be in good agreement with the experimental data, particularly at the concentration of Aliquat 336 in the membrane phase less than 4% (v/v).

Department : Chemical Engineering ..... Student's Signature .....

Field of Study : Chemical Engineering ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011 ..... Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภกร รามกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำสอน คำแนะนำ และโอกาส รวมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของการทำวิจัยทำให้ผู้วิจัยได้เรียนรู้และมีกำลังใจในการทำวิจัยจนกระทั่งประสบผลสำเร็จ และยังกรุณาหาเงินทุนวิจัยสนับสนุนข้าพเจ้าผู้ศึกษาซึ่งในพระคุณของอาจารย์ทั้งสอง จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ พัฒนะศรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี-จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ทุนสนับสนุนการทำวิจัยและเครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณ เพื่อนและพี่ในกลุ่มวิจัย Mass Separation ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และท่านที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน สนับสนุนการศึกษา ให้กำลังใจและส่งเสริมให้ปฏิบัติตนเป็นคนดีของสังคมตลอดมาจนผู้วิจัยประสบผลสำเร็จในวันนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 สมบัติและความสำคัญของแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	3
1.2.1 แทนทาลัม (Ta).....	3
1.2.2 ไนโอเบียม (Nb).....	4
1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	6
1.4 กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	7
1.4.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (emulsion liquid membrane process).....	8
1.4.2 เยื่อแผ่นเหลวเทียมแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic pseudo liquid membrane, ELPLIM).....	9
1.4.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane).....	10
ก. เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (flat-sheet supported liquid membrane).....	10
ข. เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (spiral-wound support liquid membrane).....	11
ค. เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (hollow-fiber support liquid membrane: HFSLM).....	12

1.5 รูปแบบการปฏิบัติการ (operation mode) ผ่านระบบ	
เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	14
1.6 ชนิดของสารสกัด.....	19
1.6.1 สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant).....	19
1.6.2 สารสกัดชนิดเบส (basic extractant).....	20
1.6.3 สารสกัดชนิดขอลเวท (solvating extractant) หรือสารสกัดชนิดที่เป็น กลาง (neutral extractant).....	20
1.7 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	21
1.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	21
1.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนโลหะ.....	24
1.8 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	29
1.9 ขอบเขตของงานวิจัย.....	29
1.10 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ.....	30
1.11 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	30
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	32
2.1 กลไกการถ่ายเทมวล.....	32
2.1.1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ (solution diffusion) .....	32
2.1.2 การถ่ายเทมวลแบบอาศัยตัวพา (facilitated หรือ carrier mediated transport).....	33
2.1.2.1 การถ่ายเทมวลแบบง่าย (simple facilitated transport).....	33
2.1.2.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (coupled facilitated transport).....	34
ก. การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบสวนทาง (counter transport).....	35
ข. การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบไปทางเดียวกัน (co transport ).....	36
2.2 ทฤษฎีการคำนวณค่าคงที่การถ่ายเทมวลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	37
2.2.1 การคำนวณร้อยละการสกัด (percentage of extraction, % E) และ ร้อยละการนำกลับ (percentage of stripping, % S).....	37
2.2.2 การคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัด (extraction equilibrium constant, $K_{ex}$ ) ไอออนแทนทาลัม.....	38



2.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient, D).....	38
2.2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient, P).....	39
2.2.5 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient, D <sup>*</sup> ).....	40
2.2.6 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient).....	40
2.3 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและการคำนวณค่าความเข้มข้นของ ไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลาใดๆ.....	43
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	48
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.3 วิธีการทดลอง.....	50
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายป้อน.....	50
3.3.2 ศึกษาชนิดสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายโครซินที่เหมาะสมด้วย วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	50
3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริกใน สารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและ ไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	52
3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อประสิทธิภาพการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย กลาง.....	52
3.3.5 ศึกษาผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพ การสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลาง.....	53

3.3.6	ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	53
3.3.7	ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	54
3.4	ขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลาง.....	54
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	55
4.1	ผลการทดลอง.....	55
4.1.1	ผลของชนิดของสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	55
4.1.2	ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	56
4.1.3	ผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	58
4.1.4	ผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	60
4.1.5	ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	62
4.1.6	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	63
4.2	การประยุกต์แบบจำลองการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางกับผลการทดลอง.....	65

4.2.1 การคำนวณค่าคงที่สมดุลและค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัม.....	65
4.2.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน จากการผลการทดลองกับการคำนวณจากแบบจำลองการถ่ายเทมวล.....	66
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	70
สรุปผลการทดลอง.....	70
ข้อเสนอแนะ.....	72
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	80
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ.....	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	100

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของแทนทาลัมและไนโอเบียมในสินแร่ต่างๆ.....	3
ตารางที่ 1.2 สมบัติทางกายภาพของแทนทาลัม.....	3
ตารางที่ 1.3 สมบัติทางกายภาพของไนโอเบียม.....	5
ตารางที่ 1.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวประเภทต่างๆ.....	14
ตารางที่ 1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	28
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	48
ตารางที่ 3.2 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลางพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง.....	50
ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัมที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลาง 0.25-4% โดยปริมาตร.....	66
ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมจากการเปรียบเทียบชนิดของสารสกัดด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับ.....	93
ตารางที่ ข-2 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อน.....	94
ตารางที่ ข-3 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว.....	95
ตารางที่ ข-4 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางจากการศึกษาผลของชนิดของสารละลายนำกลับ.....	96
ตารางที่ ข-5 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมเปอร์คลอเรต.....	97

ตารางที่ ข-6 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจากการศึกษาผลของความเข้มข้น เริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อน.....	98
ตารางที่ ข-7 ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออกจากการทดลอง และการคำนวณด้วยแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 และเวลาการสกัดต่างๆ.....	99

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1	เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน..... 8
ภาพที่ 1.2	เยื่อแผ่นเหลวเทียมแบบไฟฟ้าสถิต..... 9
ภาพที่ 1.3	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแผ่นบาง..... 11
ภาพที่ 1.4	กลไกการสกัดของกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ ชนิดแผ่นบาง..... 11
ภาพที่ 1.5	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน..... 12
ภาพที่ 1.6	มอดูลของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง..... 12
ภาพที่ 1.7	ลักษณะการไหลแบบสวนทางของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลาย นำกลับในเส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. 13
ภาพที่ 1.8	ปฏิบัติการแบบกะแบบไหลสวนทาง..... 15
ภาพที่ 1.9	ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องแบบไหลสวนทาง..... 15
ภาพที่ 1.10	ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ต่อเนื่อง และเป็นการไหลแบบสวนทาง..... 17
ภาพที่ 1.11	ปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องแบบไหลสวนทาง..... 18
ภาพที่ 2.1	ทิศทางการถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยกในการถ่ายเทมวลโดยการแพร่..... 32
ภาพที่ 2.2	ทิศทางการถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยกของการถ่ายเทมวลแบบง่าย..... 34
ภาพที่ 2.3	ทิศทางการถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเนียมของการ ถ่ายเทมวลแบบควบคุมแบบสวนทาง..... 35
ภาพที่ 2.4	ทิศทางการถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเนียมของการ ถ่ายเทมวลแบบควบคุมแบบทางเดียวกัน ..... 36
ภาพที่ 2.5	การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว..... 41
ภาพที่ 3.1	โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดที่ใช้ในการทดลอง..... 49
ภาพที่ 3.2	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)..... 49
ภาพที่ 3.3	การปฏิบัติการแบบกะแบบไหลสวนทาง..... 51
ภาพที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารสกัดกับร้อยละของการสกัดไอออน แทนทาลัมแลน ใน โอเบียม..... 56

ภาพที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลาย ป้อนกับร้อยละของการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	57
ภาพที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลาย ป้อนกับร้อยละของการนำกลับ ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	57
ภาพที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลาย เชื่อมแผ่นเหลวกับร้อยละของการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	59
ภาพที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลาย เชื่อมแผ่นเหลวกับร้อยละของการนำกลับ ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม....	60
ภาพที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารละลายนำกลับกับร้อยละของการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	61
ภาพที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารละลายนำกลับกับร้อยละของการนำกลับ ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	61
ภาพที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมเปอร์คลอ เรตกับร้อยละของการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	62
ภาพที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมเปอร์คลอ เรตกับร้อยละของการนำกลับ ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม.....	63
ภาพที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมใน สารละลายป้อนกับร้อยละของการสกัดของ ไอออนแทนทาลัมและ ไนโอเบียม.....	64
ภาพที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมใน สารละลายป้อนกับร้อยละของการนำกลับของ ไอออนแทนทาลัมและ ไนโอเบียม.....	64
ภาพที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[(R_4N)_2TaF_7][Cl]^{-2}$ กับ $[TaF_7^{2-}][R_4N^+Cl]^{-2}$ ที่ความ เข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเชื่อมแผ่นเหลวในมอดูลของ เส้นใยกลวงช่วง 0.25-4% โดยปริมาตร.....	65
ภาพที่ 4.13	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออกที่เวลาต่างๆ จากการทดลองและการคำนวณจากแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้น ของสารสกัด Aliquat 336 ต่างๆ.....	69

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

#### สัญลักษณ์

$A$	พื้นที่การถ่ายเทมวล
$C_f$	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลา ( $t$ )
$C_{f,o}$	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลาเริ่มต้น
$C_{f,in}$	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลาเริ่มต้น
$C_{f,out}$	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออก
$C_{s,out}$	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายนำกลับขาออก
$D^*$	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)
$D$	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient)
$D_{aq}^*$	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายป้อน
$D_m$	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
$d_i$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง
$\% E$	ร้อยละการสกัด
$Gz$	Graetz number
$J_i$	อัตราการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน
$J_m$	อัตราการถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
$J_s$	อัตราการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายนำกลับ
$K_{ex}$	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัด (equilibrium constant)
$k$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient)
$k_i$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยก (แทนทาลัม) ในสารละลายป้อน
$k_m$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของไอออนที่ต้องการแยก (แทนทาลัม) ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว



$k_s$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยก (แทนทาลัม) ในสารละลายนำกลับ
$R$	ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวล
$R_i$	ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน
$R_m$	ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว
$L$	ความยาวของเส้นใยกลวง
$l$	ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว
$M$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ
$M_f$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน
$M_{f,i}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
$M_{s,i}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว
$M_s$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ
$N$	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล
$P$	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient)
$Q_f$	อัตราการไหลของสารละลายป้อน
$r_i$	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง
$r_o$	รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง
$r_{1,m}$	รัศมี log - mean ของเส้นใยกลวง
$\%S$	ร้อยละการนำกลับ
$Sh$	Sherwood number
$[R_4N^+Cl^-]$	ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336
$S$	สารสกัดชนิดซอลเวท

$T$	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
$t$	เวลา
$V$	ปริมาตรของมอดูลชุดทดลองเส้นใยกลวง
$v$	ความเร็วของสารละลายป้อนภายในท่อ
$V_A$	ปริมาตรเชิงโมลาร์ของตัวถูกละลาย
$V_f$	ปริมาตรของสารละลายป้อน

### อักษรกรีก

$\varepsilon$	ความพรุนของเส้นใยกลวง
$\tau$	ค่า tortuosity ของมอดูล
$\pi$	ค่าคงที่ในสมการของ Stokes และ Einstein มีค่า 3.1416
$\eta$	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

### ตัวห้อย

$aq$	สารละลายน้ำ
$f$	สารละลายป้อน
$s$	สารละลายน้ำกลับ
$m$	สารละลายเยื่อแผ่นเหลว
$f,i$	ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่น
$s,i$	ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายน้ำกลับ
$org,f$	ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อนที่อยู่ภายในเยื่อแผ่นเหลว

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบันได้พัฒนาไปอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วเพื่อสนองตอบความต้องการของมนุษย์ จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีสมบัติพิเศษสำหรับผลิตอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ รถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ฯลฯ การนำโลหะต่างๆ ที่อยู่บนเปลือกโลก เช่น เหล็ก ทองแดง ดีบุก อลูมิเนียม มาทำวัสดุ เพื่อสร้างอุปกรณ์ หรือเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ ทำให้โลหะซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำกัด ยังมีจำนวนลดน้อยลง การวิจัยและพัฒนาโลหะวัสดุที่มีสมบัติพิเศษตลอดจนกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ จึงได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและการนำกลับมาใช้ซ้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดเป็นประเด็นที่สำคัญ

แทนทาลัมและไนโอเบียมเป็นธาตุที่ไม่รู้จักกันกว้างขวางนักเมื่อเทียบกับ เหล็ก ทองแดง เงิน ดีบุก แต่มีความต้องการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้ประโยชน์ทางเทคโนโลยีขั้นสูง เป็นธาตุโลหะทรานซิชันหมู่ VB ในตารางธาตุ มีสมบัติทางเคมีที่คล้ายกัน ส่วนใหญ่เกิดอยู่ร่วมกันในธรรมชาติในรูปของออกไซด์ พบรวมกันในสินแร่แทนทาลิต์ (tantalite:  $(\text{Fe, Mn})(\text{Ta, Nb})_2\text{O}_6$ ) โคลัมไบต์ (columbite:  $(\text{Fe, Mn})(\text{Cb, Ta})_2\text{O}_6$ ) ทาพิโอไลต์ (tapiolite:  $\text{FeTa}_2\text{O}_6$ ) และไพโรคลอไรต์ (pyrochlore:  $(\text{Na, Ca})(\text{Ta, Nb})_2\text{O}_6(\text{OH, F})$ ) แต่จะพบมากในแทนทาลิต์ และโคลัมไบต์ [1-5] และในตะกอนจากการถลุงแร่ดีบุก เนื่องจากทั้งแทนทาลัมและไนโอเบียมมีสมบัติที่ดีจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ กล่าวคือ แทนทาลัมมักใช้ในอุตสาหกรรมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ทำคาปาซิเตอร์ และเนื่องจากแทนทาลัมมีจุดหลอมเหลวสูง (ประมาณ 3,000 องศาเซลเซียส) และทนการกัดกร่อนได้ดี จึงถูกนำมาใช้ทำโลหะผสมที่ทนความร้อนสูง ใช้ทำโลหะผสมชนิดพิเศษที่ใช้ในเครื่องยนต์ไอพ่น เครื่องยนต์จรวด ใช้ทำตัวยานอวกาศจรวด และยานพาหนะที่ต้องการให้มีความคงทนต่อความร้อนที่เกิดจากการเสียดสี เช่น เครื่องบิน รถไฟความเร็วสูง ใช้ทำขดลวดความร้อน นอกจากนี้ยังใช้ทำอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น เครื่องควบแน่น วาล์ว เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และปั๊มชนิดพิเศษ เป็นต้น สำหรับไนโอเบียม มีสมบัติในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี มีจุดหลอมเหลวสูง (ประมาณ 2,470 องศาเซลเซียส) และทนการกัดกร่อน ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ทำโลหะผสมพิเศษที่ไม่เป็นสนิม ทนการกัดกร่อนของสารเคมี ใช้ผสมในเหล็กกล้า ใช้ทำอุปกรณ์นิวเคลียร์ และส่วนประกอบของเครื่องบิน เป็นต้น [6-7]

จากความต้องการที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสกัดธาตุทั้งสองให้บริสุทธิ์เพื่อนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง กระบวนการที่นิยมใช้แยกธาตุทั้งสองออกจากกัน คือ การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction หรือ liquid-liquid extraction) เช่น

การสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมจากสารละลายผสมในตัวกลางกรดไฮโดรคลอริกโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ใช้ tribenzylamine (TBA) เป็นสารสกัด พบว่าสามารถสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมได้โดยใช้ TBA เข้มข้น 8% โดยปริมาตร ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 11 โมลต่อลิตร [8]

การสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมจากสารละลายผสมในตัวกลางกรดซัลฟิวริกและไฮโดรฟลูออริกโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ใช้ Alamine 336 เป็นสารสกัด พบว่าสามารถสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมได้ และทำการนำกลับโดยการเติมสารละลายแอมโมเนียมคาร์บอเนต  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  เพื่อให้ไอออนแทนทาลัมตกตะกอน [9]

การสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมจากสารละลายผสมในตัวกลางกรดซัลฟิวริกและไฮโดรฟลูออริกโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ใช้ octanol เป็นสารสกัด และกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายนำกลับ ได้ร้อยละการสกัดของไอออนแทนทาลัม 84.3 และร้อยละการสกัดของไอออนไนโอเบียมเท่ากับ 7.4 [10]

การสกัดด้วยตัวทำละลายมีข้อเสียหลายประการ เช่น ใช้สารสกัดปริมาณมาก และในกรณีที่ต้องการความบริสุทธิ์ของโลหะสูงจะต้องใช้ขั้นตอนการสกัดหลายรอบ จึงมีต้นทุนสูงถ้าสารสกัดมีราคาแพง [11] ดังนั้นการศึกษาเพื่อหาเทคนิคใหม่ที่ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดไอออนสูงจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมจากสารละลายป้อนสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane: HFSLM) เพราะสามารถสกัดไอออนที่มีความเข้มข้นต่ำๆ (ระดับมิลลิกรัมต่อลิตร หรือ ไมโครกรัมต่อลิตร) สามารถสกัดแบบคัดเลือกโดยใช้สารสกัดและสารละลายนำกลับที่เหมาะสม เป็นกระบวนการที่ง่าย ใช้สารสกัดปริมาณน้อย มีอัตราการถ่ายเทมวลสูง ค่าการลงทุนและการปฏิบัติงานต่ำ สามารถสกัดและนำกลับได้ภายในขั้นตอนเดียว สะดวกต่อการขยายขนาดโดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง [12-14]

## 1.2 สมบัติและความสำคัญของแทนทาลัมและไนโอเบียม

เนื่องจากทั้งแทนทาลัมและไนโอเบียมมีสมบัติทางเคมีที่คล้ายกันมาก แทนทาลัมและไนโอเบียมเป็นธาตุหมู่ VB มักพบเกิดอยู่รวมกันในธรรมชาติ เป็นองค์ประกอบของแร่ชนิดต่างๆ ซึ่งอยู่ในรูปของออกไซด์ โดยส่วนมากจะพบเป็นปริมาณมากในแร่โคลัมไบต์และแทนทาลิต์ นอกจากนี้ยังพบในแร่ชนิดอื่นๆ อีกซึ่งแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของแทนทาลัมและไนโอเบียมในสินแร่ชนิดต่างๆ [15-16]

ชื่อแร่		Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)
tantalite	(Fe, Mn)(Ta, Nb) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	53-84	2-27
columbite	(Fe, Mn)(Cb, Ta) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	trace-34	47-78
tapiolite	FeTaO <sub>6</sub>	74-83	1-11
pyrochlore	(Na, Ca)(Ta, Nb) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH, F)	0.2-22	26-73
microlite	(Na, Ca) <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (O, OH,F)	33-37	3-30
euxenite	(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> O	1-5	22-29

### 1.2.1 แทนทาลัม (Ta)

แทนทาลัมเป็นธาตุโลหะทรานซิชันในคาบที่ 3 ของหมู่ VB ในตารางธาตุ เป็นโลหะสีเทา หรือเงิน แข็งและเหนียวใกล้เคียงกับเหล็กกล้า มีจุดหลอมเหลวสูง ทนไฟ และทนการกัดกร่อนได้ดี สมบัติทางกายภาพบางประการของแทนทาลัมดังตารางที่ 1.2 ไม่พบแทนทาลัมเกิดเป็นธาตุอิสระในธรรมชาติ แต่จะเกิดปนกับไนโอเบียม (Nb) ไททานเนียม (Ti) และดีบุก (Sn) มักพบมากในแร่แทนทาลิต์ซึ่งจะมีแทนทาลัมออกไซด์ (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) อยู่ประมาณ 53-84%

ตารางที่ 1.2 สมบัติทางกายภาพของแทนทาลัม [15]

เลขอะตอม	73
น้ำหนักอะตอม	180.95
จุดหลอมเหลว	2,980 ± 50 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	5,429 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	16.60 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
เลขออกซิเดชัน	+1,+2, +3, +4 และ +5

### ก. การค้นพบ [17]

แทนทาลัมถูกพบในปี ค.ศ.1802 โดย Anders Gustaf Ekeberg นักเคมีชาวสวีเดน หลังจากการศึกษาตัวอย่างแร่ที่ได้จากสวีเดนและฟินแลนด์

### ข. การใช้ประโยชน์

แทนทาลัมเป็นโลหะที่มีราคาค่อนข้างสูง ในปัจจุบันใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า 60% การใช้งานจึงเลือกใช้ในกรณีทำงานนั้นๆ ต้องการสมบัติเด่นของโลหะนี้ ได้แก่ จุดหลอมเหลวที่สูง แข็งแรงและเหนียว ความดันไอต่ำ เลือยต่อปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส และเป็นฉนวนไฟฟ้า ทนการกัดกร่อนของกรดชนิดต่างๆ เป็นต้น

- มีสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวต่ำ จึงใช้ทำอุปกรณ์ดาวเทียมและยานอวกาศ
- ใช้ทำชิ้นส่วนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ผลิตคาปาซิเตอร์
- ใช้ทำโลหะผสมในการผลิตเครื่องบิน จรวด จีปนาวุธ
- ใช้ทำอุปกรณ์ที่ทนการกัดกร่อนในอุตสาหกรรมเคมี เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ปัมป์ วาล์ว เครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น

### ค. ความเป็นพิษ

ไม่พบความเป็นพิษ แต่ถ้าอยู่ในรูปผงละเอียด อาจติดไฟได้ ระดับความทนไฟได้ของผงแทนทาลัมในอากาศ คือ 5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของอากาศ

### 1.2.2 ไนโอเบียม (Nb)

ไนโอเบียมอยู่ในตำแหน่งของโลหะทรานซิชัน ในคาบที่ 2 ของหมู่ VB ในตารางธาตุ สีเทา มีสมบัตินำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี สมบัติทางกายภาพบางประการของไนโอเบียมดังตารางที่ 1.3 มักพบมากในแร่โคลัมไบต์ซึ่งมีจะไนโอเบียมออกไซด์ ( $Nb_2O_5$ ) อยู่ประมาณ 47-78%

ตารางที่ 1.3 สมบัติทางกายภาพของไนโอเบียม [15]

เลขอะตอม	41
น้ำหนักอะตอม	92.91
จุดหลอมเหลว	2,468 ± 10 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	4,742 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	8.57 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
เลขออกซิเดชัน	+1,+2, +3, +4 และ +5

#### ก. การค้นพบ [17]

ปี ค.ศ.1801 Charles Hatchett นักเคมีชาวอังกฤษ ได้พบธาตุใหม่ และตั้งชื่อธาตุนี้ว่า โคลัมเบียม (สมัยนั้นในอเมริกานิยมเรียกว่า โคลัมเบีย)

ปี ค.ศ.1844 Rose นักเคมีอีกท่านหนึ่งก็พบธาตุใหม่เช่นกัน และตั้งใหม่ชื่อว่า niobium ในสมัยนั้นจึงเกิดความสับสนระหว่าง โคลัมเบียม ไนโอเบียม และ แทนทาลัม โดยต่อมาพบว่า โคลัมเบียม และ ไนโอเบียม เป็นธาตุชนิดเดียวกัน ซึ่งเป็นธาตุคนละชนิดกับแทนทาลัม

ในปี ค.ศ.1949 จากที่ประชุม International Union of Chemistry Congress ณ กรุงAmsterdam ได้ตกลงเรียกชื่อธาตุนี้ว่าไนโอเบียมซึ่งเป็นชื่อยอมรับกันในระดับสากลในปัจจุบัน แต่สำหรับชื่อโคลัมเบียมก็ยังคงยังมีใช้กันอยู่ในหมู่ของนักโลหะวิทยา และมักปรากฏในสิ่งตีพิมพ์สมัยก่อน

#### ข. การใช้ประโยชน์

การใช้ประโยชน์ไนโอเบียมในเชิงพาณิชย์ ได้แก่

- ใช้ทำโลหะเจือกับเหล็กกล้าได้เหล็กกล้าประเภทโคลัมเบียม เหล็กกล้าชนิดอื่นๆ และ super alloy ที่มีสมบัติทนต่ออุณหภูมิสูงมากๆ ได้
- ใช้ประโยชน์เป็นตัว “getter” ใช้ไล่อากาศหรือก๊าซสำหรับหลอดสุญญากาศ

- เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์
- อุปกรณ์และชิ้นส่วนของจรวด เครื่องบิน เป็นต้น

### ค. ความเป็นพิษ

โลหะในโอเบียมพบความเป็นพิษ

วิธีการแยกไอออนโลหะมีหลายวิธีที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง วิธีที่สำคัญ เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical precipitation) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) และการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane) เป็นต้น แต่ละวิธีต่างก็มีทั้งข้อดีและข้อจำกัด วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีข้อดีคือสามารถแยกไอออนโลหะจากสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนโลหะสูงๆ ได้ดี แต่ไม่สามารถแยกไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำได้ สำหรับวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย และการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวอาศัยหลักการเดียวกัน การสกัดด้วยตัวทำละลายประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการสกัด และขั้นตอนการนำกลับ ส่วนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวนั้นการสกัดและการนำกลับจะเกิดขึ้นพร้อมกันภายในขั้นตอนเดียว ซึ่งทำให้ง่ายต่อการปฏิบัติการในการนำกลับในกรณีที่เป็นไอออนโลหะมีค่าหรือไอออนโลหะหายาก และประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย นอกจากนี้การใช้เยื่อแผ่นเหลวยังสามารถแยกไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำระดับมิลลิกรัมต่อลิตรหรือไมโครกรัมต่อลิตรได้โดยมีค่าการถ่ายเทมวลและการคัดเลือก ไอออนโลหะสูง ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะรายละเอียดของการสกัดด้วยตัวทำละลาย และการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวดังต่อไปนี้

### 1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลาย [18]

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) ประกอบด้วยวัฏภาคของสารละลาย 3 วัฏภาคได้แก่

- วัฏภาคสารละลายป้อน (feed phase) เป็นวัฏภาคที่มีองค์ประกอบของไอออนที่ต้องการสกัดละลายอยู่และปกติจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
- วัฏภาคสารละลายอินทรีย์ (organic phase) ประกอบด้วยสารสกัด (extractant หรือ carrier) ซึ่งละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์
- วัฏภาคสารละลายนำกลับ (strip phase) เป็นวัฏภาคที่ทำหน้าที่รองรับองค์ประกอบของไอออนที่ต้องการสกัด ดังนั้นการนำกลับ (recovery หรือ stripping) จะสมบูรณ์ได้ใน 2 ขั้นตอน ดังนี้



**ขั้นตอนที่ 1** เป็นขั้นตอนการสกัด ซึ่งองค์ประกอบของไอออนที่ต้องการสกัดในวัฏภาคสารละลายป้อนจะเกิดการถ่ายเทมวล (mass transfer) เข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัดที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ได้ไอออนเชิงซ้อน (complex species) ขององค์ประกอบที่ต้องการสกัดกับสารสกัดขึ้น หรือเป็นสารละลายของเกลือในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ โดยที่ไอออนเชิงซ้อนนี้จะละลายได้ดีในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์เท่านั้น

**ขั้นตอนที่ 2** เป็นขั้นตอนการนำกลับ ในขั้นตอนนี้ไอออนเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์จะเกิดการถ่ายเทมวลและปฏิกิริยาการนำกลับ ทำให้องค์ประกอบของไอออนที่ต้องการสกัดเข้าไปละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายนำกลับ

ดังนั้นการถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการสกัดในกระบวนการนี้จึงขึ้นกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการสกัดจะถูกจำกัดโดยสัดส่วนระหว่างสารละลายป้อนกับตัวทำละลาย (feed to solvent ratio) และสัดส่วนการกระจายของไอออนที่ต้องการสกัดในวัฏภาคต่างๆ (distribution ratio) รวมถึงพื้นที่ผิวสัมผัสขณะเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ และพื้นที่ผิวสัมผัสขณะเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคสารละลายอินทรีย์กับวัฏภาคสารละลายนำกลับ

#### 1.4 กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane process) ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

- ก. ส่วนของสารละลายป้อน (feed phase) เป็นส่วนที่มีองค์ประกอบของไอออนที่ต้องการสกัดละลายอยู่ ส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลาย
- ข. ส่วนของเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) เป็นส่วนที่ประกอบด้วย สารสกัดที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายน้ำมัน
- ค. ส่วนของสารละลายนำกลับ (stripping phase) ทำหน้าที่รับองค์ประกอบของไอออนที่ต้องการสกัดซึ่งถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาจากด้านสารละลายป้อน ส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลายเช่นเดียวกับส่วนของสารละลายป้อน

ส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างสารละลายป้อน กับสารละลายนำกลับ องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับซึ่งเป็นฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบของไอออนที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบ

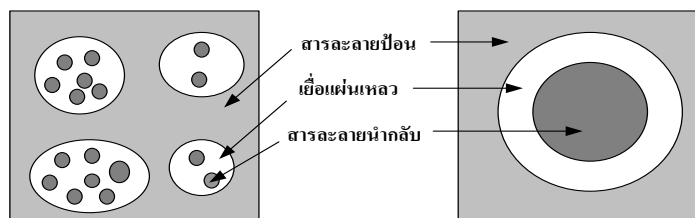
เชิงซ้อน จะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับ และแยกตัวออกมาละลายในสารละลายนำกลับ จึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบ (ที่ต้องการบำบัดหรือต้องการนำกลับ) จากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับได้

ประเภทของเยื่อแผ่นเหลว

#### 1.4.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (emulsion liquid membrane process)

สำหรับเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันสารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายน้ำมันเป็นวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (dispersion phase) และจะเกิดการถ่ายเทองค์ประกอบ องค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาจะแพร่เข้าสู่สารละลายน้ำมัน และไปอยู่ที่สารละลายนำกลับซึ่งสารละลายนำกลับนั้นจะอยู่ภายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

สำหรับเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันสารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายน้ำมันเป็นวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (dispersion phase) กระบวนการถ่ายเทมวลขององค์ประกอบเกิดจากการทำปฏิกิริยาขององค์ประกอบกับสารสกัดที่ละลายอยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นองค์ประกอบจะแพร่ต่อไปยังสารละลายนำกลับ ซึ่งอยู่ในรูปของอิมัลชันขนาดเล็กๆ ภายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว



รูปที่ 1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน [1]

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันสามารถเตรียมได้โดยผสมสารละลายนำกลับกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะต้องไม่ละลายกัน แล้วนำมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงเพื่อทำให้วัฏภาคสารละลายนำกลับเป็นอิมัลชันขนาดเล็กๆ อยู่ในวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ได้จะมีความเสถียรต่ำ จึงต้องเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียร หลังจากนั้นใส่เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่เตรียมเสร็จแล้วลงในสารละลายป้อน ทำให้เกิดการเรียงวัฏภาคเป็น 3 ชั้น จากด้านในไปด้านนอก คือสารละลายนำกลับ สารละลายเยื่อแผ่นเหลว และสารละลายป้อน ตามลำดับ เรียกว่าอิมัลชันเชิงซ้อน (double emulsion) เมื่อเกิดการแยกชั้นของแต่ละวัฏภาคแล้ว องค์ประกอบที่

ต้องการสกัดจะไปอยู่ในสารละลายนำกลับ แล้วจึงนำสารละลายป้อนที่ถูกสกัดองค์ประกอบที่ต้องการออกไปแล้วไปแยกออกจากเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน สุดท้ายจึงนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ผ่านการสกัดแล้วไปแยกองค์ประกอบที่ต้องการสกัดออกจากสารละลายนำกลับ เพื่อให้ได้สารละลายผลิตภัณฑ์ ส่วนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวสามารถนำกลับไปใช้ได้

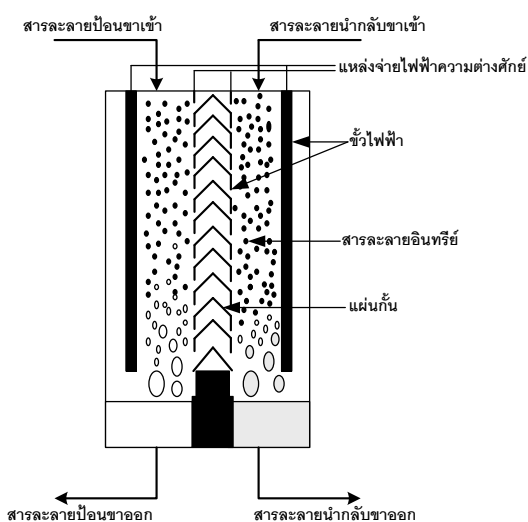
เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (water in oil (w/o) emulsion) คือเยื่อแผ่นเหลวที่มีสารละลายนำกลับหรือวัฏภาคภายในเป็นน้ำ
- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (oil in water (o/w) emulsion) คือเยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน

#### 1.4.2 เยื่อแผ่นเหลวเทียมแบบไฟฟ้าสถิต

(electrostatic pseudo liquid membrane, ELPLIM)

เยื่อแผ่นเหลวเทียมแบบไฟฟ้าสถิตพัฒนามาจากหอสกัดเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิว และเพื่อลดความยุ่งยากของระบบเยื่อแผ่นเหลว โดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางไฟฟ้าภายใต้สนามไฟฟ้ากำลังสูง หยดน้ำในวัฏภาคน้ำมันจะแตกตัวกระจายออกเป็นหยดเล็กๆ จำนวนมาก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การกวนด้วยกระแสไฟฟ้า (electrostatic agitation) ดังนั้นเมื่อนำสนามไฟฟ้ามาใช้กับกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวเทียม จึงทำให้วัฏภาคสารละลายของน้ำกระจายตัวในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ได้ดีขึ้น ระบบเยื่อแผ่นเหลวเทียมแบบไฟฟ้าสถิตนี้ แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ระบบเยื่อแผ่นเหลวเทียมแบบไฟฟ้าสถิต [1]

วิฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะถูกบรรจุอยู่ในหอสกัดซึ่งแบ่งออกได้เป็นฝั่งสกัดและฝั่งนำกลับ โดยอาศัยแผ่นกั้นที่ออกแบบพิเศษและส่วนล่างหอสกัดเป็นบริเวณที่ออกแบบมาเพื่อรองรับการรวมตัวของหยดสารละลายในฝั่งการสกัดและฝั่งการนำกลับ วิฏภาคเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดจะมีอิสระในการเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสองฝั่งโดยผ่านแผ่นกั้น ขณะที่หยดของวิฏภาคสารละลายป้อนและหยดของวิฏภาคสารละลายนำกลับที่อยู่ในฝั่งสกัดและฝั่งนำกลับแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ ฝั่งการสกัดและฝั่งการนำกลับจะถูกต่อคร่อมด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้ว เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงสารละลายของน้ำใน 2 ฝั่ง จะแตกกระจายตัวเป็นเม็ดเล็กจำนวนมากในวิฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ทำให้ห้องค้ประกอบที่ต้องการแยกในวิฏภาคสารละลายป้อนฝั่งหนึ่งเกิดการถ่ายเทผ่านวิฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังวิฏภาคสารละลายนำกลับอีกฝั่งหนึ่งได้

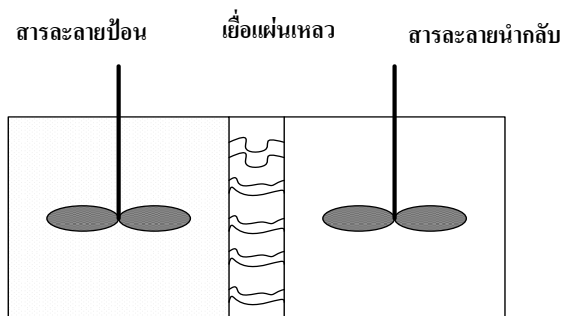
### 1.4.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้จะใช้พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนเป็นตัวรองรับ โดยเยื่อแผ่นเหลวจะถูกตรึงไว้ในรูพรุนของพอลิเมอร์ด้วยแรงแคปิลลารี (capillary force) ตัวรองรับนั้นมีหลายชนิด เช่น ชนิดแผ่นแบน (flat sheet) ชนิดแผ่นม้วน (spiral wound) และชนิดเส้นใยกลวง (hollow fiber) ลักษณะเด่นของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับคือกระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยาก ใช้พื้นที่ในการปฏิบัติงานน้อย และใช้สารสกัดปริมาณน้อย เป็นต้น

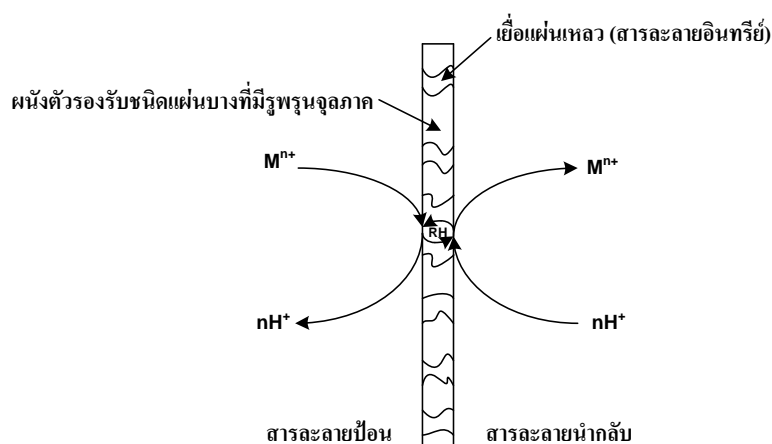
#### ก. เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน

##### (flat-sheet supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นบางนี้ วัสดุที่นำมาทำเป็นตัวรองรับมักทำจากพอลิเมอร์ เช่น พอลิโพรพิลีน (polypropylene: PP), พอลิเอทิลีน (polyethylene: PE), พอลิเตตราฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene: PTFE) โดยที่แผ่นตัวรองรับซึ่งยึดพองเยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างวิฏภาคสารละลายป้อนและวิฏภาคสารละลายนำกลับ ดังรูปที่ 1.3 และเกิดกลไกการสกัด แสดงดังรูปที่ 1.4 เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาการถ่ายเทมวลเนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่เหมาะสมและง่ายต่อความเข้าใจ อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่การถ่ายเทมวลน้อย [18]



รูปที่ 1.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแผ่นบาง [18]

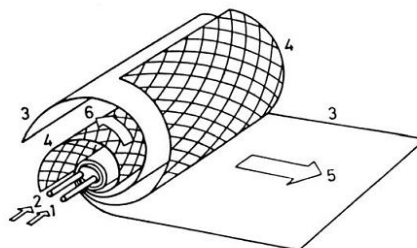


รูปที่ 1.4 กลไกการสกัดของกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง [1]

#### ข. เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน

##### (spiral-wound support liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วนแสดงดังรูปที่ 1.5 ตัวรองรับแบบแผ่นม้วนอาจเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ หรือเป็นแผ่นตาข่าย (mesh spacer) ที่ทำจากพอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อ นำสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของตัวรองรับจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี (epoxy) ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว (raffinate) และสารละลายนำกลับที่ได้หรือสารละลายสตริป (stripping solution) จะไหลออกจากท่อที่สอดไว้ด้านในสุดของตัวรองรับ จุดเด่นของเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้คือตัวรองรับที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน



รูปที่ 1.5 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน [18]

หมายเลขที่ 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน หมายเลขที่ 2 ทางเข้าของสารละลายนำกลับ

หมายเลขที่ 3 เยื่อแผ่นเหลว

หมายเลขที่ 4 แผ่นกั้น

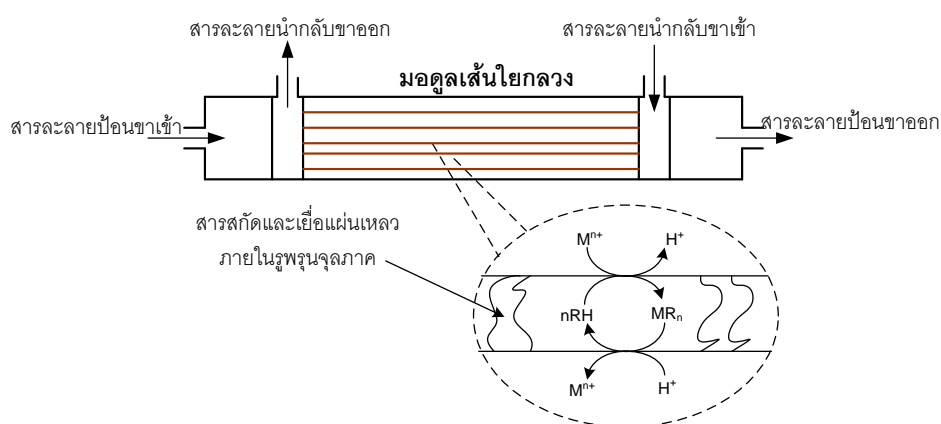
หมายเลขที่ 5 สารละลายป้อนขาออก

หมายเลขที่ 6 สารละลายนำกลับขาออก

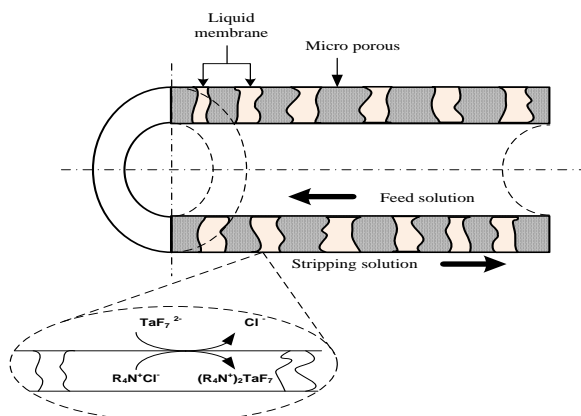
### ค. เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

#### (hollow-fiber supported liquid membrane: HFSLM)

เป็นรูปแบบที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 1.6 ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงจำนวนมาก ถูกเรียงในแนวนานกันแล้วบรรจุลงในมอดูลรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของมอดูลด้วยเรซิน (resin) สารสกัดจะละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวซึ่งฝังอยู่ในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับอาจเป็นแบบทางเดียวกันหรือแบบสวนทางกัน สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในมอดูลของเส้นใยกลวงที่เรียกว่าฝั่งท่อ (tube side) และฝั่งเปลือก (shell side) ซึ่งถูกกำหนดโดยผู้วิจัย ในงานวิจัยนี้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในฝั่งท่อและฝั่งเปลือกตามลำดับ รูปที่ 1.7 แสดงลักษณะการไหลภายในเส้นใยกลวง



รูปที่ 1.6 มอดูลของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง



**รูปที่ 1.7** ลักษณะการไหลแบบสวนทางของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในเส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง [18]

การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงทำโดยนำเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นวัฏภาคสารละลายของน้ำมันและไม่ละลายกับวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมาเคลือบฝังไว้บนตัวรองรับเส้นใยกลวง เกิดเป็นแผ่นฟิล์มกั้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดที่ชอบน้ำ และชนิดที่ไม่ชอบน้ำ

**ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ [1]**

- 1) มีประสิทธิภาพการสกัดและนำกลับสูง
- 2) มีอัตราการถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- 3) มีค่าการคัดเลือก (selectivity) สูง
- 4) สามารถเลือกความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ได้
- 5) ใช้สารสกัดปริมาณน้อย
- 6) มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ
- 7) สามารถขยายขนาดได้ง่าย เพื่อประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

รูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และสามารถปรับปรุงสมบัติของเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพได้ง่ายโดยการเติมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวกลับเข้าไปใหม่

ตารางที่ 1.4 แสดงข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

ตารางที่ 1.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวประเภทต่างๆ [1]

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิต		เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับ	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง	ใช้สารอินทรีย์ปริมาณสูง	มีเสถียรภาพสูง	กำลังการผลิตต่ำ	มีค่าการคัดเลือกสูง	สัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ
มีกำลังการผลิตสูง	ใช้พลังงานสูง	ประสิทธิภาพสูง	สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขี้ด่ำ	ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ
กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน	ปัญหาการปนเปื้อน	การปนเปื้อนต่ำ	สารอินทรีย์ต้องเป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น	ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ	การสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว
	ปัญหาการใช้สารลดแรงตึงผิวและการบำบัด	ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก	ใช้พลังงานต่ำ	
				ขยายขนาดง่าย	
				อัตราการถ่ายเทมวลสูง	

จากตารางที่ 1.4 จะเห็นว่าตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงมีข้อดีหลายประการ ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงแยกไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม

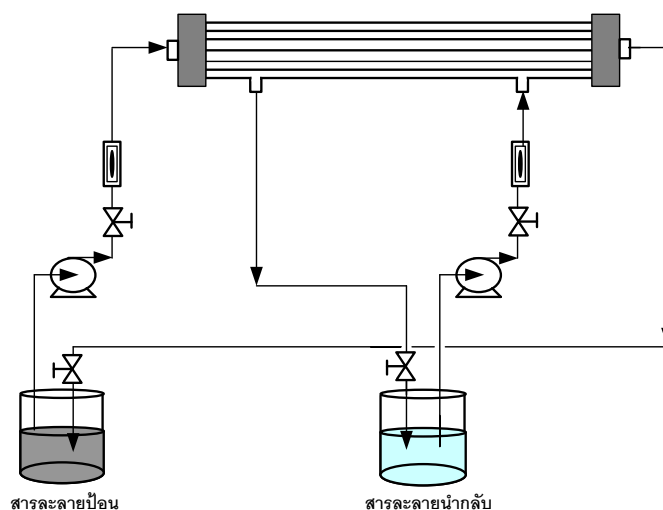
### 1.5 รูปแบบการปฏิบัติการ (operation mode) ผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การปฏิบัติการผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงสามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบ คือ แบบกะ (batch operation mode) แบบไหลต่อเนื่อง (continuous operation mode) และแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-batch operation mode)

- **ปฏิบัติการแบบกะ** จะใช้สารละลายป้อนเพียง 1 ถัง และสารละลายนำกลับเพียง 1 ถัง โดยให้สารละลายป้อนขาเข้าและขาออกไหลวนอยู่ในถังเดียวกัน และสารละลายนำกลับขาเข้าและขาออกไหลวนอยู่ในถังเดียวกันเช่นกัน ตามจำนวนรอบและเวลาในการสกัดที่ต้องการศึกษา รูปที่ 1.8 แสดงปฏิบัติการแบบกะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน (counter-current

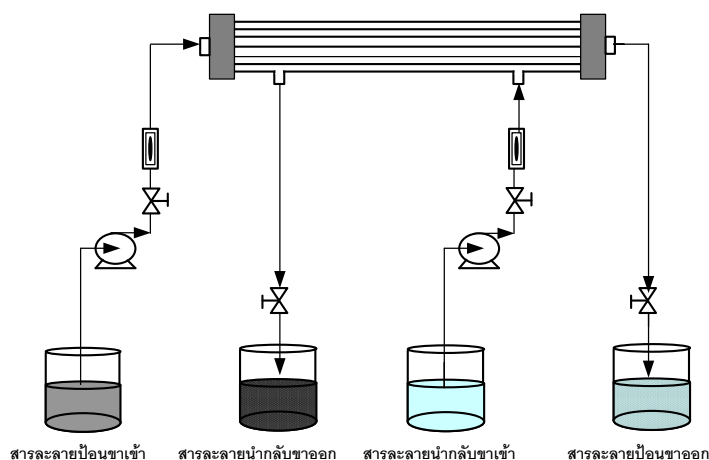


flow) ปฏิบัติการแบบนี้มักใช้เมื่อมีสารละลายป้อนปริมาณน้อยๆ ข้อดีคือสามารถสกัดไอออนโลหะออกจากสารละลายป้อนได้มากจนสารละลายป้อนนั้นเกือบจะปราศจากไอออนโลหะ



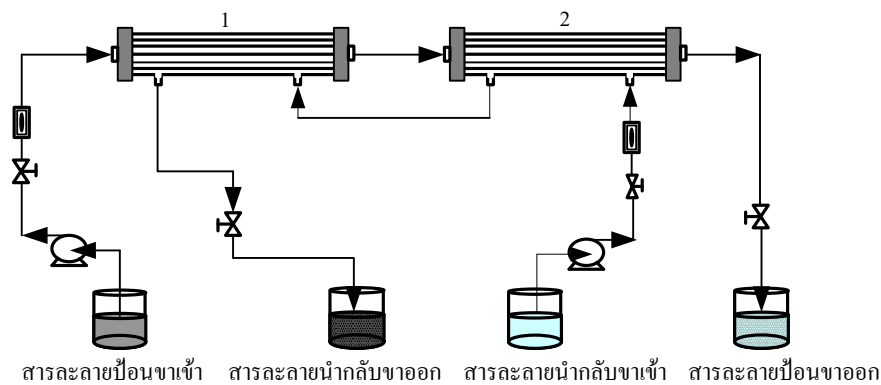
รูปที่ 1.8 ปฏิบัติการแบบกะแบบไหลสวนทาง

- **ปฏิบัติการแบบไหลต่อเนื่อง** จะใช้สารละลายป้อน 2 ถัง (สารละลายป้อนขาเข้าและขาออก) และสารละลายนำกลับ 2 ถัง (สารละลายนำกลับขาเข้าและขาออก) ดังแสดงในรูปที่ 1.9 สารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกจะถูกวนกลับมาผ่านมอดูลอีกตามจำนวนรอบและเวลาในการสกัดที่ต้องการศึกษา ปฏิบัติการแบบนี้ใช้เมื่อมีสารละลายป้อนในปริมาณมาก เหมาะในการประยุกต์ระดับอุตสาหกรรม

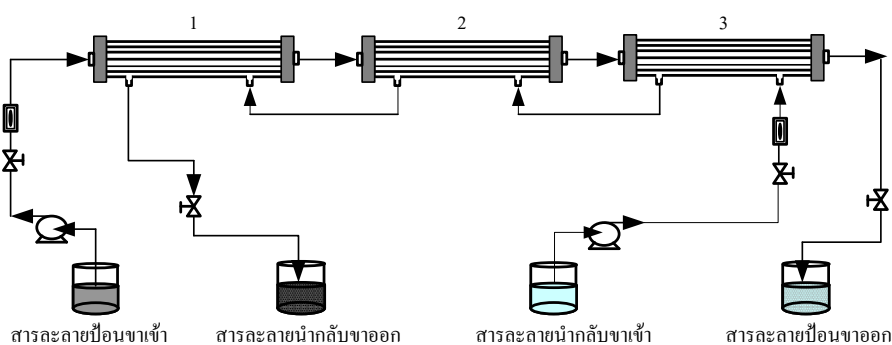


รูปที่ 1.9 ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องแบบไหลสวนทาง

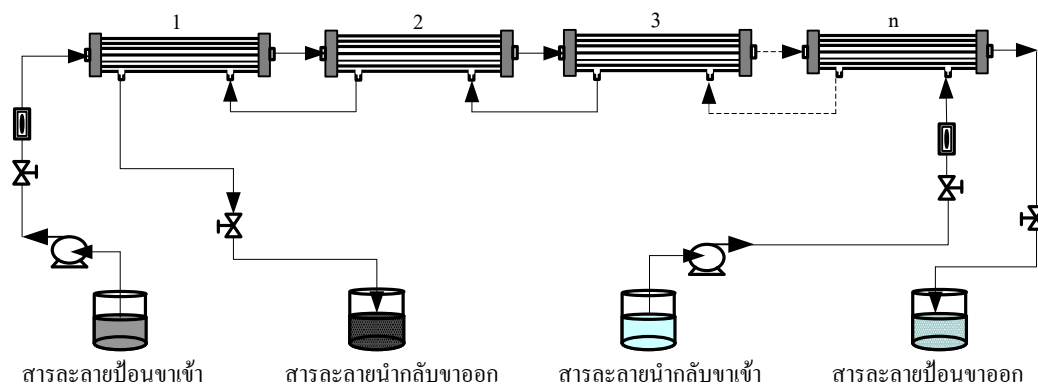
ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องสามารถใช้หม้อคู่เส้นใยกลวงต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสกัด โดยใช้สารละลายป้อน 2 ถัง (ถังของสารละลายป้อนขาเข้าและขาออก) และสารละลายนำกลับ 2 ถัง (ถังของสารละลายนำกลับขาเข้าและขาออก) ดังแสดงในรูปที่ 1.10 (ก)-(ค) สารละลายป้อนขาเข้าจะไหลผ่านหม้อคู่หนึ่งไปยังอีกหม้อคู่หนึ่งและไหลออกไปยังถังของสารละลายป้อนขาออก ในขณะที่สารละลายนำกลับขาเข้าก็จะไหลผ่านหม้อคู่หนึ่งไปยังอีกหม้อคู่หนึ่งเช่นกันและไหลออกไปยังถังของสารละลายนำกลับขาออก ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในรูปแบบเป็นแบบสวนทางกัน



(ก)



(ข)



(ก)

**รูปที่ 1.10** ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ต่ออนุกรมและเป็น การไหลแบบสวนทาง (ก) อนุกรม 2 มอดูล (ข) อนุกรม 3 มอดูล (ค) อนุกรม n มอดูล

- ปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง คือการปฏิบัติการที่มีทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง แบ่งเป็น

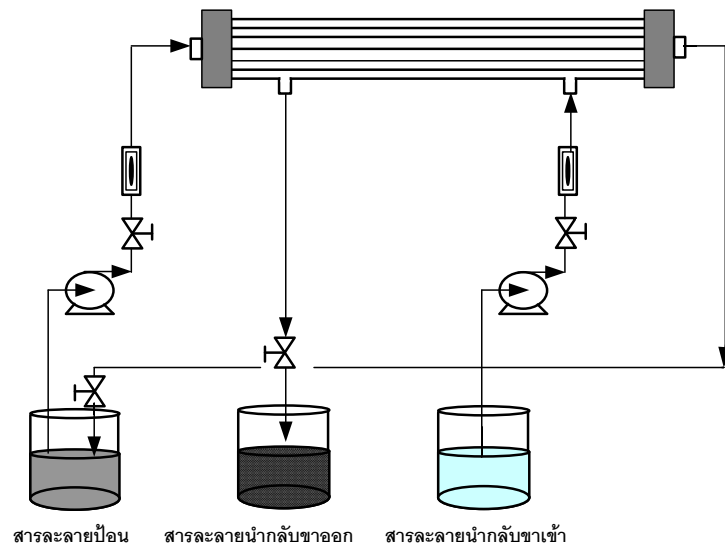
1. สารละลายป้อนไหลแบบกะ-สารละลายนำกลับไหลแบบต่อเนื่อง รูปที่ 1.11 (ก)

ปฏิบัติการแบบนี้สารละลายป้อนขาเข้าและขาออกมี 1 ถัง ส่วนสารละลายนำกลับมี 2 ถัง (สารละลายนำกลับขาเข้าและขาออก) สารละลายนำกลับขาออกจะถูกววนกลับมาผ่านมอดูลอีก ปฏิบัติการลักษณะนี้ยังไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากยังไม่เห็นประโยชน์อย่างเด่นชัด

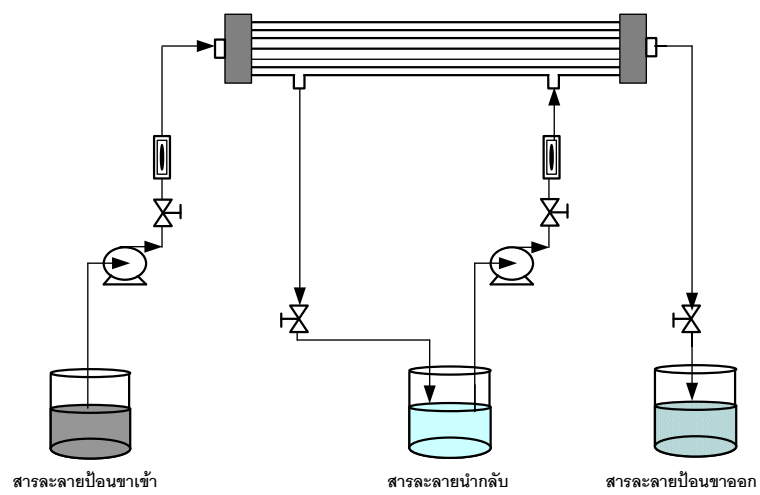
2. สารละลายป้อนไหลแบบต่อเนื่อง-สารละลายนำกลับไหลแบบกะ รูปที่ 1.11 (ข)

ปฏิบัติการแบบนี้สารละลายป้อนมี 2 ถัง (สารละลายป้อนขาเข้าและขาออก) และจะถูกววนกลับมาผ่านมอดูลอีก ในขณะที่สารละลายนำกลับขาเข้าและขาออกมี 1 ถัง การไหลของปฏิบัติการลักษณะนี้จึงสามารถเพิ่มความเข้มข้นของไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายนำกลับให้มีค่าสูงได้

ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับภายในมอดูลเส้นใยกลวงนอกจาก การไหลแบบสวนทางกันแล้ว อาจให้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลในทางเดียวกัน (co-current flow)



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.11 ปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องแบบไหลสวนทาง  
 (ก) สารละลายป้อนไหลแบบกะ-สารละลายนำกลับไหลแบบต่อเนื่อง  
 (ข) สารละลายป้อนไหลแบบต่อเนื่อง-สารละลายนำกลับไหลแบบกะ

## 1.6 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการแยกแ่่นเหลวแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด ดังนี้

### 1.6.1 สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant)

สารสกัดประเภทนี้แบ่งได้สองประเภท คือ สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant) ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น  $-\text{COOH}$ ,  $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$  และสารสกัดชนิดคีเลท (chelate extractant) ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดทั้งสองประเภทเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ปฏิกิริยาการสกัดแสดงดังสมการที่ (1.1)



โดยที่  $\text{M}^{n+}$  แทนไอออนโลหะในสารละลายป้อน  
 $\overline{\text{HR}}$  แทนสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว  
 $\overline{\text{MR}}_n$  แทนไอออนเชิงซ้อนของไอออนโลหะกับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว

สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีการใช้กันอย่างกว้างขวางในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์อินทรีย์ของกรดฟอสฟอรัส (organic derivatives of phosphorous acids) และกรดโมนอคาร์บอกซิลิก (monocarboxylic acids) ซึ่งสารสกัดประเภทนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acids, D2EHPA)

สารสกัดประเภทคีเลท ได้แก่ สารสกัดที่ประกอบด้วยดอนเนอร์กรุป (donor groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลทเชิงพาณิชย์ มี 2 ประเภทได้แก่

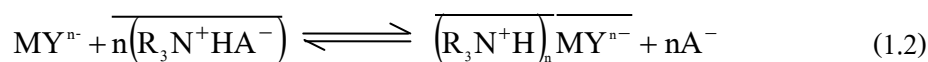
(ก) กลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc., USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical, USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemicals USA

(ข) กลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemicals Company, USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วน

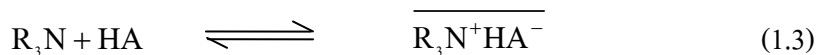
ใหญ่ผลิตมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (acidic leach liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์

### 1.6.2 สารสกัดชนิดเบส (basic extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเป็นเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด ประเภทที่ใช้กันมากได้แก่เอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (quaternary ammonium halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (ammonium salts) ชนิดปฐมภูมิ (primary,  $\text{RNH}_2$ ) ชนิดทุติยภูมิ (secondary,  $\text{R}_2\text{NH}$ ) ชนิดตติยภูมิ (tertiary,  $\text{R}_3\text{N}$ ) และชนิดจตุภูมิ (quaternary ammonium salts,  $\text{R}_4\text{N}^+$ ) ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (anionic species)



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



เอมีนจะทำปฏิกิริยากับกรดเกิดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีชื่อ  $\overline{\text{R}_3\text{N}^+\text{HA}^-}$  ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ  $[\text{MY}]^{n-}$  จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกันดังสมการที่ (1.2)

### 1.6.3 สารสกัดชนิดขอลเวท (solvating extractant) หรือสารสกัดชนิดที่เป็นกลาง (neutral extractant)

สารสกัดประเภทนี้ไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถของไอออนโลหะในการที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดเบส การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมกลางของสารประกอบเชิงซ้อน หรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดโซลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ใน

วิฤภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัด ดังสมการที่ (1.4) และ (1.5)



## 1.7 งานวิจัยที่ผ่านมา

### 1.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม

#### Campderrós และ Marchese [7]

ศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม ซึ่งละลายอยู่ในตัวกลางคลอไรด์ ผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane) โดยใช้ TBP (tributylphosphate) เป็นสารสกัด และสารละลายนำกลับคือ กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร สารละลายป้อนเตรียมจากไนโอเบียมออกไซด์และแทนทาลัมออกไซด์ซึ่งในสารละลายป้อนจะประกอบด้วยไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ละลายอยู่ในกรดไฮโดรคลอริก และต้องการศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม โดยศึกษาในช่วง 1-10 โมลต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนมีผลต่อการถ่ายเทมวลของไอออนไนโอเบียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวโดยการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก มีผลทำให้การถ่ายเทมวลของไอออนไนโอเบียมเพิ่มขึ้น และมีค่าอัตราการถ่ายเทมวลมากที่สุดที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 6-9 โมลต่อลิตร ซึ่งในช่วงความเข้มข้นนี้ ไอออนแทนทาลัมถ่ายเทมวลได้น้อยเมื่อเทียบกับไอออนไนโอเบียม กล่าวคือได้ค่าร้อยละการสกัดของไอออนไนโอเบียมและแทนทาลัม เท่ากับ 55 และ 25 ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสามารถแยกไอออนไนโอเบียมออกจากไอออนแทนทาลัมได้

#### Zhou และ Tokuda [19]

ศึกษาการสกัดไอออนไนโอเบียมที่ละลายอยู่ในตัวกลางอัลคาไลด์ ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้ Aliquat 336 เป็นสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายโทลูอิน ทำการทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นไอออนของไนโอเบียม 0.01 โมลต่อลิตร ศึกษาค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อนในช่วง 10.7-13.8 และความเข้มข้นสารสกัดในช่วง 0.02-0.14 โมลต่อ

ลิตร พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนไนโอเบียมเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด และค่าความเป็นกรด-เบส ที่ให้ผลการสกัดดีที่สุดคือ 12 กล่าวได้ว่า Aliquat 336 เป็นสารสกัดที่สามารถสกัดไอออนไนโอเบียมจากตัวกลางอัลคาไลด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### **Campderrós และ Marchese [20]**

ศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนไนโอเบียมซึ่งละลายอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแบบแผ่นแบนโดยใช้ Alamine 336, TBP และสารสกัดผสมของ Alamine 336-TBP เป็นสารสกัด ใช้กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ จากการศึกษพบว่าการใช้สารสกัดผสมของ Alamine 336 ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตรกับ TBP ความเข้มข้น 90% โดยปริมาตร ให้ผลการสกัดที่ดีกว่าการใช้สารสกัดชนิดเดียว และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสม คือ 6-7 โมลต่อลิตร ที่สภาวะนี้พบว่าไอออนไนโอเบียมถ่ายเทมวลได้ดี ค่าอัตราการถ่ายเทมวลเท่ากับ  $15 \times 10^9$  โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที และเมื่อใช้สภาวะนี้สกัดสารละลายป้อนที่มีไอออนผสมของไนโอเบียมและแทนทาลัมอย่างละ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถสกัดไอออนไนโอเบียมออกจากไอออนแทนทาลัมได้

#### **Mayorov และ Nikolaev [10]**

ศึกษาการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดที่ใช้คือ TBP และ octanol ใช้ตัวทำละลายกรดในสารละลายป้อนเป็นกรดซัลฟิวริกและกรดเฮกซะฟลูออโรซิลิก (H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>) และใช้สารละลายนำกลับคือกรดซัลฟิวริกผสมกับกรดไฮโดรฟลูออริก พบว่าเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร และใช้ TBP เป็นสารสกัด จะได้ร้อยละของการสกัดไอออนแทนทาลัม 93.9 และร้อยละของการสกัดไอออนไนโอเบียม 14.1 และเมื่อใช้ H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> ในสารละลายป้อน ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร และใช้ octanol เป็นสารสกัด จะได้ร้อยละของการสกัดไอออนแทนทาลัม 79 และร้อยละของการสกัดไอออนไนโอเบียม 61.8

#### **Htet และ Lwin [21]**

ศึกษาการสกัดไอออนไนโอเบียมออกจากแร่โคลัมไบต์-แทนทาลาไลต์ (columbite-tantalite) ซึ่งในแร่โคลัมไบต์-แทนทาลาไลต์ มีไนโอเบียมออกไซด์ เท่ากับ 19.29% ซึ่งมาจากขั้นตอนการย่อยแร่ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดซัลฟิวริก และสกัดไอออนไนโอเบียมออกจากสารละลาย ด้วยตัวทำละลาย MIBK แล้วตกตะกอนที่ได้ด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และเผา (calcine) ไนโอเบียมออกไซด์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ 74%



สำหรับขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ตัวกลางในสารละลายป้อนใช้กรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ผสมกับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 8 โมลต่อลิตร สกัดด้วย MIBK เป็นเวลา 30 นาที พบว่าไอออนไนโอเบียมและแทนทาลัมถูกสกัดเข้าไปอยู่ในสารสกัด จากนั้นนำส่วนของสารสกัดไปทำการนำกลับด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร พบว่าไอออนไนโอเบียมถูกนำกลับออกมาส่วนไอออนแทนทาลัมยังคงอยู่ในส่วนของสารสกัด นำส่วนของสารละลายนำกลับไปตกตะกอนโดยเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ได้ตะกอนของ  $\text{Nb}(\text{OH})_5$  จากนั้นนำตะกอนไปละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 30% และเผา จะได้ไนโอเบียมเพนทอกไซด์ ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ )

#### El-Hazek และคณะ [22]

ศึกษาการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้ 2-octanol ( $\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$ ) เป็นสารสกัด และกรดซัลฟิวริกเป็นตัวกลางกรดในสารละลายป้อน พบว่าเมื่อใช้สารสกัด 2-octanol ความเข้มข้น 100% โดยปริมาตร ให้ร้อยละการสกัดดีที่สุด และจาก McCabe -Thiele diagram พบว่าถ้าสกัด 3 รอบ จะได้ประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมสูงที่สุด และสามารถแยกไอออนแทนทาลัมออกจากไอออนไนโอเบียมได้ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2 ร้อยละของการสกัดคัดเลือกไอออนแทนทาลัม เท่ากับ 99.3 และไม่สกัดไอออนไนโอเบียม การศึกษาชนิดของสารละลายนำกลับสำหรับการนำกลับไอออนแทนทาลัม ได้แก่ น้ำกลั่น กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และกรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าน้ำกลั่นสามารถนำกลับไอออนแทนทาลัมได้ดีที่สุด และจาก McCabe-Thiele diagram พบว่าการนำกลับ 3 รอบ สามารถนำกลับไอออนแทนทาลัมจากสารละลายอินทรีย์ได้สมบูรณ์ สำหรับการสกัดไอออนไนโอเบียม ศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด 2-octanol ในช่วง 50-100% ความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนในช่วง 0.7-2.5 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารสกัด 2-octanol เท่ากับ 100% โดยปริมาตร และความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.7 สามารถสกัดไอออนไนโอเบียมได้ดีที่สุด และจาก McCabe-Thiele diagram พบว่าถ้าสกัด 3 รอบ สามารถสกัดไอออนไนโอเบียมได้สมบูรณ์ สำหรับการนำกลับพบว่าสารละลายผสมของกรดซัลฟิวริกกับกรดไฮโดรฟลูออริกสามารถนำกลับไอออนไนโอเบียมได้ดีที่สุด และจาก McCabe-Thiele diagram พบว่าการนำกลับ 4 รอบ สามารถนำกลับไอออนไนโอเบียมได้สมบูรณ์ที่สุด

### Kasikova และคณะ [23]

ศึกษาการสกัดไอออนไนโอเบียมในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นไอออนลบ  $[\text{NbOCl}_5]^{2-}$  จากตัวกลางกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นเท่ากับ 11.4 โมลต่อลิตร ผ่านระบบการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยเปรียบเทียบสารสกัดในกลุ่มของเอมีนชนิดตติยภูมิ (tertiary amines) ได้แก่ TOA (trioctylamine), TiOA (triisooctylamine) และ TAA (trioalkylamine) และเปรียบเทียบตัวทำละลายอินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ toluene, o-xylene และ ethylbenzene จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนไนโอเบียมเมื่อใช้สารสกัด TOA, TiOA และ TAA, คือ 288, 275.8 และ 199.1 ตามลำดับ และเมื่อศึกษาชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์กับการใช้สารสกัดแต่ละชนิด พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนไนโอเบียมเรียงตามลำดับดังนี้ o-xylene > toluene > ethylbenzene เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด 3 ชนิด พบว่าสารสกัด TOA, TiOA และ TAA ที่ความเข้มข้นเท่ากัน 30% โดยปริมาตร TOA และ TiOA ให้ร้อยละการสกัดไอออนไนโอเบียมมากกว่า 99% ส่วน TAA ให้ร้อยละการสกัดไอออนไนโอเบียมมากกว่า 98% สรุปได้ว่าสารสกัดเอมีนชนิดตติยภูมิทั้ง 3 ชนิด สามารถสกัดไอออนไนโอเบียมในตัวกลางกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 1.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนโลหะ

### Pancharoen และคณะ [24]

ศึกษาการสกัดไอออนผสมของซีเรียม Ce(IV) และไอออนแลนทานัม LA(III) จากตัวกลางกรดซัลฟิวริกผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้ TOA ในเคโรซีนเป็นสารสกัด และใช้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เป็นสารละลายนำกลับ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด TOA และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมคาร์บอเนต พบว่าสามารถสกัดไอออนซีเรียมได้ แต่ไม่สกัดไอออนแลนทานัม และที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ไม่เกิน 5% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมคาร์บอเนตเท่ากับ 1 โมลต่อลิตร ได้ร้อยละการสกัดและการนำกลับของไอออนซีเรียมดีที่สุดเท่ากับ 100 และ 67 ตามลำดับ

**Fábrega และ Mansur [25]**

ศึกษาการสกัดไอออนปรอท  $\text{Hg(II)}$  จากตัวกลางกรดไฮโดรคลอริก ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ใช้ Aliquat 336 (tri-octylmethylammonium chloride) ละลายในเคโรซีนเป็นสารสกัดและสารละลายไทโอยูเรียเป็นสารละลายนำกลับ พบว่าการสกัดไอออนปรอทเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดไอออนปรอทคือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 7 มิลลิโมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายไทโอยูเรีย ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตรได้ร้อยละการสกัด และร้อยละการนำกลับไอออนปรอท เท่ากับ 99.97 เท่ากับ 99 ตามลำดับ

**Sangtumrong และคณะ [26]**

ศึกษาการสกัดไอออนปรอทและอาร์ซีนิกจากตัวกลางกรดไฮโดรคลอริกผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้ TOA ละลายในโทลูอีนเป็นสารสกัดและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ ไอออนปรอทในสารละลายป้อนจะอยู่ในรูป  $\text{HgCl}_4^{2-}$  ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นสารสกัด TOA และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสามารถสกัดไอออนปรอทได้แต่ไม่สามารถสกัดไอออนอาร์ซีนิก ที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ให้ร้อยละการสกัดของไอออนปรอทดีที่สุด แต่เมื่อความเข้มข้นสารสกัด TOA สูงกว่า 2% โดยปริมาตร ร้อยละการสกัดของไอออนปรอทลดลง ส่วนการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ พบว่าร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทลดลง เมื่ออัตราการไหลสูงกว่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที

**Resina และคณะ [27]**

ศึกษาการสกัดแพลทินัม  $\text{Pt(IV)}$  ผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบแผ่นแบน โดยค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อนเท่ากับ 2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในช่วง 0-800 มิลลิโมลต่อลิตร และเปรียบเทียบชนิดของสารละลายนำกลับ ได้แก่  $\text{NaNO}_3$ , thiourea,  $\text{NaSCN}$  และ  $\text{NaClO}_4$  จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ที่เหมาะสมคือ 250 มิลลิโมลต่อลิตร สารละลายนำกลับที่เหมาะสมคือ  $\text{NaClO}_4$  ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ได้ร้อยละการสกัดและการนำกลับแพลทินัม เท่ากับ 93 และ 77 ตามลำดับ

**Lothongkum และคณะ [28]**

ศึกษาการสกัดไอออนยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตซึ่งเป็นสารพลอยได้ (by product) ที่ได้จากระบวนการถลุงแร่โมนาไซต์โดยใช้กระบวนการสกัดผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารละลายป้อนมีความเข้มข้นของไอออนยูเรเนียม เท่ากับ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของ  $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$  ใช้กรดไนตริกเป็นสารละลายนำกลับ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ และจำนวนรอบในการสกัด ชนิดของสารสกัดที่ศึกษาได้แก่ Cyanex 923, TBP, TOA และ Aliquat 336 จากการศึกษพบว่าการใช้สารสกัดผสมของ Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร กับ TBP ความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของกรดไนตริกเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร ที่อัตราการไหลสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที จำนวนรอบการสกัด 7 รอบ ให้ร้อยละการสกัดและการนำกลับดีที่สุดในที่ศึกษาเท่ากับ 99 และ 53 ตามลำดับ

**Pancharoen และคณะ [29]**

ศึกษาการสกัดไอออนปรอทจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมเจาะแก๊สธรรมชาติซึ่งอยู่ในรูปของ  $HgCl_4^{2-}$  โดยใช้กระบวนการสกัดผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารสกัดที่ใช้คือ TOA ละลายในโทลูอีน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นสารสกัดและสารละลายนำกลับ จำนวนรอบในการสกัด และความเสถียรของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง พบว่าร้อยละการสกัดและการนำกลับสูงที่สุดในที่ศึกษาเท่ากับ 99.8 และ 62 ที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 2% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการสกัด 6 รอบเป็นเวลา 300 นาที ร้อยละการสกัดและการนำกลับเพิ่มขึ้น

**Lothongkum และคณะ [30]**

ศึกษาการสกัดไอออนอาร์ซีนิกและปรอทออกจากน้ำทิ้งหลุมขุดเจาะแก๊สธรรมชาติผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 กับ Cyanex 471 (tri-isobutylphosphine sulfide) จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดและนำกลับของไอออนอาร์ซีนิกและปรอทได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม คือ ความ

เข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร สารสกัดผสมระหว่าง Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.22 โมลต่อลิตร กับ Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร สารละลายนำกลับไทโอยูเรีย ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และเวลาในการสกัด 3 รอบ (120 นาที)

ตารางที่ 1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม

สารละลายป้อน	ตัวกลางกรด	สารสกัด	สารละลาย นำกลับ	ร้อยละ การสกัด	ร้อยละ การนำกลับ	วิธีการ	อ้างอิง
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	HCl (6-8 โมลต่อลิตร)	TBP (100% โดยปริมาตร)	HCl (1 โมลต่อลิตร)	Ta = 5 Nb = 55	Ta: n/a. Nb: n/a.	SLM	[7]
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	HCl (6-7 โมลต่อลิตร)	TBP-Alamine 336 (TBP = 95%, Alamine 336 = 5% โดยปริมาตร)	HCl (1 โมลต่อลิตร)	Ta = - Nb = 71.2	Ta: n/a. Nb: n/a.	SLM	[20]
Ta – Nb	HF-H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> (HF = 3, H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> = 4 โมลต่อลิตร)	Octanol (100% โดยปริมาตร)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (2 โมลต่อลิตร)	Ta = 79 Nb = 61.8	Ta: n/a. Nb: n/a.	LLE	[10]
columbite	HF-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , (HF = 4.3, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 5.7 โมลต่อลิตร)	MIBK (100% โดยปริมาตร)	HF (1 โมลต่อลิตร)	Ta = 100 Nb = 56.1	Ta = 100 Nb = 0	LLE	[31]
kab amiri ore	HF-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HF = 0.2, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 2%, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 0.5 โมลต่อลิตร	Alamine 336 (10% โดยปริมาตร)	KOH (50 กรัมต่อลิตร)	Ta = 78.9 Nb = 68.4	Ta = 99.3 Nb = 88	LLE	[9]
Columbite- tantalite	HF-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (HF = 2, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 8 โมลต่อลิตร)	MIBK (100% โดยปริมาตร)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (2 โมลต่อลิตร)	Ta n/a. Nb = 74	Ta: n/a. Nb: n/a.	LLE	[21]
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	HF	- TBP, - Aliquat 336	- NH <sub>2</sub> CSNH <sub>2</sub> , - NaClO <sub>4</sub> , - HCl			HFSLM	This work

หมายเหตุ n/a. = not available, SLM = supported liquid membrane, LLE = liquid-liquid extraction, HFSLM = hollow fiber supported liquid membrane

## 1.8 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.8.1 เพื่อศึกษาการสกัดและการนำกลับของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.8.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้
- ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัด
  - ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อน
  - ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ
  - ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อน

## 1.9 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.9.1 ศึกษาการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีนชนิดมีรูพรุน Celgard<sup>®</sup> X-30 โดยใช้ปฏิบัติการไหลแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบสวนทางกัน และมีอัตราการไหลเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
- 1.9.2 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ต่อไปนี้ต่อการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม
- ความเข้มข้นของตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนในช่วง 0.01-1 โมลต่อลิตร
  - ชนิดของสารสกัด ได้แก่ Aliquat 336 และ TBP ในตัวทำละลายเคโรซีน
  - ความเข้มข้นของสารสกัดที่เลือก ในช่วง 0.25-4% โดยปริมาตร
  - ชนิดของสารละลายนำกลับ ได้แก่
    - สารละลายโซเดียมเปอร์คลอเรต ( $\text{NaClO}_4$ )
    - สารละลายไทโอยูเรีย ( $\text{NH}_2\text{CSNH}_2$ )
    - กรดไฮโดรคลอริก
  - ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เลือก ในช่วง 0.1-0.4 โมลต่อลิตร
  - ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนในช่วง 10-90 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 1.9.3 ศึกษาแบบจำลองการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมที่แสดงผลในค่าความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัม และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัดที่เลือก ในช่วง 0.25-4% โดยปริมาตร

## 1.10 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ

1.10.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยวิธีการต่างๆ และวิธีการสกัดไอออนโลหะด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.10.2 หาชนิดของสารสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

1.10.3 หาความเข้มข้นของตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสมต่อการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.10.4 หาความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีนที่เหมาะสมต่อการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.10.5 หาชนิดของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมต่อการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.10.6 หาความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมต่อการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.10.7 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนต่อการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.10.8 ศึกษาแบบจำลองการถ่ายเทมวลของ ไอออนแทนทาลัมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.10.9 ประยุกต์แบบจำลองการถ่ายเทมวลของ ไอออนแทนทาลัมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.10.10 วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และเขียนบทความทางวิชาการ

## 1.11 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.11.1 องค์ความรู้ในการสกัด ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.11.2 เป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานของการดำเนินงานวิจัยด้านการสกัด ไอออน โลหะ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ต่อไป



**1.11.3** ก่อให้เกิดผลงานทางวิชาการและสามารถเผยแพร่ต่อสาธารณะในรูปแบบ การตีพิมพ์หรือการเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทั้งในระดับชาติและระดับ นานาชาติได้อย่างน้อย 1 ผลงาน

## บทที่ 2

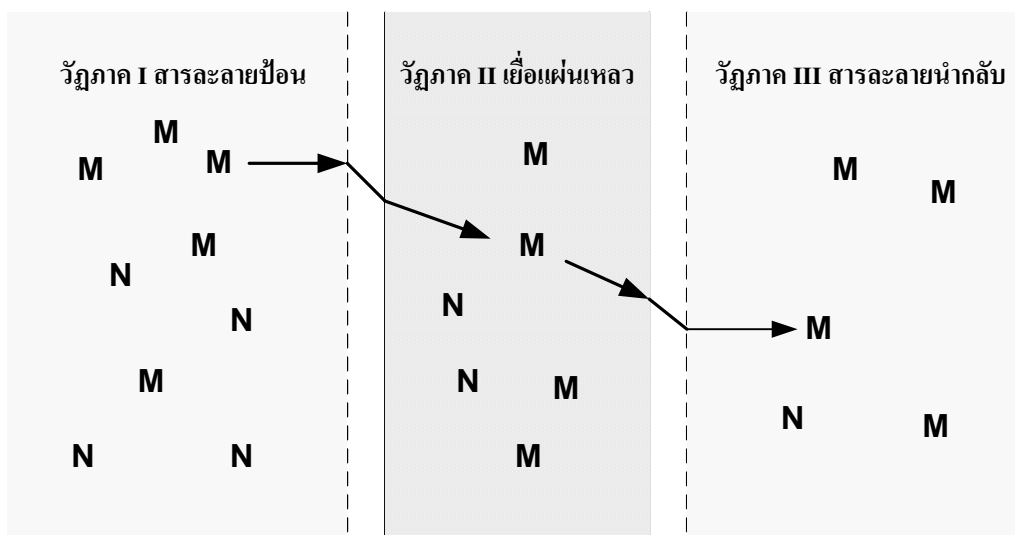
### ทฤษฎี

#### 2.1 กลไกการถ่ายเทมวล

กลไกการถ่ายเทมวลผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ (solution-diffusion) และการถ่ายเทมวลแบบอาศัยตัวพา (facilitated transport) [32] ดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ (solution-diffusion)

คือ การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยก (M) จากวัสดุภาคสารละลายป้อนไปสู่ วัสดุภาคสารละลายนำกลับ โดยไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น แต่จะถ่ายเทโดยการแพร่ ไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายป้อนจะถ่ายเทมายังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว และแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ดังรูปที่ 2.1 การถ่ายเทมวลแบบนี้อาศัยความสามารถในการละลายที่แตกต่างกันของไอออนในสารละลายอินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวในระบบ [32]



รูปที่ 2.1 ทิศทางการถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยกในการถ่ายเทมวลโดยการแพร่ [32]

## 2.1.2 การถ่ายเทมวลแบบอาศัยตัวพา (facilitated หรือ carrier mediated transport)

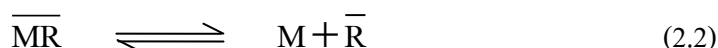
การถ่ายเทมวลแบบอาศัยตัวพาจะเกิดเมื่อ ไอออนที่ต้องการแยกทำปฏิกิริยากับสารสกัด (ตัวพา) ที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็น ไอออนเชิงซ้อนที่เป็นกลาง จากนั้น ไอออนเชิงซ้อนจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านสารละลายนำกลับ และเกิดปฏิกิริยา นำกลับที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว ทำให้ไอออนที่ต้องการแยกออกไป อยู่ในสารละลายนำกลับ ในขณะที่ไอออนเชิงซ้อนจะกลายเป็นสารสกัด แล้วแพร่กลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปที่ด้านสารละลายป้อนอีกครั้งเพื่อรับไอออนที่ต้องการแยกอีก ดังนั้นสารสกัดจะทำหน้าที่ คล้ายกับตัวขนย้ายไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลว การถ่ายเทมวลแบบอาศัยตัวพา แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

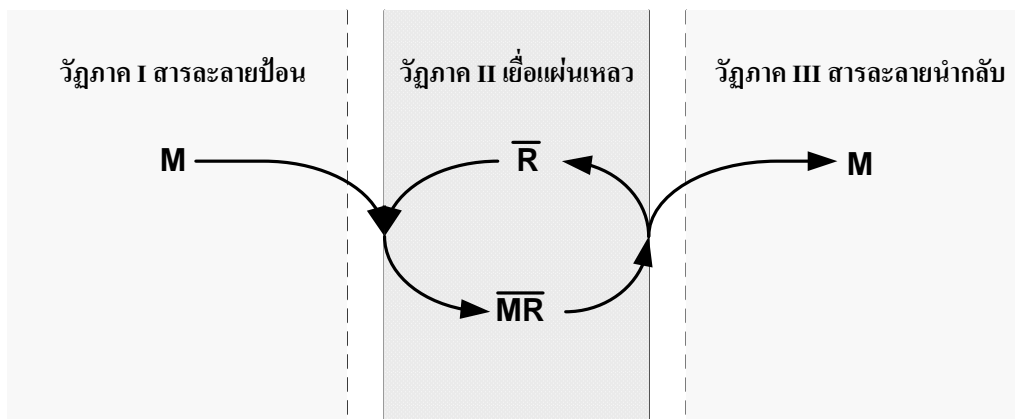
### 2.1.2.1 การถ่ายเทมวลแบบง่าย (simple facilitated transport)

การถ่ายเทมวลแบบง่าย คือ การถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยกเพียงชนิดเดียว ไม่มีการเคลื่อนที่ของไอออนไฮโดรเนียม (co-ion) เกิดร่วมด้วย การเกิดปฏิกิริยาของ ไอออน M ที่อยู่ในสารละลายป้อนกับสารสกัด  $\bar{R}$  ที่อยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็น ไอออนเชิงซ้อน  $\overline{MR}$  อยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ (2.1)



ไอออนเชิงซ้อน ( $\overline{MR}$ ) ที่เกิดขึ้น จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อนไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับโดยอาศัยผลต่างความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อน  $\overline{MR}$  เป็นแรงขับเคลื่อน ที่ผิวสัมผัสนี้  $\overline{MR}$  จะเกิดปฏิกิริยา ย้อนกลับ ทำให้ได้ไอออน M กลับออกมาละลายทางด้านสารละลายนำกลับ ดังสมการที่ (2.2) สำหรับสารสกัด  $\bar{R}$  ซึ่งอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกครั้งเพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกที่อยู่ในสารละลายป้อนอีก ดังรูปที่ 2.2





รูปที่ 2.2 ทิศทางการถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยกของการถ่ายเทมวลแบบง่าย

### 2.1.2.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (coupled facilitated transport)

การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว คือ การถ่ายเทมวลของไอออนสองชนิดผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ไอออนที่ต้องการแยกจะถ่ายเทมวลจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ แรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลคือผลต่างของความเข้มข้นของไอออนอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ใช่ไอออนที่ต้องการแยก ดังนั้นจึงสามารถแยกไอออนที่ต้องการได้ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกทางด้านสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อนก็ตาม สารสกัดที่ละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวซึ่งคั่นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนที่เป็นกลาง ไอออนเชิงซ้อนนี้จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว และเกิดปฏิกิริยานำกลับได้ไอออนที่ต้องการแยกออกไปละลายอยู่ในสารละลายนำกลับ ในขณะที่ไอออนเชิงซ้อนจะกลายเป็นสารสกัดดั้งเดิม แล้วแพร่กลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวมายังด้านสารละลายป้อนเพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกอีก

การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การถ่ายเทแบบสวนทางกัน (coupled facilitated counter-transport) และการถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (coupled facilitated co-transport)

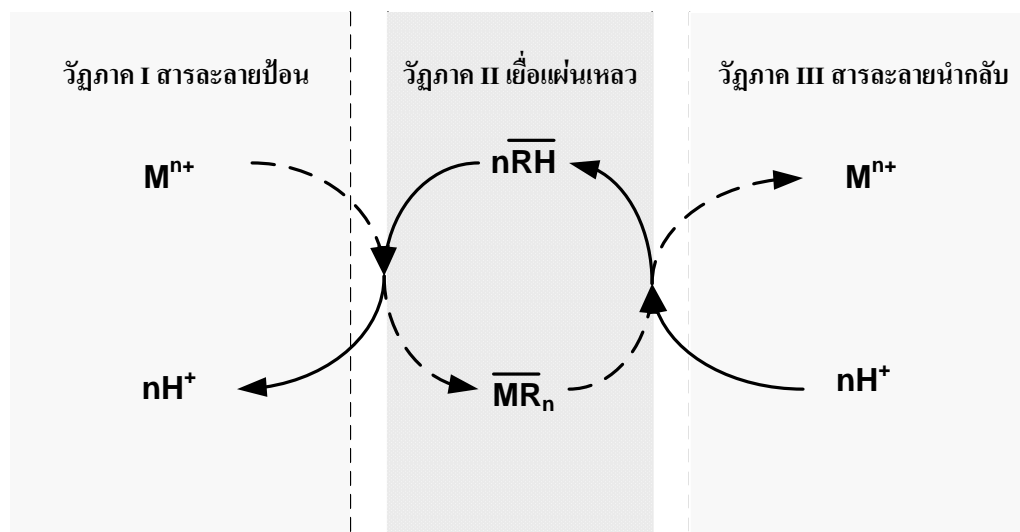
### ก. การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบสวนทาง

#### (coupled facilitated counter-transport)

การถ่ายเทที่ไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเนียมเคลื่อนที่สวนทางกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว ไอออน  $M^{n+}$  ที่อยู่ในสารละลายป้อนจะเกิดปฏิกิริยากับสารสกัด  $\overline{RH}$  ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน  $\overline{MR}_n$  อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และไอออนไฮโดรเนียม ( $H^+$ ) อยู่ในสารละลายป้อน ดังสมการที่ (2.3)



ไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่ง คือ ด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้ไอออนเชิงซ้อน ( $\overline{MR}_n$ ) จะทำปฏิกิริยานำกลับกับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออน  $M^{n+}$  ออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังสมการที่ (2.4) และได้สารสกัด ( $\overline{RH}$ ) กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนเพื่อไปทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกที่อยู่ในสารละลายป้อนอีก วนในลักษณะเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.3

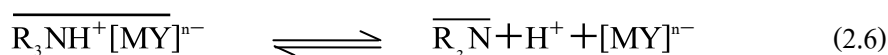
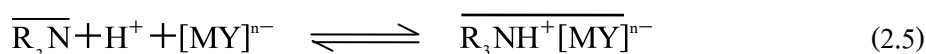


รูปที่ 2.3 ทิศทางการถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเนียมของการถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบสวนทาง

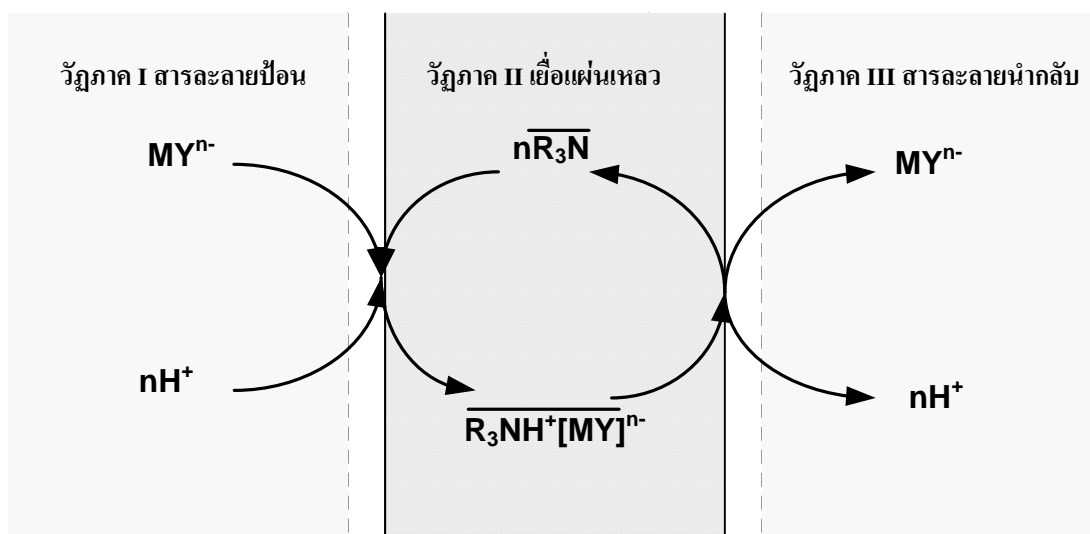
### ข. การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบไปทางเดียวกัน

#### (coupled facilitated co-transport)

การถ่ายเทชนิดไปทางเดียวกันนี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่เป็นเบส ไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเนียม ( $H^+$ ) จะเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว การเกิดปฏิกิริยาของไอออนที่อยู่ในรูปประจุลบ  $[MY]^{n-}$  และไอออนไฮโดรเนียม  $H^+$  ที่อยู่ในสารละลายป้อน กับสารสกัด  $\overline{R_3N}$  ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน  $\overline{R_3NH^+[MY]^{n-}}$  อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ (2.5)



ไอออนเชิงซ้อน  $\overline{R_3NH^+[MY]^{n-}}$  ที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่าง ความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อนเป็นแรงขับ ไปยังอีกด้านหนึ่ง คือ ด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้ ไอออนเชิงซ้อน  $\overline{R_3NH^+[MY]^{n-}}$  จะทำปฏิกิริยานำกลับ เกิดเป็นไอออน  $MY^{n-}$  และไอออนไฮโดรเนียม  $H^+$  ออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังสมการที่ (2.6) และได้สารสกัด  $\overline{R_3N}$  กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อน เพื่อไปทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกที่อยู่ในสารละลายป้อนอีก วนในลักษณะเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ทิศทางการถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเนียมของการถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบทางเดียวกัน

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน [33]

1. การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
2. การเกิดปฏิกิริยาของไอออนที่ต้องการแยกกับสารสกัดเกิดเป็น ไอออนเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
3. การแพร่ของไอออนเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ
4. การเกิดปฏิกิริยาการนำกลับของไอออนเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนที่ต้องการแยกและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ
5. การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ

## 2.2 ทฤษฎีการคำนวณค่าคงที่การถ่ายเทมวลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 2.2.1 การคำนวณร้อยละการสกัด (percentage of extraction, % E) และร้อยละการนำกลับ (percentage of stripping, % S)

$$\% \text{ Extraction} = \frac{C_{f, in} - C_{f, out}}{C_{f, in}} \times 100 \quad (2.7)$$

$$\% \text{ Stripping} = \frac{C_{s, out}}{C_{f, in}} \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ

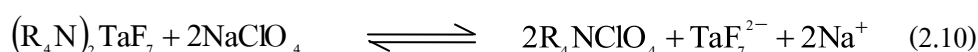
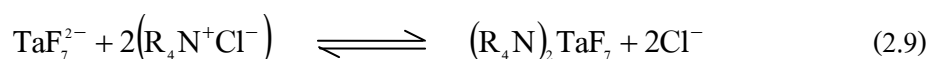
$C_{f, in}$  = ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{f, out}$  = ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{s, out}$  = ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

### 2.2.2 การคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัด (extraction equilibrium constant, $K_{ex}$ ) ไอออนแทนทาลัม

การสกัดไอออนแทนทาลัมผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยางค์ด้วยเส้นใยกลวง ไอออนแทนทาลัมจะละลายอยู่ในตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และใช้ Aliquat 336 ในตัวทำละลายอินทรีย์ เกลืออินทรีย์เป็นสารสกัดละลาย ปฏิกิริยาการสกัดและปฏิกิริยาการนำกลับแสดงดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ



จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัมสามารถเขียนความสัมพันธ์ค่าคงที่สมดุลได้ดังสมการที่ (2.11)

$$K_{ex} = \frac{[(\text{R}_4\text{N})_2\text{TaF}_7][\text{Cl}^-]^2}{[\text{TaF}_7^{2-}][\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]^2} \quad (2.11)$$

### 2.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient, D)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย หรืออัตราส่วนการกระจาย (distribution ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกที่อยู่ในวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกนั้นที่อยู่ในวัฏภาคของสารละลาย ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการสกัดไอออนแทนทาลัมแสดงดังสมการที่ (2.12)

$$D = \frac{[(\text{R}_4\text{N})_2\text{TaF}_7]}{[\text{TaF}_7^{2-}]} = \frac{K_{ex}[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]^2}{[\text{Cl}^-]^2} \quad (2.12)$$



### 2.2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient, P)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้  
พิจารณาจาก mass balance ดังสมการที่ (2.13) ภายใต้สมมติฐาน ปฏิกริยาการนำกลับเกิดขึ้นเร็วมาก  
[34]

$$Q_f([Ta]_{f,in} - [Ta]_{f,out}) = Q_s[Ta]_{s,out} \quad (2.13)$$

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ดังสมการที่ (2.14) [35]

$$P = \frac{Q_s[Ta]_{s,out}}{A_m[Ta]_{f,m}} \quad (2.14)$$

คำนวณค่า  $[Ta]_{f,m}$  ได้ตามสมการที่ (2.15)

$$[Ta]_{f,m} = \frac{([Ta]_{f,in} - [Ta]_{f,out})}{\ln([Ta]_{f,in} - [Ta]_{f,out})} \quad (2.15)$$

แทนสมการที่ (2.13) และ (2.15) ในสมการที่ (2.14) จะได้สมการสุดท้ายสำหรับการ  
คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน แสดงดังสมการที่ (2.16)

$$P = \frac{Q_f \ln([Ta]_{f,in} - [Ta]_{f,out})}{A_m} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$P$	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
$Q_f$	=	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
$Q_s$	=	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
$[Ta]_{f,in}$	=	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$[Ta]_{f,out}$	=	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$[Ta]_{s,out}$	=	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$A$	=	พื้นที่การถ่ายเทมวล (ตารางเซนติเมตร)

### 2.2.5 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient, $D^*$ )

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถคำนวณได้จากสมการของ Wilke-Chang แสดงดังสมการที่ (2.15) [36]

$$D^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta \times V_A^{0.6}} \quad (2.17)$$

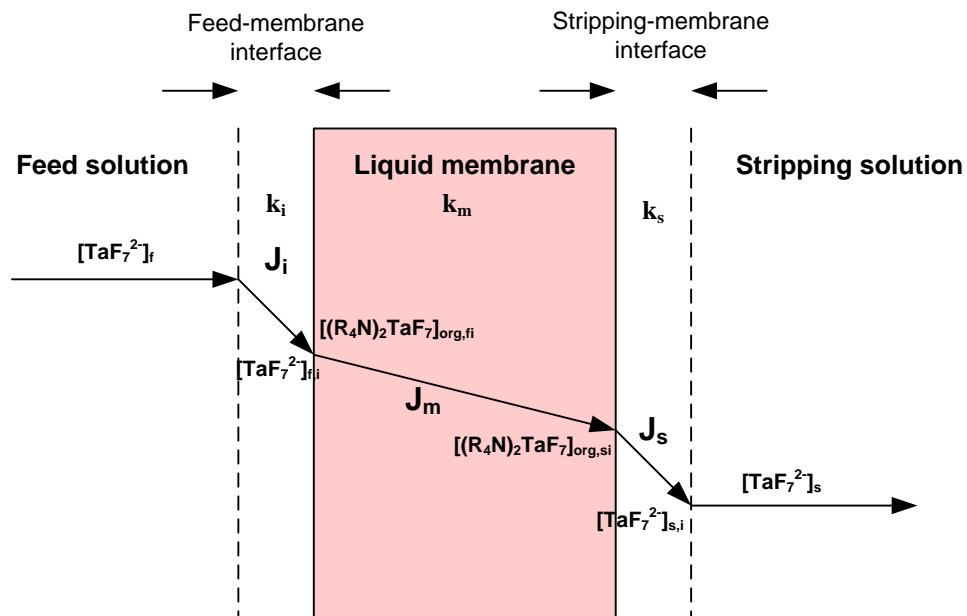
เมื่อ

$D^*$	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
$M$	=	น้ำหนักโมเลกุลของตัวทำละลาย (-)
$\eta$	=	ความหนืดของตัวทำละลาย (cP)
$T$	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (เคลวิน)
$V_A$	=	ปริมาตรเชิงโมลาร์ของตัวถูกละลาย (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)

### 2.2.6 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย 3 ส่วน [34] ดังนี้ และแสดงดังรูปที่ 2.5 ได้แก่

1. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกถ่ายเทมวลผ่านชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว ( $k_p$ )
2. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของไอออนที่ต้องการแยกที่ทำปฏิกิริยากับสารสกัด ถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากด้านผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวมายังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ( $k_m$ )
3. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกที่ถูกนำกลับถ่ายเทมวลผ่านชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว ( $k_s$ )



รูปที่ 2.5 การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว

เมื่อ

- $[TaF_7^{2-}]_f$  = ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน (โมลต่อลิตร)
- $[(R_4N)_2 TaF_7]_{org,fi}$  = ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว (โมลต่อลิตร)
- $[(R_4N)_2 TaF_7]_{org,si}$  = ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ (โมลต่อลิตร)
- $[TaF_7^{2-}]_s$  = ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายนำกลับ (โมลต่อลิตร)
- $J_i$  = อัตราการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน (โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)
- $J_m$  = อัตราการถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)
- $J_s$  = อัตราการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายนำกลับ (โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)

- $k_i$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัม  
ในสารละลายป้อน (เช่นติเมตรต่อวินาที)
- $k_m$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัม  
ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว(เช่นติเมตรต่อวินาที)
- $k_s$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมใน  
สารละลายนำกลับ (เช่นติเมตรต่อวินาที)

ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน ( $k_i$ )  
ได้จากความสัมพันธ์ของ Sherwood-Graetz [37] แสดงดังสมการที่ (2.18-2.21) โดยที่  $m = 1.62$   
และ  $n = 0.33$  ประมาณ โดย Leveque [38] และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อน  
ของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ได้ดังสมการที่ (2.21) [39]

$$Gz = \frac{d_i^2 v}{LD_{aq}^*} \quad (2.18)$$

$$Sh = mGz^n \quad (2.19)$$

$$Sh = \frac{k_i d_i}{D_{aq}^*} \quad (2.20)$$

$$k_m = \frac{\varepsilon D_m^*}{\tau r_i \ln(r_o/r_i)} \quad (2.21)$$

เมื่อ

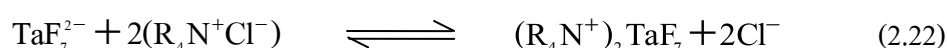
- $Gz$  = Graetz number
- $Sh$  = Sherwood number
- $d_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง (เช่นติเมตร)
- $L$  = ความยาวของเส้นใยกลวง (เช่นติเมตร)
- $v$  = ความเร็วของสารละลายป้อนภายในท่อ (เช่นติเมตรต่อวินาที)
- $D_{aq}^*$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลายป้อน  
(ตารางเช่นติเมตรต่อวินาที)
- $D_m^*$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว  
(ตารางเช่นติเมตรต่อวินาที)
- $\tau$  = ค่า tortuosity ของมอดูล
- $r_o$  = รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เช่นติเมตร)

$$r_i = \text{รัศมีภายในของเส้นใยกลาง (เซนติเมตร)}$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพื่อศึกษาว่าขั้นตอนใดเป็นขั้นกำหนด (limiting-step) ของการถ่ายเทมวล และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายนำกลับ ( $k_c$ ) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายป้อน ( $k_p$ ) อยู่มาก ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวมากกว่าความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับมาก เนื่องจากที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อนจะมีการรวมตัวกันของไอออนโลหะและกรดที่ละลายอยู่ในสารละลายป้อน ในขณะที่ด้านสารละลายนำกลับนั้นมีแต่สารละลายนำกลับเพียงชนิดเดียว จึงไม่เกิดการรวมตัวกันของตัวทำละลายที่จะทำให้เพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มด้านผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว [40-42] ดังนั้นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเพื่อหาขั้นตอนการกำหนดอัตราการถ่ายเทมวลจึงไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายนำกลับ

### 2.3 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและการคำนวณค่าความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลาใดๆ

การคำนวณความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลาใดๆ อาศัยสมการอัตราการถ่ายเทมวลและค่าคงตัวต่างๆ ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้า และแสดงดังต่อไปนี้ โดยเริ่มจากปฏิกิริยาการสกัดของไอออนแทนทาลัม



จากปฏิกิริยาการสกัด สมการที่ (2.22) สามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ (2.23)

$$K_{ex} = \frac{[(\text{R}_4\text{N}^+)_2\text{TaF}_7][\text{Cl}^-]^2}{[\text{TaF}_7^{2-}][\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]^2} \quad (2.23)$$

สัมประสิทธิ์การกระจาย (D)

$$D = \frac{[(\text{R}_4\text{N}^+)_2\text{TaF}_7]}{[\text{TaF}_7^{2-}]} = \frac{K_{ex}[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]^2}{[\text{Cl}^-]^2} \quad (2.24)$$

สมมติให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสมการที่ (2.22) เกิดเร็วมากเมื่อเทียบกับอัตราการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวและเกิดสมดุลที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อน

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.23) สามารถหาค่าความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัม บริเวณผิวสัมผัสได้ดังสมการที่ (2.26)

$$\text{กำหนดให้} \quad [\text{Ta}]_{\text{org}} = [(\text{R}_4\text{N}^+)_2\text{TaF}_7]_{\text{org}} \quad (2.25)$$

$$[\text{Ta}]_{\text{org,f}} = [(\text{R}_4\text{N}^+)_2\text{TaF}_7] = \frac{K_{ex}[(\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-)]^2}{[\text{Cl}^-]^2} [\text{Ta}]_{\text{f,i}} \quad (2.26)$$

( $[\text{TaF}_7^{2-}]$  คือ ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนเท่ากับ  $[\text{Ta}]_{\text{f}}$  และจากรูปที่ 2.5  $[\text{Ta}]_{\text{f}} = [\text{Ta}]_{\text{f,i}}$ )

คำนวณอัตราการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมเนื่องจากการแพร่ผ่านสารละลายเยื่อแผ่นเหลว และอัตราการถ่ายเทมวลผ่านชั้นฟิล์มทางด้านผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยอาศัย Fick's First Law ซึ่งแสดงสมการที่ (2.27) และ (2.28)

$$J_m R_m = [\text{Ta}]_{\text{org,f}} - [\text{Ta}]_{\text{org,s}} \quad (2.27)$$

$$J_i R_i = [\text{Ta}]_{\text{f}} - [\text{Ta}]_{\text{f,i}} \quad (2.28)$$

สมมติฐาน: เนื่องจากผลการทดลองที่นำมาใช้ได้จากเวลาเพียง 50 นาที และความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายนำกลับเริ่มจากศูนย์ในตอนเริ่มต้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมทางด้านสารละลายนำกลับยังมีไม่มากพอและสามารถตัดทิ้งได้ [34] จากสมการที่ (2.27) จะได้ดังสมการที่ (2.29)

$$J_m R_m = [\text{Ta}]_{\text{org,f}} \quad (2.29)$$

แทนสมการที่ (2.26) ลงใน (2.29) จะได้ค่าของ  $[\text{Ta}]_{\text{f,i}}$  ดังสมการที่ (2.30)

$$[\text{Ta}]_{\text{f,i}} = \frac{J_m R_m [\text{Cl}^-]^2}{K_{ex} [\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]^2} \quad (2.30)$$

นำค่า  $[\text{Ta}]_{\text{f,i}}$  แทนในสมการที่ (2.28) และสมมติให้ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว (steady state)  $J_m = J_i = J$  จะได้สมการอัตราการถ่ายเทมวล ดังสมการที่ (2.31)

$$J = \frac{K_{ex} [R_4N^+Cl^-]^2}{R_m [Cl^-]^2 + R_i K_{ex} [R_4N^+Cl^-]^2} \cdot [Ta]_f \quad (2.31)$$

จากสมการการสกัดของไอออนแทนทาลัม สมการที่ (2.22) สามารถเขียนอัตราส่วนความเข้มข้นของสารสกัด  $[R_4N^+Cl^-]$  กับ ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัม ได้ดังสมการที่ (2.32)

$$\frac{[R_4N^+Cl^-]}{[Ta]} = \frac{2}{1} \quad (2.32)$$

จากการพิจารณาสมดุล โมล (mole balance) ของสารสกัด  $[R_4N^+Cl^-]_0$  จะได้ว่า

$$[R_4N^+Cl^-]_0 = [R_4N^+Cl^-]_{free} + 2[Ta]_{org,f} \quad (2.33)$$

เนื่องจาก  $[R_4N^+Cl^-]_0$  มีความเข้มข้นต่ำมาก สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าสารสกัดทุกโมเลกุลทำปฏิกิริยากับไอออนแทนทาลัมหมด ดังนั้นความเข้มข้นของสารสกัดในสมการที่ (2.33) สามารถแทนด้วยความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมได้

$$[R_4N^+Cl^-]_0 \approx 2[Ta]_{org,f} \quad (2.34)$$

แทนสมการที่ (2.34) ลงใน (2.26) จะได้

$$[R_4N^+Cl^-]^2 = \frac{[R_4N^+Cl^-]_0 [Cl^-]^2}{2K_{ex} [Ta]_{f,i}} \quad (2.35)$$

แทนสมการที่ (2.35) ลงใน (2.31) จะได้

$$J = \frac{[R_4N^+Cl^-]_0}{2R_m [Ta]_{f,i} + R_i [R_4N^+Cl^-]_0} \cdot [Ta]_f \quad (2.36)$$

จัดให้อยู่ในรูปของสมการกำลังสองสมบูรณ์

$$2R_m R_i J^2 - (2R_m [Ta]_f + R_i [R_4N^+Cl^-]_0) J + [R_4N^+Cl^-]_0 [Ta]_f = 0 \quad (2.37)$$

$$J = \frac{2R_m[\text{Ta}]_f + R_i[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0 + \sqrt{(2R_m[\text{Ta}]_f + R_i[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0)^2 - 8R_mR_i[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0[\text{Ta}]_f}}{4R_mR_i} \quad (2.38)$$

เนื่องจาก

$$\sqrt{(2R_m[\text{Ta}]_f + R_i[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0)^2 - 8R_mR_i[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0[\text{Ta}]_f} \ll 2R_m[\text{Ta}]_f + R_i[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0$$

ดังนั้นจึงสามารถตัดพจน์นี้ได้ และจากสมการที่ (2.38) จะได้สมการอัตราการถ่ายเทมวล ดังสมการที่ (2.39)

$$J = \frac{[\text{Ta}]_f}{2R_i} + \frac{[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0}{4R_m} \quad (2.39)$$

สมการการหาค่าอัตราการถ่ายเทมวลทางด้านสารละลายป้อนในรูปทั่วไปสามารถหาได้จาก [43]

$$J = \frac{-d[\text{Ta}]_f}{dt} \cdot \frac{V_f}{A} \quad (2.40)$$

รวมสมการที่ (2.39) และ (2.40)

$$\frac{-d[\text{Ta}]_f}{dt} \cdot \frac{V_f}{A} = \frac{[\text{Ta}]_f}{2R_i} + \frac{[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0}{4R_m} \quad (2.41)$$

จากการอินทิเกรตที่เวลา  $t = 0$ ,  $[\text{Ta}]_f = [\text{Ta}]_{f,0}$ , ดังนั้นจะได้สมการสุดท้ายเพื่อทำนายความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลาใดๆ ดังสมการที่ (2.42)

$$[\text{Ta}]_f = \frac{-[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0 R_i}{2R_m} + \left\{ [\text{Ta}]_{f,0} + \frac{[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0 R_i}{2R_m} \right\} \exp\left(\frac{-A}{2R_i V_f} \cdot t\right) \quad (2.42)$$

ความหมายของตัวแปร

$[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]$  = ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 (โมลต่อลิตร)

$[\text{Ta}]$  = ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัม (มิลลิกรัมต่อลิตร)



$[(R_4N^+)_2TaF_7]$	= ไอออนเชิงซ้อนของไอออนแทนทาลัมกับสารสกัด Aliquat 336 (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$K_{ex}$	= ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (-)
$D$	= ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (-)
$J$	= ค่าอัตราการถ่ายเทมวล (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
$R_i$	= ค่าความต้านการถ่ายเทมวลของละลายป้อน (วินาทีต่อเซนติเมตร)
$R_m$	= ค่าความต้านการถ่ายเทมวลของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (วินาทีต่อเซนติเมตร)
$k_i$	= ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน (เซนติเมตรต่อวินาที)
$k_m$	= ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)
$V_f$	= ปริมาตรของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$A$	= พื้นที่การถ่ายเทมวลของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (ตารางเซนติเมตร)
$t$	= เวลา (วินาที)

### บทที่ 3

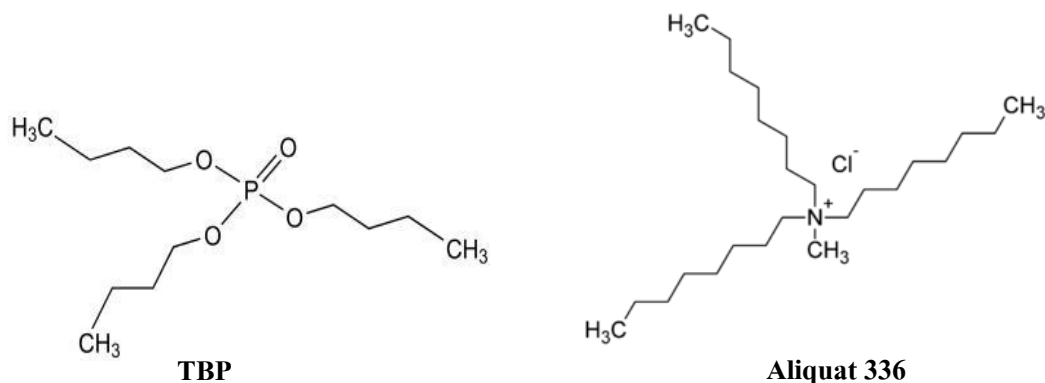
#### สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

เนื้อหาบทนี้จะรายงานสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสารเคมี	สูตรโมเลกุล	บริษัท
สารละลายป้อน	tantalum oxide, niobium oxide	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Aldrich, Germany ACROS, USA
ตัวทำละลายกรด ในสารละลายป้อน	hydrofluoric	HF	RFCL, India
สารสกัด	tri-octylmethylamonium chloride (Aliquat 336)	CH <sub>3</sub> N(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH <sub>3</sub> ] <sub>3</sub> Cl	Sigma-Aldrich, Germany
	tributyl phosphate (TBP)	[CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> ] <sub>3</sub> P	Sigma-Aldrich, Germany
ตัวทำละลาย อินทรีย์	kerosene		Shell, Thailand
สารละลายนำกลับ	thiourea	NH <sub>2</sub> CSNH <sub>2</sub>	RFCL, New Zealand
	sodium perchlorate	NaClO <sub>4</sub>	RCROS,USA
	hydrochloric	HCl	Qrec, New Zealand



รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดที่ใช้ในการทดลอง [44-45]

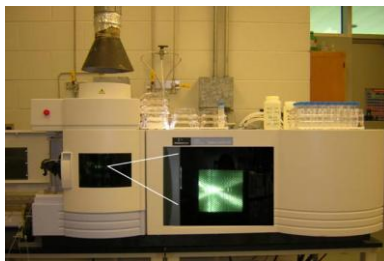
### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ชุดทดลอง Liqui-Cel<sup>®</sup> Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ประกอบด้วย

- เครื่องสูบ 2 ชุด ที่มีอัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที
- มาตรวัดและชุดควบคุมอัตราการไหล 2 ชุด
- มาตรวัดความดัน 2 ชุด

3.2.2 อุปกรณ์เชื่อมต่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ตัวรองรับ ได้แก่ เส้นใยกลวงพอลิโพรพิลีน ชนิดมีรูพรุน Celgard<sup>®</sup> X-30 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นมอดูล ดังแสดงใน และมีสมบัติดังตารางที่ 3.2

3.2.3 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) Perkin Elmer Model PLASMA-1000 ใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม



รูปที่ 3.2 เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) [46]

ตารางที่ 3.2 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลางพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	ชนิด / ขนาด
วัสดุเส้นใยกลาง	พอลิโพรพิลีน (polypropylene)
ความพรุนของเส้นใยกลาง	30%
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลาง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 ตารางเมตร (15.2 ตารางฟุต)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (74.4 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร)
มิติของชุดเส้นใยกลาง (D × L)	2.5 × 8 นิ้ว
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (60 psi)
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1-60 องศาเซลเซียส

### 3.3 วิธีการทดลอง

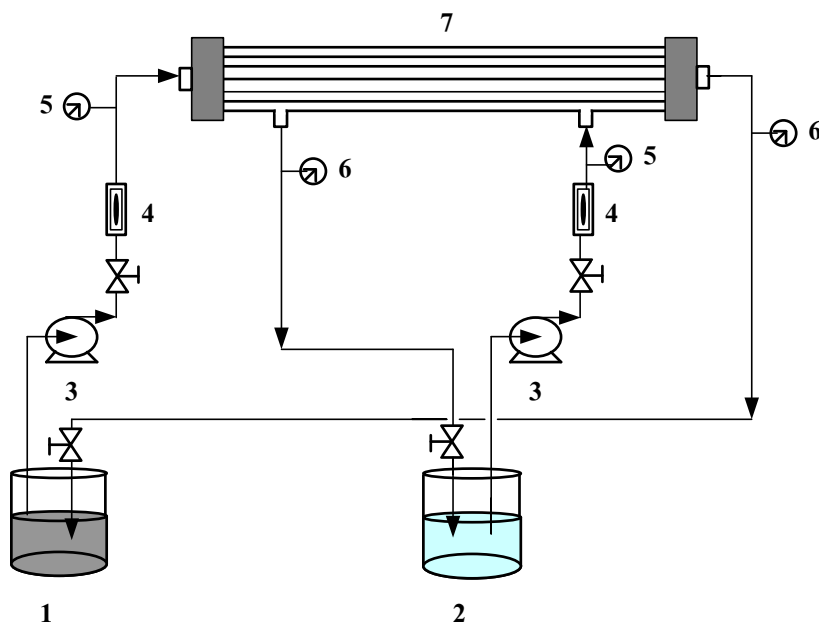
#### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายป้อน

- ผสมแทนทาลัมออกไซด์กับโพแทสเซียมไบซัลเฟต ( $\text{KHSO}_4$ ) ในอัตราส่วน 1:20 โดยน้ำหนัก ใส่ในถ้วยพอร์ซเลน (porcelain) และนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที
- นำถ้วยพอร์ซเลนออกจากเตาเผา ปล่อยให้เย็น และนำไปต้มกับแอมโมเนียมออกซาลेट ( $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  4% โดยน้ำหนัก จนเกลือของแทนทาลัมละลายหมด ได้สารละลายใสของแทนทาลัม แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42
- สารละลายของไนโอเบียม เตรียมจากไนโอเบียมออกไซด์ ทำเช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายของแทนทาลัม

#### 3.3.2 ศึกษาชนิดสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีนที่เหมาะสมด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

- เตรียมสารละลายอินทรีย์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดในเคโรซีน สารสกัดที่ศึกษา ได้แก่ Aliquat 336 และ TBP ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร

2. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 50 มิลลิลิตร คือ สารละลายผสมของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม ความเข้มข้นเท่ากัน คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในตัวทำละลายกรดกรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร นำสารละลายป้อนที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเครื่อง ICP-AES
3. เตรียมสารละลายนำกลับไทโอยูเรีย ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
4. ผสมสารละลายป้อน 50 มิลลิลิตร กับสารละลายอินทรีย์ 50 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ปล่อยให้แยกชั้น แล้วจึงเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่สกัดได้ด้วยเครื่อง ICP-AES และแยกชั้นของสารละลายอินทรีย์ที่ได้มาผสมกับสารละลายนำกลับไทโอยูเรีย ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้แยกชั้น แล้วเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่นำกลับได้ด้วยเครื่อง ICP-AES



รูปที่ 3.3 การปฏิบัติการแบบกะแบบไหลสวนทาง 1) ถังของสารละลายป้อน 2) ถังของสารละลายนำกลับ 3) ปั๊ม 4) มาตรวัดอัตราการไหล และ 5) มาตรวัดความดันขาเข้า 6) มาตรวัดความดันขาออก 7) ตัวรองรับชุดเส้นใยกลวง

### 3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวปริมาตร 500 มิลลิลิตร สำหรับใช้ในมอดูลเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัดที่เหมาะสมจาก 3.3.2 ในเคโรซีน ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร แล้วป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้ามอดูลเส้นใยกลวง 40 นาทีเพื่อยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคเส้นใยกลวง
2. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตร คือ สารละลายผสมของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมความเข้มข้นเท่ากัน คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับไทโอยูเรีย ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวงพร้อมกัน โดยใช้ปฏิบัติการไหลแบบกะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบสวนทางกัน และมีอัตราการไหลเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.3
5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 50 นาที ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่สกัดและนำกลับได้ด้วยเครื่อง ICP-AES
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ(1)-(5)โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนเป็น 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1 โมลต่อลิตร ตามลำดับเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมได้สูงสุดสำหรับใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

### 3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.3 โดยใช้สารสกัดที่เหมาะสมจาก 3.3.2 ที่ความเข้มข้น 0.25% โดยปริมาตร
2. เตรียมสารละลายป้อน คือ สารละลายผสมของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมความเข้มข้นเท่ากัน คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมจาก 3.3.3 และทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.3

3. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกทุก 5 นาที จนครบ 50 นาที วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่สกัดและนำกลับได้ ด้วยเครื่อง ICP-AES
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1)-(3) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด เป็น 0.5, 1, 2, 3, และ 4% โดยปริมาตร วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่สกัดและนำกลับได้ ด้วยเครื่อง ICP-AES เพื่อหาความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมได้ สูงสุดสำหรับใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

### 3.3.5 ศึกษาผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.4 ใช้สารสกัดที่เหมาะสมจาก 3.3.2 ความเข้มข้นของสารสกัดจาก 3.3.4
2. เตรียมสารละลายนำกลับไทโอยูเรีย ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
3. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 50 นาที วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่สกัดและนำกลับได้ ด้วยเครื่อง ICP-AES
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1)-(3) เปลี่ยนชนิดของสารละลายนำกลับเป็นโซเดียมเปอร์คลอเรต และกรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ เพื่อหาชนิดของสารละลายนำกลับที่เหมาะสม

### 3.3.6 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.5 ใช้สารละลายนำกลับที่เหมาะสมจาก 3.3.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร
2. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 50 นาที วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่สกัดและนำกลับได้ ด้วยเครื่อง ICP-AES
3. เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเป็น 0.2, 0.3 และ 0.4 โมลต่อลิตร
4. วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่สกัดและนำกลับได้ ด้วยเครื่อง ICP-AES เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสม

### 3.3.7 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลาย ป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่ พยุงด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.5 ใช้ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสม จาก 3.3.6
2. เตรียมสารละลายป้อน คือ สารละลายผสมของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม ความเข้มข้นเท่ากัน คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ ความเข้มข้นที่เหมาะสมจาก 3.3.3
3. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 50 นาที ไป วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่สกัดและนำกลับได้ ด้วยเครื่อง ICP-AES
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1)-(3) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัม และไนโอเบียมเป็น 30, 50, 70 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

### 3.4 ขั้นตอนการทำความสะอาดชุดทดลองเส้นใยกลวง

หลังจากทำการทดลองทุกครั้งจำเป็นต้องทำความสะอาดตัวรองรับเส้นใยกลวง เนื่องจากอาจมี สารเคมีหรือสิ่งสกปรกต่างๆ เข้าไปอุดตันภายในรูพรุนเส้นใยกลวง และขวางกั้นการไหลของ สารละลาย ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง การล้างทำความสะอาดเส้นใยกลวงจึงมี ความสำคัญอย่างมากต่อการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง ขั้นตอนมีดังนี้

1. ให้น้ำกลั่นไหลผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงประมาณ 10-15 นาที
2. ใช้สารละลายน้ำยาล้างจานไหลวนในมอดูลของเส้นใยกลวงประมาณ 15-20 นาที เพื่อล้าง สารละลายอินทรีย์ออกจากรูพรุนของเส้นใยกลวง
3. เลือกใช้สารละลายที่สามารถละลายสารที่อุดตันในรูพรุนของเส้นใยกลวงได้ให้ไหลวนใน มอดูลเส้นใยกลวงเป็นเวลา 15-30 นาที ในที่นี้เลือกใช้กรดฟอสฟอริกผสมกับกรดไนตริก ในสัดส่วนโดยปริมาตร 2:3
4. ให้น้ำกลั่นไหลผ่านในมอดูลเส้นใยกลวง ประมาณ 10-15 นาที



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

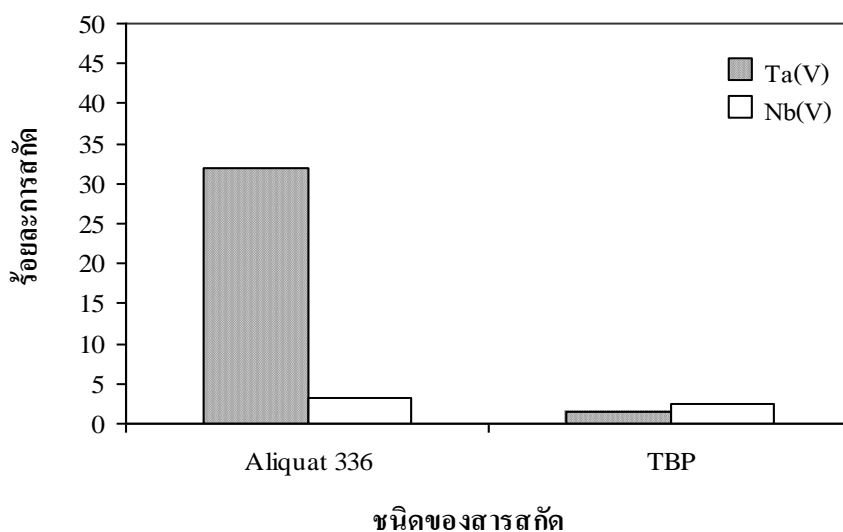
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ต่อการสกัดและนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อน ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมพิจารณาจากค่าร้อยละการสกัด (percentage of extraction, % E) และร้อยละการนำกลับ (percentage of stripping, % S) ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) ในบทที่ 2

กระบวนการถ่ายเทมวลของการสกัดและนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวเป็นแบบควบคู่ (coupled transport) ชนิดการถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (counter-transport) ปฏิกิริยาการของสกัดการนำกลับไอออนแทนทาลัมแสดงดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ  $R_4N^+Cl^-$  ในสมการแทนสารสกัด Aliquat 336

#### 4.1 ผลการทดลอง

##### 4.1.1 ผลของชนิดของสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

การศึกษาผลของสารสกัด Aliquat 336 และ TBP ต่อร้อยละการสกัด กำหนดปัจจัยอื่นคงที่ ดังนี้ ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนมีค่าเท่ากันเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิดเท่ากับ 1% โดยปริมาตร ใช้สารละลายไทโอยูเรีย ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ ระยะเวลาในการปั่นกวาน 30 นาที แสดงผลดังรูปที่ 4.1 พบว่าสารสกัด Aliquat 336 ซึ่งเป็นสารสกัดชนิดเบส สามารถสกัดและคัดเลือกไอออนแทนทาลัมได้ดีกว่าสารสกัด TBP ซึ่งเป็นสารสกัดชนิดกลาง เนื่องจากในตัวกลางกรดไฮโดรฟลูออริก ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมจะเกิดไอออนเชิงซ้อนฟลูออโร-แทนทาลัม และฟลูออโร-ไนโอเบียมที่มีประจุเป็นลบในรูปของ  $[TaF_7]^{2-}$  และ  $[NbOF_n]^{3-n}$  หรือ  $[Nb(OH)_2F_n]^{3-n}$  เมื่อ  $n = 2-6$  (อธิบายในหัวข้อ 4.1.2)

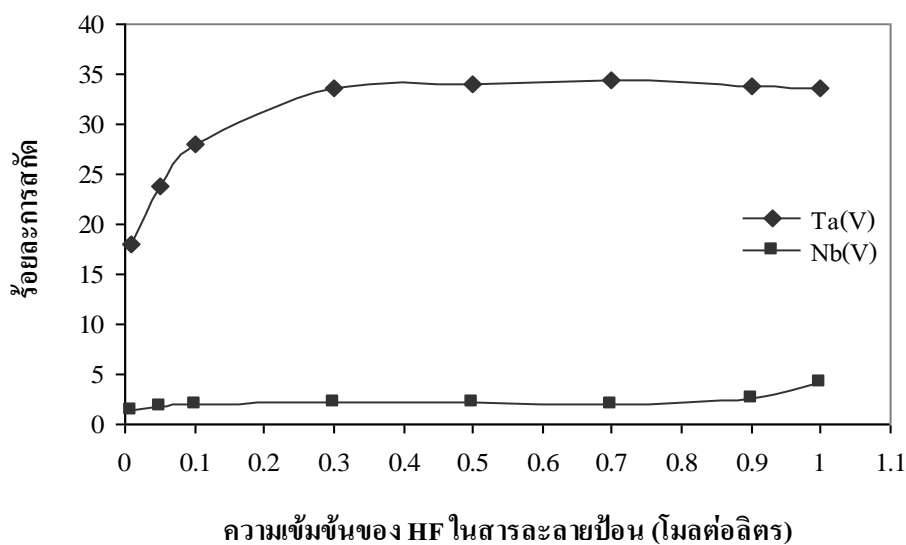


**รูปที่ 4.1** ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารสกัดกับร้อยละของการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด = 1% โดยปริมาตร  $[HF]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร อัตราเร็วการปั่นกววน 100 รอบต่อนาที

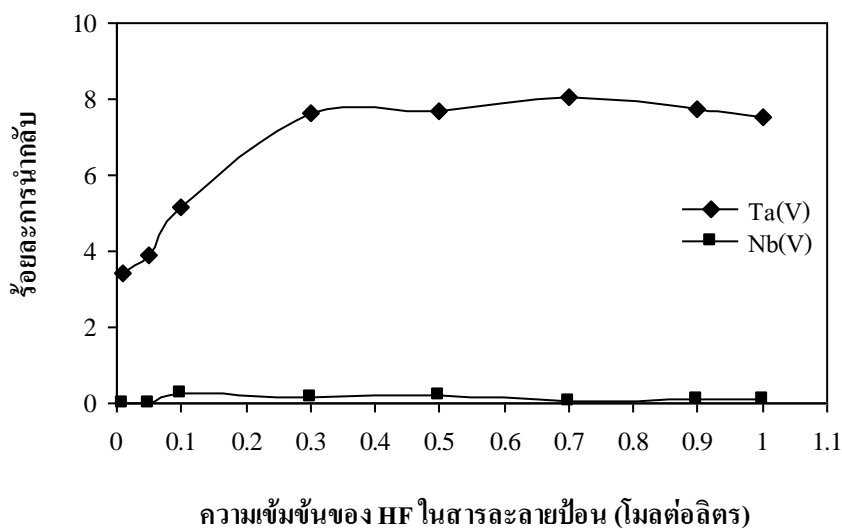
#### 4.1.2 ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1 โมลต่อลิตร ในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ปัจจัยที่คงที่ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 1% โดยปริมาตร ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้สารละลายไทโอยูเรีย ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ ปฏิบัติการไหลแบบกะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบสวนทางกัน สารละลายป้อนไหลในด้านฝั่งท่อและสารละลายนำกลับไหลในด้านฝั่งเปลือก และมีอัตราการไหลเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อน ค่าร้อยละของการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมมีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกเท่ากับ 0.3 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นเกือบจะคงที่ตลอดช่วงความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกที่ทำการศึกษา ในขณะที่ร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนไนโอเบียม น้อยมาก สามารถอธิบายได้ว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกมีผลต่อการเกิดไอออนเชิงซ้อนประจุลบของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่แตกต่างกัน ไอออนเชิงซ้อนของ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนกับร้อยละของการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อ  $[\text{Aliquat 336}]_m = 1\%$  โดยปริมาตร  $[\text{Thiourea}]_s = 0.1$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนกับร้อยละของการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อ  $[\text{Aliquat 336}]_m = 1\%$  โดยปริมาตร  $[\text{Thiourea}]_s = 0.1$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

ฟลูออโร-แทนทาลัมจะเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนประจุลบในรูปของ  $[\text{TaF}_7]^{2-}$  ที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกต่ำๆ และมีความเสถียรมากกว่าไอออนเชิงซ้อนของฟลูออโร-ไนโอเบียม [47-48] ซึ่งเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนประจุลบในรูปของ  $[\text{NbOF}_n]^{3-n}$  หรือ  $[\text{Nb}(\text{OH})_2\text{F}_n]^{3-n}$  โดยที่  $n = 2-6$  เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกมีค่าสูงกว่า 10 โมลต่อลิตร [48] ดังนั้นที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกเท่ากับ 0.3 โมลต่อลิตร จึงเป็นค่าที่เหมาะสมซึ่งให้สามารถสกัดคัดเลือกไอออนแทนทาลัมออกจากไอออนไนโอเบียมได้ดีที่สุด

#### 4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในตัวทำละลายเคโรซีนต่อการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม ทดลองที่ 0.25, 0.5, 1, 2, 3, และ 4% โดยปริมาตร ทุกการทดลองให้ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนมีค่าเท่ากันเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.3 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับไทโอยูเรียเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร ปฏิบัติการไหลแบบกะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบสวนทางกัน และมีอัตราการไหลเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ให้สารละลายป้อนไหลทางด้านฝั่งท่อ สารละลายนำกลับไหลทางด้านฝั่งเปลือก ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าสารสกัด Aliquat 336 สามารถคัดเลือกสกัดและนำกลับไอออนแทนทาลัมได้สูงกว่าไอออนไนโอเบียม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในมอดูลของเส้นใยกลวงจาก 0.25-3% โดยปริมาตร พบว่าร้อยละการสกัดและการนำกลับคัดเลือกไอออนแทนทาลัมเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ที่เหมาะสมเท่ากับ 3% โดยปริมาตร สามารถสกัดไอออนแทนทาลัมได้ร้อยละ 78 หลังจากนั้นร้อยละการสกัดจะลดลง ซึ่งอธิบายได้โดยทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้น จะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น ดังสมการที่ (2.9) ไอออนเชิงซ้อน  $(\text{R}_4\text{N}^+)_2\text{TaF}_7$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอออนแทนทาลัมกับสารสกัดจึงมากขึ้นแสดงว่าไอออนแทนทาลัมถูกสกัดมากขึ้นและการนำกลับของไอออนแทนทาลัมจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน [29] การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดมากเกินไป ทำให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นส่วนกลับกับค่าความหนืด ดังสมการของ Stokes-Einstein สมการที่ (4.1) ดังนั้นเมื่อความหนืดสูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวสูงขึ้น และขัดขวางการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมผ่านสารละลายเยื่อแผ่นเหลว หรืออาจกล่าวได้ว่าส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเยื่อแผ่นเหลวลดลง ดังนั้นค่าร้อยละของการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมจึงลดลง [24]

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} \quad (4.1)$$

เมื่อ

$D$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตรต่อวินาที)

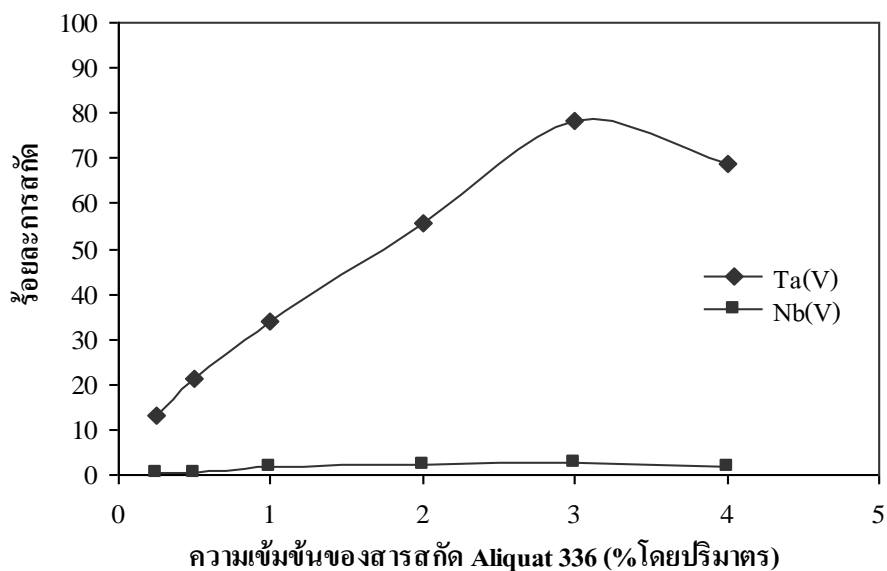
$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (เคลวิน)

$\eta$  = ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

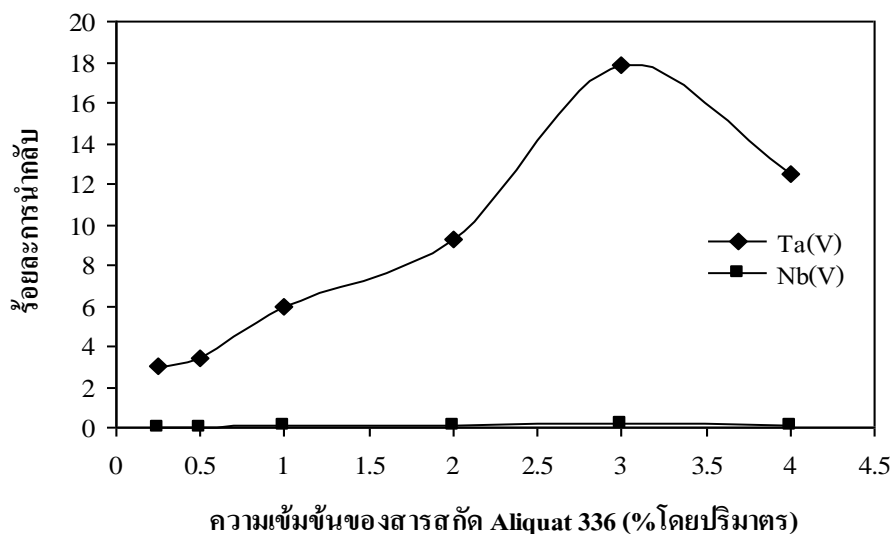
$r$  = รัศมีโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน (เมตร)

$k_B$  = ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ  $1.3807 \times 10^{23}$  (จูลต่อเคลวิน)

$\pi$  = ค่าคงที่ในสมการของ Stokes และ Einstein มีค่า 3.1416



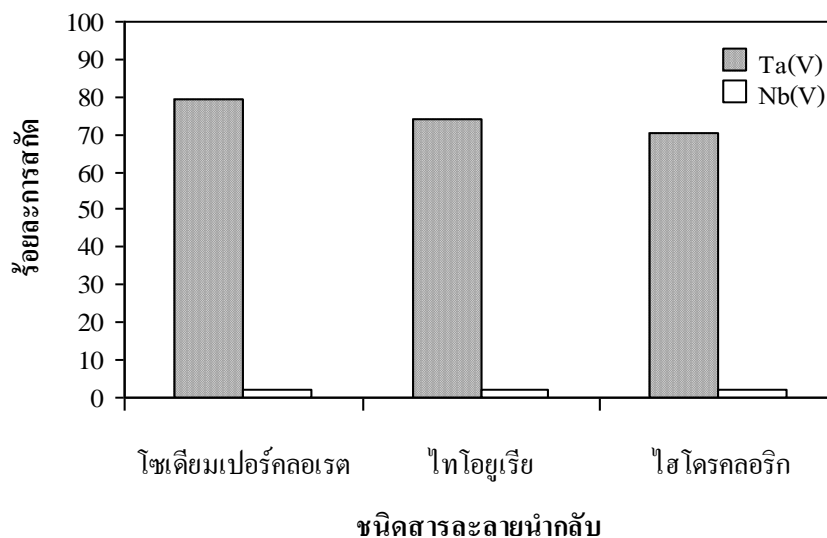
**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวกับร้อยละของการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อ  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร  $[Thiourea]_s = 0.1$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



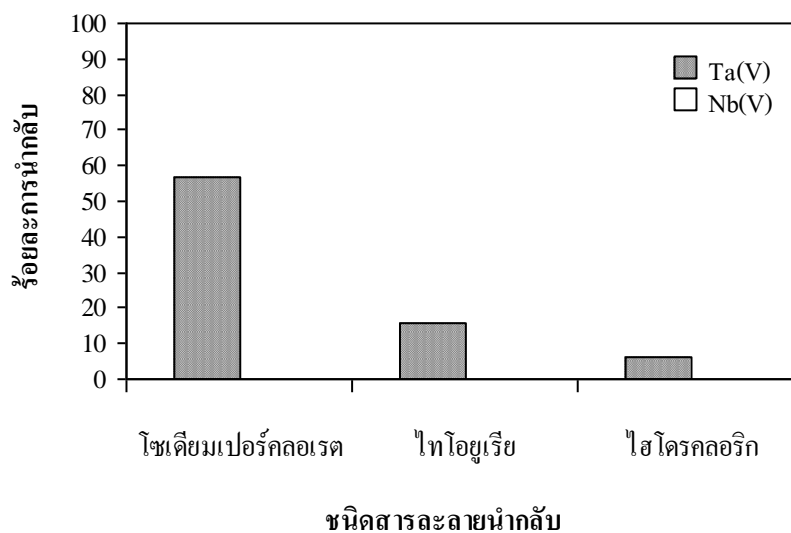
**รูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวกับร้อยละของการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อ  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร  $[Thiourea]_s = 0.1$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4.1.4 ผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาชนิดของสารละลายนำกลับที่ให้ค่าร้อยละการนำกลับไอออนแทนทาลัมสูงที่สุด กำหนดปัจจัยอื่นคงที่ ใช้สารสกัด Aliquat 336 ที่ความเข้มข้น 3% โดยปริมาตร และเปลี่ยนชนิดของสารละลายนำกลับเป็นไทโอยูเรีย ( $NH_2CSNH_2$ ) กรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมเปอร์คลอเรต ( $NaClO_4$ ) ได้แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 สามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพของสารละลายนำกลับได้ดังนี้ โซเดียมเปอร์คลอเรต > ไทโอยูเรีย > ไฮโดรคลอริก เนื่องจากไอออนเปอร์คลอเรตมีขนาดใหญ่ [36] จึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนเชิงซ้อนระหว่างไอออนแทนทาลัมกับสารสกัด Aliquat 336 ได้ดีที่สุด และเนื่องจากสารสกัด Aliquat 336 เป็นสารสกัดชนิดเบสประเภท quaternary amine เมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนแทนทาลัมแล้ว ไอออนเชิงซ้อนที่เกิดจึงค่อนข้างเสถียร จึงจำเป็นต้องใช้ไอออนที่มีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาแทนที่ ไอออนแทนทาลัมออกจากสารสกัด [25] นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีกรด-เบสของ ลิวอิส (hard and soft acid/base theory) กล่าวคือ ส่วนของประจุบวกของสารสกัด Aliquat 336 ( $R_4N^+$ ) มีความเป็นกรดอ่อน ในขณะที่  $Cl^-$  มีความเป็นเบสแก่  $ClO_4^-$  มีความเป็นเบสอ่อน และ  $NH_2CSNH_2$  มีความเป็นเบสที่อ่อนมาก ดังนั้น  $ClO_4^-$  จึงทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารสกัด Aliquat 336 ( $R_4N^+$ ) และเกิดปฏิกิริยากับไอออนแทนทาลัมได้ดีที่สุด



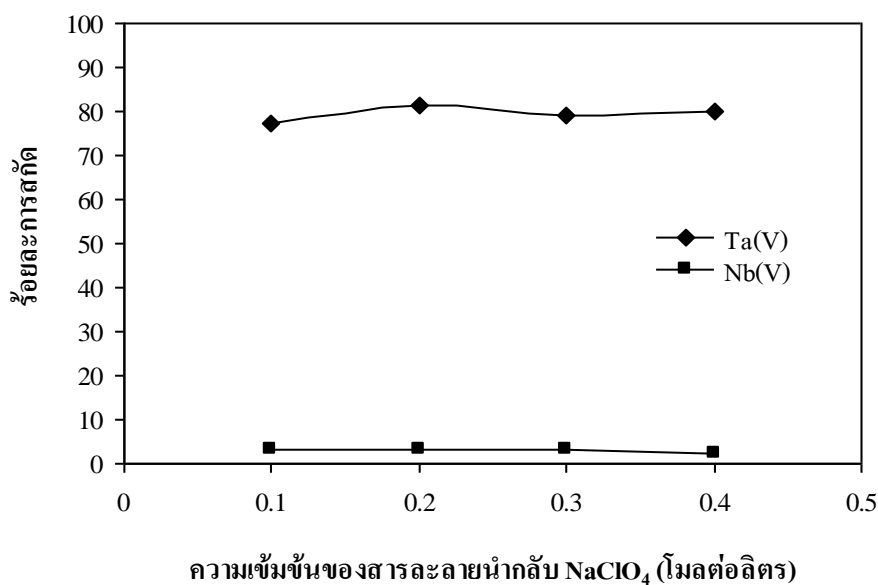
**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารละลายนำกลับกับร้อยละของการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร  $[Aliquat\ 336]_m = 3\%$  โดยปริมาตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



**รูปที่ 4.7** ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารละลายนำกลับกับร้อยละของการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร  $[Aliquat\ 336]_m = 3\%$  โดยปริมาตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

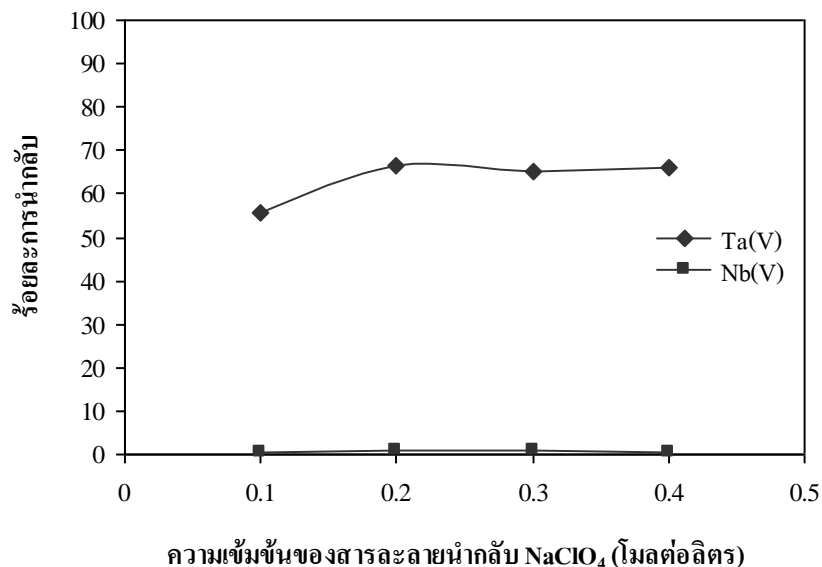
#### 4.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

จากผลใน 4.1.4 สารละลายนำกลับที่เหมาะสมในการสกัดไอออนแทนทาลัมคือ โซเดียมเปอร์คลอเรต การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมเปอร์คลอเรตกำหนดให้ทุกปัจจัยคงที่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเปอร์คลอเรต 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โมลต่อลิตร ผลแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ได้ร้อยละการนำกลับไอออนแทนทาลัมประมาณ 67 ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเปอร์คลอเรต 0.2 โมลต่อลิตร และเมื่อความเข้มข้นสูงกว่า 0.2 โมลต่อลิตร ค่าร้อยละการนำกลับไอออนแทนทาลัมคงที่เนื่องจากพื้นที่การถ่ายเทมวลของมอดูลเส้นใยกลวงคงที่ จึงมีอัตราการถ่ายเทมวลที่จำกัด ดังนั้นถ้าต้องการเพิ่มการนำกลับอาจทำได้โดยเพิ่มจำนวนรอบการสกัด หรือเพิ่มจำนวนมอดูลเส้นใยกลวง เป็นต้น



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมเปอร์คลอเรตกับร้อยละของการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อ  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร  $[Aliquat\ 336]_m = 3\%$  โดยปริมาตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

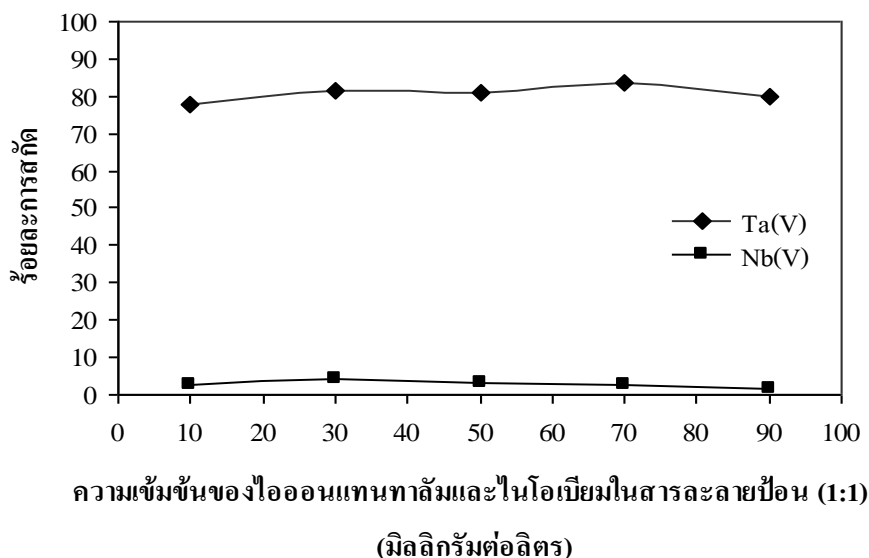




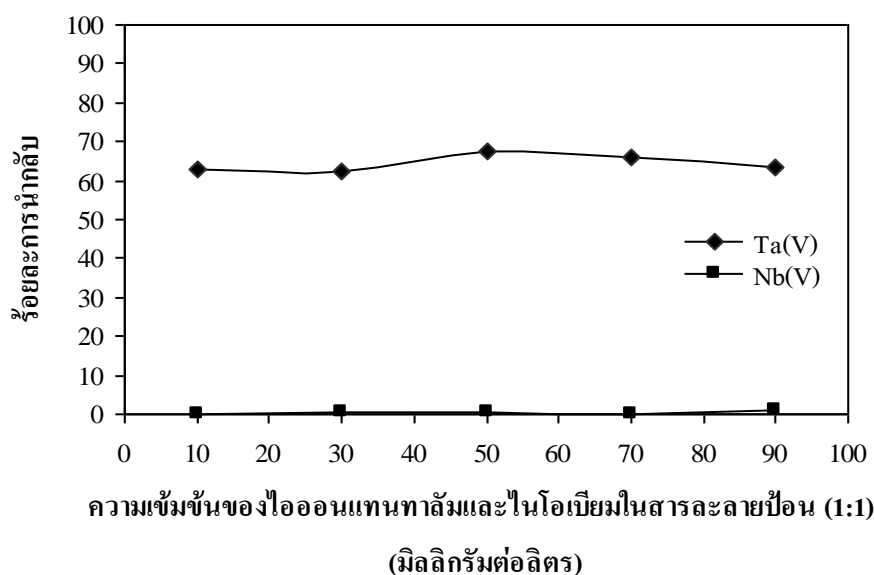
**รูปที่ 4.9** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมเปอร์คลอเรตกับร้อยละของการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อ  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร  $[Aliquat\ 336]_m = 3\%$  โดยปริมาตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4.1.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ ศึกษาโดยเพิ่มค่าความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 30, 50, 70 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร และกำหนดให้ทุกปัจจัยคงที่ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนช่วงที่ศึกษาตั้งแต่ 10-90 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่แสดงผลที่มีนัยต่อร้อยละของการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัม สามารถสกัดและนำกลับไอออนแทนทาลัมได้ประมาณร้อยละ 82 และ 64 ตามลำดับ แสดงว่าพื้นที่การถ่ายเทมวลของมอดูลของเส้นใยกลวงที่ใช้ยังสามารถรองรับความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่ 90 มิลลิกรัมต่อลิตรได้



**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนกับร้อยละของการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อ  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร  $[Aliquat\ 336]_m = 3\%$  โดยปริมาตร  $[NaClO_4]_s = 0.2$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

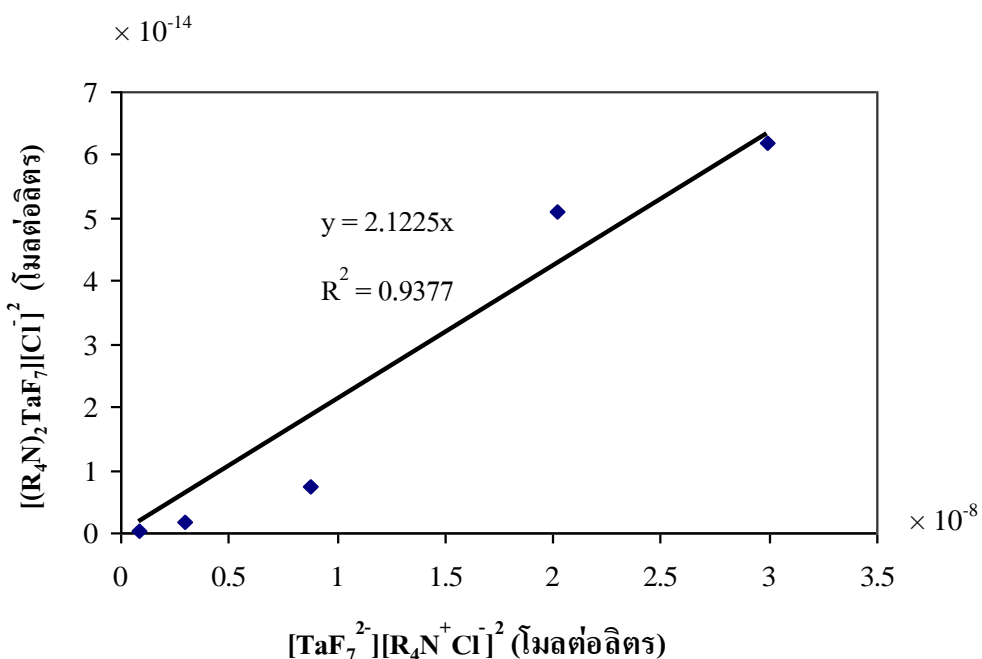


**รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเริ่มต้น ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนกับร้อยละของการนำกลับของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม เมื่อ  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร  $[Aliquat\ 336]_m = 3\%$  โดยปริมาตร  $[NaClO_4]_s = 0.2$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

## 4.2 การประยุกต์แบบจำลองการถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงกับผลการทดลอง

### 4.2.1 การคำนวณค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant, $K_{eq}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient, $D$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัม

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัมได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.12 ซึ่งมาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.11) มีค่าเท่ากับ  $2 \times 10^{-6}$  สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัมที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง 0.25-4% โดยปริมาตร คำนวณจากสมการที่ (2.12) และแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $[(R_4N)_2TaF_7][Cl^-]^2$  กับ  $[TaF_7^{2-}][R_4N^+Cl^-]^2$  ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง 0.25-4% โดยปริมาตร

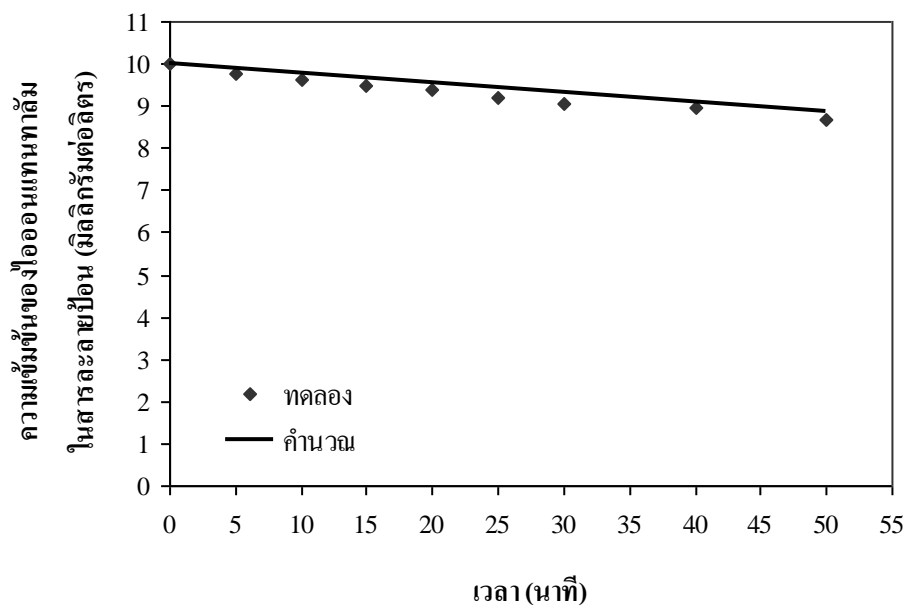
**ตารางที่ 4.1** ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัด ไอออนแทนทาลัมที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลาย เยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง 0.25-4% โดยปริมาตร

Aliquat 336 (%โดยปริมาตร)	D	$P \times 10^4$ (เซนติเมตรต่อวินาที)
0.25	0.149	0.325
0.5	0.299	0.906
1	0.665	1.410
2	2.206	2.110
3	3.467	2.450
4	2.191	2.300

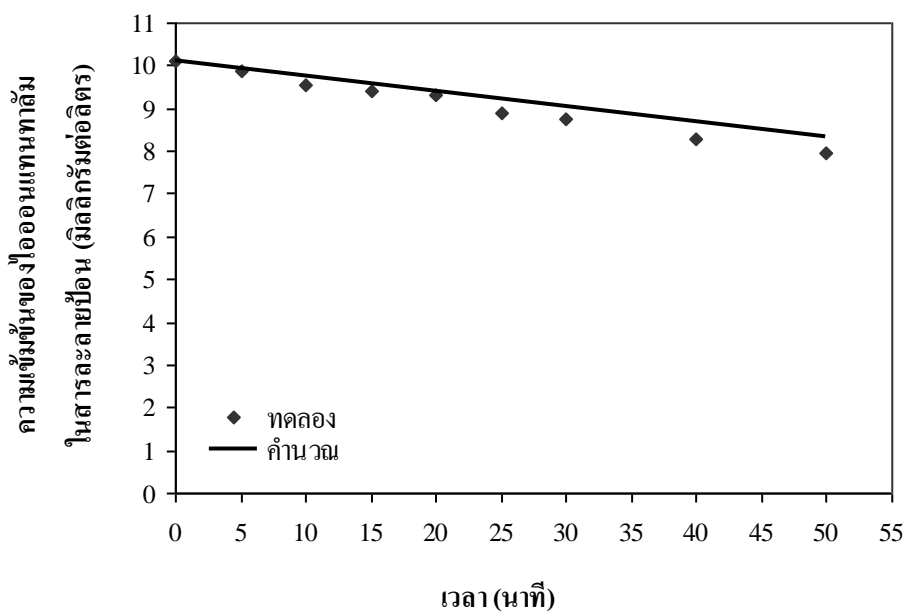
#### 4.1.1 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนจาก ผลการทดลองกับการคำนวณจากแบบจำลองการถ่ายเทมวล

รูปที่ 4.14 (ก)-(จ) แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณจากแบบจำลองการถ่ายเทมวล โดยมีภาวะการทดลองดังนี้ ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อนเท่ากัน คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.3 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว 0.25, 0.5, 1, 2, 3 และ 4% โดยปริมาตร และสารละลายนำกลับใช้สารละลายโซเดียมเปอร์คลอเรต ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

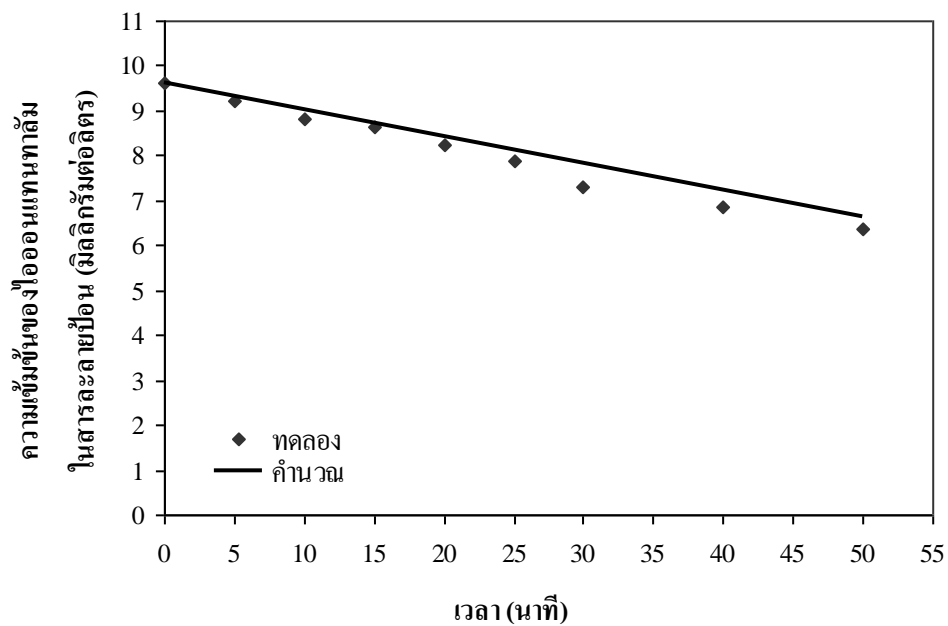
จากรูปที่ 4.14 (ก)-(จ) จะเห็นว่าความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลาต่างๆ จากการทดลองกับการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 2, และ 3 % โดยปริมาตร แสดงว่าแบบจำลองการถ่ายเทมวลนี้เป็นไปตามทฤษฎีของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พวยด้วยเส้นใยกลวง แต่ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 4% โดยปริมาตร ผลการทดลองมีค่าสูงกว่าการคำนวณ ดังรูปที่ 4.14 (จ) ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เพิ่มขึ้น ความหนืดในเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของสารสกัด Aliquat 336 ทั้งหมดไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนแทนทาลัมได้ ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐานของแบบจำลองการถ่ายเทมวล ดังนั้น ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออกกับเวลาจึงมีค่าสูงและเบี่ยงเบนจากการคำนวณ



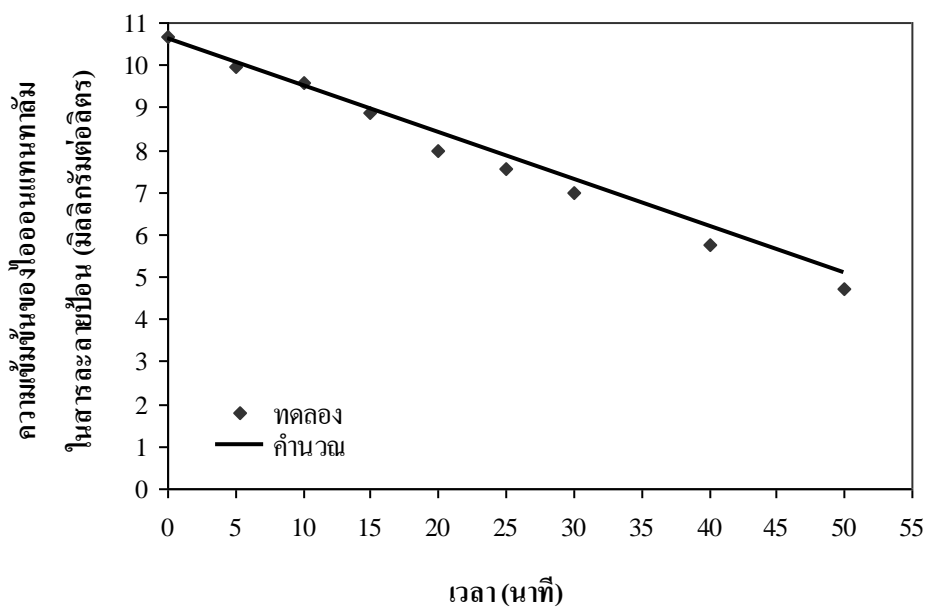
(ก) [Aliquat 336] 0.25% โดยปริมาตร



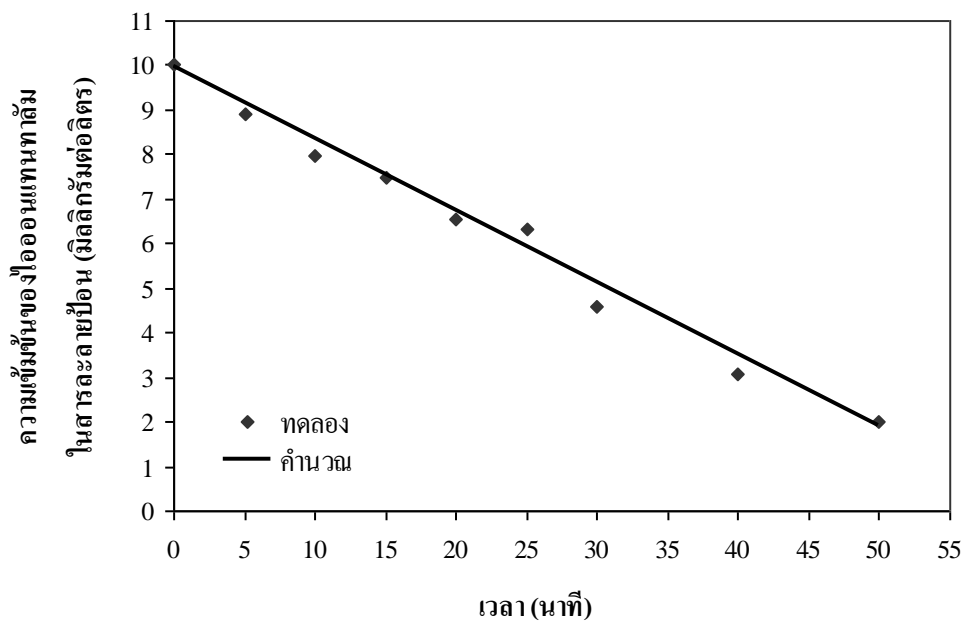
(ข) [Aliquat 336] 0.5% โดยปริมาตร



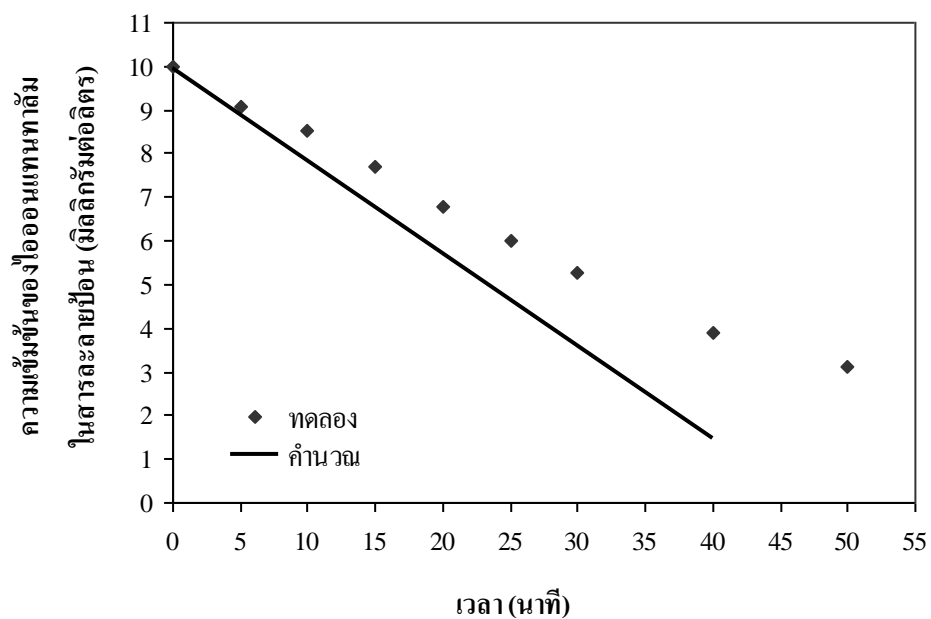
(ค) [Aliquat 336] 1% โดยปริมาตร



(ง) [Aliquat 336] 2% โดยปริมาตร



(จ) [Aliquat 336] 3% โดยปริมาตร



(ฉ) [Aliquat 336] 4% โดยปริมาตร

**รูปที่ 4.13** ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายไอโอดีนที่เวลาต่างๆ จากการทดลองและการคำนวณด้วยแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ต่างๆ ก) 0.25 ข) 0.5 ค) 1 ง) 2 จ) 3 และ ฉ) 4% โดยปริมาตร

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การสกัดไอออนผสมของแทนทาลัมออกจากไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้ปฏิบัติการไหลแบบกะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบสวนทางกัน และมีอัตราการไหลเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยให้สารละลายป้อนไหลทางด้านฝั่งท่อสารละลายนำกลับไหลทางด้านฝั่งเปลือก สารละลายป้อนที่ใช้เป็นสารละลายผสมของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของตัวทำละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อน

### สรุปผลการทดลอง

1. จากวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารสกัด โดยใช้ Aliquat 336 และ TBP ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร พบว่า Aliquat 336 ให้ค่าการสกัดไอออนของแทนทาลัมสูงกว่า TBP 30% และสามารถสกัดไอออนแทนทาลัมได้มากกว่าไนโอเบียม

2. ความแตกต่างของความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกมีผลต่อการเกิดไอออนเชิงซ้อนประจุลบของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมที่ต่างกัน ไอออนเชิงซ้อนประจุลบที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกต่ำมีความเสถียรมากกว่าไอออนเชิงซ้อนประจุลบที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกสูงกว่า 10 โมลต่อลิตร

พบว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อน เท่ากับ 0.3 โมลต่อลิตร ให้ค่าร้อยละการสกัดคัดเลือกไอออนแทนทาลัมมากที่สุดเท่ากับ 34 และค่าร้อยละการสกัดของไอออนไนโอเบียมน้อยมากเมื่อเทียบกับไอออนแทนทาลัมประมาณ 2

3. ผลของความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในช่วง 0.25-4% โดยปริมาตร ต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม พบว่าความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ที่เหมาะสมเท่ากับ 3% โดยปริมาตร และให้ร้อยละการคัดเลือกสกัดไอออนแทนทาลัมสูงสุดเท่ากับ 78



4. สารละลายนำกลับโซเดียมเปอร์คลอเรต ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ให้ค่าร้อยละการนำกลับของไอออนแทนทาลัมดีที่สุด (57 %) เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายไทโอยูเรีย และกรดไฮโดรคลอริก

5. ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมเปอร์คลอเรตในช่วง 0.1-0.4 โมลต่อลิตร ต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม พบว่าสารละลายนำกลับโซเดียมเปอร์คลอเรตที่ความเข้มข้น 0.2-0.4 โมลต่อลิตร ได้ร้อยละการนำกลับไอออนแทนทาลัมประมาณ 67 ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมเปอร์คลอเรตที่เหมาะสม คือ 0.2 โมลต่อลิตร (ความเข้มข้นต่ำสุด)

6. ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อน 10-90 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ศึกษาไม่มีผลต่อร้อยละการคัดเลือกสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมจากไอออนไนโอเบียม

7. จากแบบจำลองการถ่ายเทมวลของการสกัดไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม

- ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัม ( $K_{ex}$ ) มีค่าเท่ากับ  $2 \times 10^{-6}$
- ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนแทนทาลัมที่สมดุล ( $D$ ) เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง 0.25, 0.5, 1, 2, 3 และ 4% โดยปริมาตร มีค่าเท่ากับ 0.149, 0.299, 0.665, 2.206, 3.467 และ 2.191 ตามลำดับ
- ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนแทนทาลัม ( $P$ ) เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง 0.25, 0.5, 1, 2, 3 และ 4% โดยปริมาตร มีค่าเท่ากับ  $0.325 \times 10^{-4}$ ,  $0.906 \times 10^{-4}$ ,  $1.41 \times 10^{-4}$ ,  $2.11 \times 10^{-4}$ ,  $2.45 \times 10^{-4}$  และ  $2.30 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ
- ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน ( $D_{aq}^*$ ) และในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง ( $D_m^*$ ) มีค่าเท่ากับ  $3.736 \times 10^{-9}$  และ  $3.349 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน ( $k_p$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง ( $k_m$ ) มีค่าเท่ากับ  $1.19 \times 10^{-5}$  และ  $1.44 \times 10^{-7}$

เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในสารละลาย ป้อนมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลว จึงกล่าวได้ว่า การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนระหว่างไอออนแทนทาลัมกับสารสกัด Aliquat 336 ที่ทำปฏิกิริยากันผ่านสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการถ่ายเทมวล (mass transfer controlling step)

- ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนที่เวลาต่างๆ และความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 0.25-4 % โดยปริมาตร ที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถ่ายเทมวลมีความสอดคล้องกับผลการทดลองเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ต่ำกว่า 4% โดยปริมาตร แสดงว่าแบบจำลองเชื่อถือได้และเป็นไปตามทฤษฎีการถ่ายเทมวลผ่านระบบของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สามารถใช้แบบจำลองการถ่ายเทมวลประเมินเวลาในการสกัดไอออนแทนทาลัมได้

#### ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ตัวรองรับเส้นใยกลวงที่ทำจากพอลิโพรพิลีนซึ่งมีสมบัติ hydrophobic จึงต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการละลายสารสกัด ดังนั้นควรศึกษาชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ที่ช่วยให้สารสกัดแยกไอออนที่ต้องการแยกได้อย่างมีประสิทธิภาพ และตัวทำละลายอินทรีย์นั้นจะต้องมีค่าการละลายน้ำต่ำเพื่อไม่ทำให้เยื่อแผ่นเหลวหลุดจากมอดูลของเส้นใยกลวง
2. ควรทดลองกับมอดูลเยื่อแผ่นที่พุงด้วยเส้นใยกลวงซึ่งเป็นตัวรองรับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เพราะอาจทนต่อสภาพกรดได้มากกว่าตัวรองรับเส้นใยกลวงพอลิโพรพิลีนที่ 1 โมลต่อลิตร
3. ผลจากการทดลองอาจนำไปประยุกต์ใช้กับการแยกไอออนแทนทาลัมในระดับอุตสาหกรรมจากสารละลายป้อนที่มาจากกร่อยแร่ในธรรมชาติ โดยศึกษาการเพิ่มขนาดของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับเส้นใยกลวง เช่น จำนวนมอดูลเส้นใยกลวงที่ใช้ ขนาดของมอดูลเส้นใยกลวง เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

- [1] ประกร รามกุล. การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดีเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [2] EL-Hussaini, O. M. Extraction of niobium from sulfate leach liquor of Egyptian ore sample by triazoloquinazolinone. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 19(2009) : 474-478.
- [3] Das, N. and Chattopadhyay, R. P. Separation of niobium and tantalum through solvent extraction and reversed phase extraction chromatography using Aliquat 336 as an anion exchanger. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 109(1)(1987) : 45-54.
- [4] Yang, X.J. and Pin, C. Determination of niobium, tantalum, zirconium and hafnium in geological material by extraction chromatography and inductive coupled plasma mass spectrometry. Analytica Chimica Acta 458(2002) : 375-386.
- [5] El-Hussaini, O.M. and Mahdy, M.A. Sulfuric acid leaching of Kap Amiri niobium-tantalum bearing minerals, Central Eastern Desert, Egypt. Hydrometallurgy 64(2002) : 219-229.
- [6] Cunningham, L.D. Columbium(Niobium) and Tantalum. U.S. GEOLOGICAL SURVEY MINERALS YEARBOOK (2003) : 1-7.
- [7] Campderrós, M.E. and Marchese J. Facilitated transport of niobium(V) and tantalum (V) with supported liquid membrane using TBP as carrier. Journal of Membrane Science 164(1-2)(2000) : 205-210.
- [8] Ellenburg, J.Y., Leddicotte, G.W. and Moore, F.L. Separation of Niobium and Tantalum by Liquid-Liquid Extraction. Analytical Chemistry Division 26(6)(1954) : 1045–1047.
- [9] El-Hussaini, O.M. and Rice, N.M. Liquid-liquid extraction of niobium and tantalum from aqueous sulphate/fluoride solutions by a tertiary amine. Hydrometallurgy 72(3-4) (2004) : 259-267.

- [10] Mayorov, V.G. and Nikolaev, A.I. Tantalum (V) and niobium (V) extraction by octanol. Hydrometallurgy 66(1-3)(2002) : 77-83.
- [11] Ramakul, P., Supajaroen, T., Prapasawat, T., Pancharoen, U. and Lothongkum A. W. Synergistic separation of yttrium ions in lanthanide series from rare earths mixture via hollow fiber supported liquid membrane. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 15(2)(2009) : 224-228.
- [12] Liu, Y. and Shi, B. Hollow fiber supported liquid membrane for extraction of ethylbenzene and nitrobenzene from aqueous solution: A Hansen Solubility Parameter Approach. Separation and Purification Technology 65(3)(2009) : 233-242.
- [13] Yang, Q. and Kocherginsky, N.M. Copper recovery and spent ammoniacal etchant regeneration based on hollow fiber supported liquid membrane technology: From bench-scale to pilot-scale tests. Journal of Membrane Science 286(1-2)(2006) : 301-309.
- [14] Marchese, J. and Campderrós, M. Mass transfer of cadmium ions in a hollow-fiber module by pertraction. Desalination 164(2)(2004) : 141-149.
- [15] Clark, R.J.H. and Brown D. The Chemistry of VANADIUM, NIOBIUM and TANTALUM. New York : Pergamon Press, 1975.
- [16] Parker S.P. Dictionary of Scientific AND Technical Terms. 1<sup>st</sup> ed., New York : McGraw-Hill, 1994.
- [17] Enghag, P. Encyclopedia of the Elements. Germany : WILEY – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
- [18] อูรา ปานเจริญ. กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [19] Zhou, K. and Tokuda, M. Solvent extraction of niobium from alkali solution by methyltrioctylammonium chloride. Journal of Central South University of Technology 7(4)(2000) : 175-177.

- [20] Campderrós, M.E. and Marchese, J. Transport of niobium(V) through a TBP-Alamine 336 supported liquid membrane from chloride solutions. Hydrometallurgy 61(2)(2001) : 89-95.
- [21] Htwe, H.H. and Lwin, K. T. Study on Extraction of Niobium Oxide from Columbite-Tantalite Concentration. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology 46(2008) : 133-135.
- [22] El-Hazek, M.N., Amer, T.E., AbuEl - Azm, M.G., Issa, R.M. and El - Hady, S.M. Liquid-Liquid Extraction of Tantalum and Niobium by Octanol from Sulfate Leaching Liquor. Arabian Journal of Chemistry (2011): in press.
- [23] Kasikova, N.I., Kasikov, A.G. and Korotkova, G.V. Extraction of niobium from hydrochloric solutions with tertiary amines in aprotic diluents. Russian Journal of Applied Chemistry 83(3)(2010) : 424-429.
- [24] Pancharoen, U., Ramakul, P. and .Pattaweekongka,W. Purely Extraction and Separation of Mixture of Cerium(IV) and Lanthanum(III) Via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Industrial & Engineering Chemistry Research 11(6)(2005) : 926-931.
- [25] Fábrega, F. d. M. and Mansur, M. B. Liquid - liquid extraction of mercury(II) from hydrochloric acid solutions by Aliquat 336. Hydrometallurgy 87(3-4)(2007) : 83-90.
- [26] Sangtumrong, S., Ramakul, P., Satayaprasert, C. and Pancharoen, U. Purely Separation of Mixture of Mercury and Arsenic via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 13(5)(2007) : 751-756.
- [27] Resina, M., Fontas, C., Palet, C. and Munoz, M. Comparative study of hybrid and activated composite membranes containing Aliquat 336 for the transport of Pt(IV). Journal of Membrane Science 311(1-2)(2008) : 235-242.
- [28] Lothongkum, A.W., Ramakul, P., Sasomsub, W., Laoharochanapan, S. and Pancharoen, U. Enhancement of uranium ion flux by consecutive extraction via hollow fiber supported liquid membrane. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 40(5)(2009) : 518-523.

- [29] Pancharoen, U., Somboonpanya, S., Chaturabul, S. and Lothongkum, A.W. Selective removal of mercury as  $\text{HgCl}_4^{2-}$  from natural gas well produced water by TOA via HFSLM. Journal of Alloys and Compounds 489(1)(2010) : 72-79.
- [30] Lothongkum, A.W., Suren, S., Chaturabul S., Thamphiphit, N. and Pancharoen, U. Simultaneous removal of arsenic and mercury from natural-gas-co-produced water from the Gulf of Thailand using synergistic extractant via HFSLM. Journal of Membrane Science 369(1-2)(2011) : 350-358.
- [31] El-Hussaini, O.M. and El-Hakam Mahdy, M.A. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 22. Cairo: Taylor and Francis, 2001.
- [32] Bringas, E., Roman, M.S., Irabien, J. and Ortiz, I. An overview of the mathematical modelling of liquid membrane separation processes in hollow fibre contactors. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 84(11)(2009) : 1583-1614.
- [33] นิสิต สุไลมาน. การสกัดนีโอดีเนียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [34] Kumar, A., Haddad,R., Benzal G., Ninou, R. and Sastre, A.M. Use of modified membrane carrier system for recovery of gold cyanide from alkaline cyanide media using hollow fiber supported liquid membranes: feasibility studies and mass transfer modeling. Journal of Membrane Science 174(2000) : 17-30.
- [35] Ramakul, P., Songkun, E., Pattaveekongka, W., Hronec, M. and Pancharoen, U. Permeation study on the hollow-fiber supported liquid membrane for the extraction of Cobalt(II). Korean Journal of Chemical Engineering. Korean Journal of Chemical Engineering 23(1)(2006) : 117-123.
- [36] Kislik, V.S. Carrier - Facilitated Coupled Transport Through Liquid Membranes: General Theoretical Considerations and Influencing Parameters, Liquid Membranes: Principles and Applications in Chemical Separations and Wastewater Treatment, pp. 17-71. Elsevier B.V., 2010.

- [37] Kocherginsky, N.M., Yang, Q. and Seelam, L. Recent advances in supported liquid membrane technology. Separation and Purification Technology 53(2)(2007) : 171-177.
- [38] Breembroek, G.R.M., Straalen, A.v., Witkamp, G.J. and Rosmalen, G.M.V. Extraction of cadmium and copper using hollow fiber supported liquid membranes. Journal of Membrane Science 146(2)(1998) : 185-195.
- [39] Juang, R.-S. and Huang, H.-L. Mechanistic analysis of solvent extraction of heavy metals in membrane contactors. Journal of Membrane Science 213(1-2)(2003) : 125-135.
- [40] ทรรชนก ประภาสวัตต์. การแยกไอออนอาร์ซีนิกโดยการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [41] Bird R.B., Stewart W.E., and Lightfoot E.N. Transport Phenomena, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [42] Mark C. Porter. Handbook of Industrial Membrane Technology. Noyes Publications, New Jersey, 1990.
- [43] He, D., Luo, X., Yang, C., Ma, M. and Wan Y. Study of transport and separation of Zn(II) by a combined supported liquid membrane/strip dispersion process containing D2EHPA in kerosene as the carrier. Desalination 194(2006) : 40-51.
- [44] Pancharoen, U., Poonkum, W. and Lothongkum, A.W. Treatment of arsenic ions from produced water through hollow fiber supported liquid membrane. Journal of Alloys and Compounds 482(1-2)(2009) : 328-334.
- [45] Kebiche-Senhadji, O., Tingry, S., Seta, P. and Benamor, M. Selective extraction of Cr(VI) over metallic species by polymer inclusion membrane (PIM) using anion (Aliquat 336) as carrier. Desalination 258(1-3)(2010) : 59-65.
- [46] Analytical Services Laboratory of ICET
- [47] Agulyansky, A., Agulyansky, L. and Travkin, V.F. Liquid-liquid extraction of tantalum with 2-octanol. Chemical Engineering and Processing 43(10)(2004) : 1231-1237.

- [48] Caletka, R., Hausbeck, R. and Krivan, V. Distribution of niobium and tantalum on Dowex-1 and polyurethane foam in HF-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and HF-HCl medium. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 131(2)(1989) : 343-352.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างการคำนวณ

## ก-1 การคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับไอออนแทนทาลัม

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\% \text{ Extraction} = \frac{C_{f, in} - C_{f, out}}{C_{f, in}} \times 100$$

$$\% \text{ Stripping} = \frac{C_{s, out}}{C_{f, in}} \times 100$$

เมื่อ

$C_{f, in}$  = ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{f, out}$  = ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{s, out}$  = ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 3% โดยปริมาตร

ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาเข้า

$$= 9.998 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออก

$$= 2.181 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{9.998 - 2.181}{9.998} \times 100$$

$$= 78.186 \text{ (ดังตารางที่ ข-3)}$$

## ก-2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ

จากสมการการคำนวณร้อยละการนำกลับ สมการที่ (2.8)

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336

$$= 3\% \text{ โดยปริมาตร}$$

ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายนำกลับขาออก

$$= 1.783 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{1.783}{9.998} \times 100$$

$$= 17.834 \text{ (ดังตารางที่ ข-3)}$$

ก-3 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant,  $K_{ex}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์

การกระจาย (distribution coefficient,  $D$ )

### 1. การคำนวณค่าคงที่สมดุล

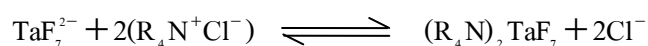
จากสมการการคำนวณค่าคงที่สมดุลสมการที่ (2.11)

$$K_{ex} = \frac{[(R_4N)_2TaF_7][Cl^-]^2}{[TaF_7^{2-}][R_4N^+Cl^-]^2}$$

วิธีการหาค่าความเข้มข้นของสารแต่ละตัว (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3)

จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัมและความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมเมื่อใช้สารสกัด

Aliquat 336 เท่ากับ 3% โดยปริมาตร ( $6.562 \times 10^{-2}$  โมลต่อลิตร)



ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาเข้า =  $3.185 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร

$$= (9.998 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร})$$

ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออก =  $6.949 \times 10^{-6}$  โมลต่อลิตร

$$= (2.181 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร})$$

ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมที่หายไปทำปฏิกิริยา =  $3.185 \times 10^{-5} - 6.949 \times 10^{-6}$  โมลต่อลิตร

$$= 2.490 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร}$$

ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมที่หายไปทำปฏิกิริยา หรือความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อน  $[(R_4N)_2TaF_7]$  ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัมมีค่าเท่ากับ  $2.490 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เวลาเริ่มต้นมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} [TaF_7^{2-}] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนเข้า 9.998 มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ &= 3.185 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [R_4N^+Cl^-] &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 3% โดยปริมาตร} \\ &= 6.562 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สมดุลมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} [TaF_7^{2-}] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนออก 2.181 มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ &= 6.949 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [R_4N^+Cl^-] &= 6.562 \times 10^{-2} - 2 \times (2.490 \times 10^{-5}) \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= 6.557 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่สมดุลมีค่าดังนี้

$$\text{ไอออนเชิงซ้อน } [(R_4N)_2TaF_7] = 2.490 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$\begin{aligned} [Cl^-] &= 2 \times (2.490 \times 10^{-5}) \\ &= 4.980 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } [(R_4N)_2TaF_7] [Cl^-]^2 &= (2.490 \times 10^{-5}) \times (4.980 \times 10^{-5})^2 \\ &= 6.179 \times 10^{-14} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } [TaF_7^{2-}][R_4N^+Cl^-]^2 &= (6.949 \times 10^{-6}) \times (6.557 \times 10^{-2})^2 \\ &= 2.988 \times 10^{-8} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

สร้างกราฟระหว่าง  $[(R_4N)_2TaF_7] [Cl^-]^2$  กับ  $[TaF_7^{2-}][R_4N^+Cl^-]^2$  ในรูปที่ 4.12 และหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัม ( $K_{ex}$ ) จากความชันของกราฟได้เท่ากับ  $2 \times 10^{-6}$

## 2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

จากสมการการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย สมการที่ (2.12)

$$D = \frac{[(R_4N)_2TaF_7]}{[TaF_7^{2-}]} = \frac{K_{ex}[R_4N^+Cl^-]^2}{[Cl^-]^2}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_{ex} &= \text{ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัม} \\ &= 2 \times 10^{-6} \\ [R_4N^+Cl^-] &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ที่สมดุล} \\ &= 6.557 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร} \\ [Cl^-] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนคลอไรด์ทางด้านสารผลิตภัณฑ์} \\ &\quad \text{ที่สมดุล} \\ &= 4.980 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned} D &= \frac{(2 \times 10^{-6}) \times (6.557 \times 10^{-2} \text{ M})^2}{(4.980 \times 10^{-5} \text{ M})^2} \\ &= 3.467 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนแทนทาลัมเท่ากับ 3.467

### ก-4 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient, P)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคำนวณจาก สมการที่ (2.16) คำนวณจากความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 3% โดยปริมาตร (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3)

$$P = \frac{Q_f \ln([Ta]_{f,in} - [Ta]_{f,out})}{A_m}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} P &= \text{สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)} \\ Q_f &= \text{อัตราการไหลของสารละลายป้อน} \\ &\quad \text{(ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.67 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (100 มิลลิลิตรต่อนาที)} \\
 [\text{Ta}]_{f,\text{in}} &= \text{ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาเข้า} \\
 &= 9.998 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร (9.998 ppm)} \\
 [\text{Ta}]_{f,\text{out}} &= \text{ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาเข้า} \\
 &= 2.181 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร (2.181 ppm)} \\
 A &= \text{พื้นที่การถ่ายเทมวล} \\
 &= 1.4 \times 10^4 \text{ ตารางเซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1.67 \times \ln(9.998 - 2.181)}{1.4 \times 10^4} \\
 &= 2.45 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}
 \end{aligned}$$

นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนแทนทาลัม ( $P$ ) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 3% โดยปริมาตร มีค่า  $2.45 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที

ก-5 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน ( $D_{aq}^*$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ( $D_m^*$ )

#### 1. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน ( $D_{aq}^*$ )

จากสมการของ Wilke-Chang สมการที่ (2.17)

$$D_{aq}^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta \times V_A^{0.6}}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 M &= \text{น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ (-)} \\
 &= 18 \\
 T &= \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (เคลวิน)} \\
 &= 299 \text{ เคลวิน (25 องศาเซลเซียส)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \text{ความหนืดของสารละลายป้อน (สารละลายผสมของไอออน} \\ &\quad \text{แทนทาลัมและไนโอเบียม) (cP)} \\ &= 0.798 \text{ cP} \\ V_A &= \text{ปริมาตรเชิงโมลาร์ของสารละลายผสมของไอออนแทนทาลัม} \\ &\quad \text{และไนโอเบียม (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)} \\ &= 3.140 \times 10^7 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล} \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} D_{aq}^* &= \frac{7.4 \times 10^{-8} \times (18)^{0.5} \times 299}{0.798 \times (3.140 \times 10^7)^{0.6}} \\ &= 3.736 \times 10^{-9} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนมีค่า  $3.736 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

## 2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ( $D_m^*$ )

จากสมการของ Wilke-Chang สมการที่ (2.17)

$$D_m^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta \times V_A^{0.6}}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} M &= \text{น้ำหนักโมเลกุลของเคโรซีน (-)} \\ &= 200 \\ T &= \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (เคลวิน)} \\ &= 299 \text{ เคลวิน (25 องศาเซลเซียส)} \\ \eta &= \text{ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (cP)} \\ &= 1.24 \text{ cP} \\ V_A &= \text{ปริมาตรเชิงโมลาร์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว} \\ &\quad \text{(ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)} \\ &= 1.344 \times 10^8 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล} \end{aligned}$$



แทนค่าลงในสมการ

$$D_m^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} \times (200)^{0.5} \times 299}{1.24 \times (1.344 \times 10^8)^{0.6}}$$

$$= 3.349 \times 10^{-9} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว มีค่า  $3.349 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

ก-6 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน ( $k_p$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

1. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน ( $k_p$ )

จากความสัมพันธ์ของ Sherwood-Graetz

$$Gz = \frac{d_i^2 v}{LD_{aq}^*}$$

$$Sh = mGz^n$$

$$Sh = \frac{k_i d_i}{D_{aq}^*}$$

โดยที่

$d_i$	= เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	= $2.4 \times 10^{-2}$ เซนติเมตร
$v$	= ความเร็วของสารละลายป้อนภายในท่อ (เซนติเมตรต่อวินาที)
	= 15.381 เซนติเมตรต่อวินาที (100 มิลลิเมตรต่อวินาที)
$L$	= ความยาวของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	= 20.3 เซนติเมตร
$D_{aq}^*$	= ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
	= $3.736 \times 10^{-9}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

$$\begin{aligned}
 m &= \text{ค่าคงที่} \\
 &= 1.62 \\
 n &= \text{ค่าคงที่} \\
 &= 0.33
 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned}
 Gz &= \frac{(2.4 \times 10^{-2})^2 \times 15.381}{20.3 \times (3.736 \times 10^{-9})} \\
 &= 1.17 \times 10^5
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าคงที่ของ Graetz เท่ากับ  $1.17 \times 10^5$

แทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned}
 Sh &= 1.62 \times (1.17 \times 10^5)^{0.33} \\
 &= 76.2
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าคงที่ของ Sherwood เท่ากับ 76.2

แทนค่าคงที่ของ Graetz และ Sherwood ในสมการ

$$76.2 = \frac{k_i \times (2.4 \times 10^{-2})}{3.736 \times 10^{-9}}$$

$$k_i = 1.19 \times 10^{-5} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อน มีค่า  $1.19 \times 10^{-5}$  เซนติเมตรต่อวินาที และคำนวณ  $R_i$  (ค่าความต้านการถ่ายเทมวลของสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายผสมของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม) จาก  $1/k_i$  เท่ากับ  $8.403 \times 10^4$  วินาทีต่อเซนติเมตร

## 2. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลาย

เยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวดังนี้

$$k_m = \frac{\varepsilon D_m^*}{\tau r_i \ln(r_o/r_i)}$$

โดยที่

$\varepsilon$	= ค่าความพรุนของเส้นใยกลวง
	= 0.3
$D_m^*$	= ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัม ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
	= $3.349 \times 10^{-9}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที
$\tau$	= ค่า tortuosity ของมอดูล
	= 2.6
$r_o$	= รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	= $1.5 \times 10^{-2}$ เซนติเมตร
$r_i$	= รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	= $1.2 \times 10^{-2}$ เซนติเมตร

แทนค่าในสมการ

$$k_m = \frac{0.3 \times (3.349 \times 10^{-9})}{2.6 \times (1.2 \times 10^{-2}) \ln(1.5 \times 10^{-2} / 1.2 \times 10^{-2})}$$

$$= 1.44 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแทนทาลัมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว มีค่า  $1.44 \times 10^{-7}$  เซนติเมตรต่อวินาที และคำนวณ  $R_m$  (ค่าความต้านการถ่ายเทมวลของสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายผสมของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม) จาก  $1/k_m$  เท่ากับ  $6.944 \times 10^6$  วินาทีต่อเซนติเมตร)

ก-7 ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออกด้วยแบบจำลองการถ่ายเทมวล

$$[\text{Ta}]_r = \frac{-[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0 R_i}{2R_m} + \left\{ [\text{Ta}]_{f_0} + \frac{[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0 R_i}{2R_m} \right\} \exp\left(\frac{-A}{2R_i V_f} \cdot t\right)$$

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออก  $[Ta]_f$  ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 3% โดยปริมาตร เวลา 50 นาที

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 [R_4N^+Cl^-]_0 &= \text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของของสารสกัด Aliquat 336} \\
 &= 0.027 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (3\% โดยปริมาตร)} \\
 [Ta]_{f_0} &= \text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัม} \\
 &= 9.998 \times 10^{-6} \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร} \\
 &\quad (9.998 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร)} \\
 R_i &= \text{ค่าความต้านการถ่ายเทมวลของสารละลายป้อนซึ่งเป็น} \\
 &\quad \text{สารละลายผสมของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียม} \\
 &\quad \text{(วินาทีต่อเซนติเมตร)} \\
 &= 8.403 \times 10^4 \text{ วินาทีต่อเซนติเมตร} \\
 R_m &= \text{ค่าความต้านการถ่ายเทมวลของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว} \\
 &\quad \text{(วินาทีต่อเซนติเมตร)} \\
 &= 6.944 \times 10^6 \text{ วินาทีต่อเซนติเมตร} \\
 V_f &= \text{ปริมาตรของสารละลายป้อน} \\
 &= 5,000 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร (5 ลิตร)} \\
 A &= \text{พื้นที่การถ่ายเทมวลของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว} \\
 &= 1.400 \times 10^4 \text{ ตารางเซนติเมตร} \\
 t &= \text{เวลา} \\
 &= 3,000 \text{ วินาที (50 นาที)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{การคำนวณพจน์ของ} \quad & \frac{-[R_4N^+Cl^-]_0 R_i}{2R_m} \\
 &= \frac{-(0.027) \times (8.403 \times 10^4)}{2 \times (6.944 \times 10^6)} \\
 &= -1.605 \times 10^{-4} \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{การคำนวณพจน์ของ } & \exp\left(\frac{-A}{2R_iV_f} \cdot t\right) \\
 & = \exp\left(\frac{-(1.4 \times 10^4)}{2 \times (8.40 \times 10^4) \times (5,000)} \times (3,000)\right) \\
 & = 9.512 \times 10^{-1}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.42) แทนค่าต่างๆ และคำนวณค่าความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลาย  
ป้อนขาออก ดังนี้

$$[\text{Ta}]_f = \frac{-[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0 R_i}{2R_m} + \left\{ [\text{Ta}]_{i_0} + \frac{[\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-]_0 R_i}{2R_m} \right\} \exp\left(\frac{-A}{2R_iV_f} \cdot t\right)$$

$$[\text{Ta}]_f = -1.605 \times 10^{-4} + (9.998 \times 10^{-6} + 1.605 \times 10^{-4}) \times 9.512 \times 10^{-1}$$

$$= 1.960 \times 10^{-6} \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$= 1.960 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร (1.960 ppm)}$$

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมจากการเปรียบเทียบชนิดของสารสกัดด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณ ร้อยละการสกัดและการนำกลับ

ชนิดสารสกัด	สารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				สารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	[Ta]		[Nb]		[Ta]	[Nb]	Ta	Nb	Ta	Nb
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก						
TBP	8.569	8.452	10.46	10.19	0.589	0.011	1.365	2.590	6.874	0.105
Aliquat 336	8.783	5.971	10.30	9.979	0.537	0.001	32.016	3.098	6.114	0.010

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง:  $[TBP]_m = [Aliquat\ 336]_m = 1\%$  โดยปริมาตร,  $[HF]_f = 0.1$  โมลต่อลิตร อัตราเร็วการปั่นกววน 100 รอบต่อนาที

ตารางที่ ข-2 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกในสารละลายป้อน

ความเข้มข้นของ กรดไฮโดรฟลูออริก ในสารละลายป้อน (โมลต่อลิตร)	สารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				สารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	[Ta]		[Nb]		[Ta]	[Nb]	Ta	Nb	Ta	Nb
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก						
0.01	8.535	6.993	8.677	8.552	0.292	0.002	18.067	1.441	3.421	0.023
0.05	9.179	6.989	10.61	10.42	0.359	0.001	23.859	1.800	3.911	0.009
0.1	8.086	5.814	9.206	9.021	0.415	0.023	28.098	2.010	5.132	0.250
0.3	8.951	5.942	10.39	10.16	0.681	0.017	33.616	2.243	7.608	0.164
0.5	8.609	5.685	10.09	9.865	0.662	0.021	33.964	2.230	7.690	0.208
0.7	8.672	5.685	10.11	9.901	0.698	0.003	34.444	2.096	8.049	0.030
0.9	8.695	5.758	9.922	9.669	0.671	0.01	33.778	2.550	7.717	0.101
1	8.774	5.828	10.17	9.735	0.659	0.011	33.576	4.277	7.511	0.108

สถานะที่ใช้ในการทดลอง: [Aliquat 336]<sub>m</sub> = 1% โดยปริมาตร, [Thiourea]<sub>s</sub> = 0.1 โมลต่อลิตร, Q<sub>f</sub> = Q<sub>s</sub> = 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบไหลวนสวนทางกัน



ตารางที่ ข-3 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ความเข้มข้นของ สารสกัด Aliquat 336 (% โดยปริมาตร)	สารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				สารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	[Ta]		[Nb]		[Ta]	[Nb]	Ta	Nb	Ta	Nb
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก						
0.25	9.985	8.672	10.800	10.77	0.298	0.001	13.150	0.250	2.984	0.009
0.5	10.11	7.972	10.820	10.77	0.344	0.003	21.163	0.508	3.402	0.028
1	9.641	6.373	10.640	10.43	0.577	0.012	33.897	1.983	5.985	0.113
2	10.65	4.722	9.316	9.102	0.985	0.011	55.666	2.297	9.248	0.118
3	9.998	2.181	9.450	9.184	1.783	0.017	78.186	2.815	17.834	0.180
4	9.991	3.131	9.641	9.453	1.252	0.009	68.662	1.950	12.531	0.093

สถานะที่ใช้ในการทดลอง:  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร,  $[Thiourea]_s = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบไหลวนสวนทางกัน

ตารางที่ ข-4 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับ ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจากการศึกษาผลของชนิดของสารละลายนำกลับ

ชนิดสารละลาย นำกลับ	สารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				สารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	[Ta]		[Nb]		[Ta]	[Nb]	Ta	Nb	Ta	Nb
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก						
NaClO <sub>4</sub>	11.02	2.292	11.3	11.04	6.252	0.019	77.052	2.310	56.733	0.168
NH <sub>2</sub> CSNH <sub>2</sub>	10.12	1.892	12.67	12.41	1.591	0.017	81.290	2.044	15.729	0.134
HCl	11.11	2.087	11.21	10.99	0.693	0.012	79.174	1.945	6.238	0.107

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับแต่ละชนิด = 0.1 โมลต่อลิตร, [Aliquat336]<sub>m</sub> = 3% โดยปริมาตร, [HF]<sub>f</sub> = 0.3 โมลต่อลิตร,  
 $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบไหลวนสวนทางกัน

ตารางที่ ข-5 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับ ไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมเปอร์คลอเรต

ความเข้มข้นของ สารละลายนำกลับ โซเดียมเปอร์คลอเรต (โมลต่อลิตร)	สารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				สารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	[Ta]		[Nb]		[Ta]	[Nb]	Ta	Nb	Ta	Nb
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก						
0.1	9.988	1.992	10.32	9.987	5.542	0.028	80.056	3.236	55.487	0.271
0.2	10.11	1.892	11.02	10.686	6.734	0.106	81.290	3.101	66.594	0.961
0.3	10.02	1.887	9.998	9.684	6.532	0.102	81.170	3.141	66.181	1.020
0.4	10.20	2.022	11.22	10.946	6.757	0.072	80.176	2.416	66.245	0.642

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง: [Aliquat336]<sub>m</sub> = 3 % โดยปริมาตร, [HF]<sub>f</sub> = 0.3 โมลต่อลิตร, Q<sub>f</sub> = Q<sub>s</sub> = 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบไหลวนสวนทางกัน

ตารางที่ ข-6 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนแทนทาลัมและไนโอเบียมในสารละลายป้อน

[Ta], [Nb] ในสารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				สารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	[Ta]		[Nb]		[Ta]	[Nb]	Ta	Nb	Ta	Nb
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก						
10	9.673	2.065	10.68	10.38	6.067	0.019	78.652	2.743	62.721	0.178
30	32.18	6.014	29.08	27.9	20.98	0.107	81.312	4.058	65.194	0.368
50	53.89	8.319	53.76	51.96	36.35	0.274	84.563	3.348	67.452	0.510
70	73.16	11.98	71.01	68.95	48.09	0.168	83.625	2.901	65.733	0.237
90	93.77	14.98	91.63	88.17	59.58	0.298	84.025	3.776	63.538	0.325

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง:  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร,  $[Aliquat\ 336] = 3\%$  โดยปริมาตร,  $[NaClO_4]_s = 0.2$  โมลต่อลิตร,  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที  
ปฏิบัติการแบบไหลวนสวนทางกัน

ตารางที่ ข-7 ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออกจากการทดลองและการคำนวณด้วยแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 และเวลาการสกัดต่างๆ

ความเข้มข้นของ สารสกัด Aliquat 336 (% โดยปริมาตร)	ความเข้มข้นของไอออนแทนทาลัมในสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
	0.25		0.5		1		2		3		4	
	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ
เวลา (นาที)												
0	9.985	9.985	10.11	10.112	9.641	9.641	10.65	10.651	9.998	9.998	9.991	9.991
5	9.776	9.871	9.876	9.933	9.221	9.336	9.982	10.083	8.917	9.176	9.093	8.912
10	9.614	9.757	9.532	9.755	8.798	9.032	9.592	9.518	8.083	8.358	8.532	7.838
15	9.491	9.644	9.421	9.577	8.652	8.729	8.889	8.956	7.894	7.544	7.693	6.769
20	9.398	9.532	9.298	9.401	8.221	8.428	7.991	8.396	6.547	6.734	6.784	5.706
25	9.217	9.420	8.877	9.225	7.893	8.129	7.547	7.840	5.871	5.929	5.989	4.648
30	9.072	9.309	8.772	9.051	7.298	7.831	6.974	7.286	5.037	5.127	5.277	3.595
40	8.971	9.088	8.291	8.704	6.847	7.240	5.773	6.186	3.283	3.535	3.899	1.505
50	8.672	8.869	7.972	8.361	6.373	6.654	4.722	5.098	2.181	1.960	3.131	-0.564

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง:  $[HF]_f = 0.3$  โมลต่อลิตร,  $[Thiourea]_s = 0.1$  โมลต่อลิตร,  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบไหลวนสวนทางกัน

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

**ชื่อ** นางสาวเดือนเพ็ญ บัวช่วง

**เกิด** วันที่ 15 พฤศจิกายน 2529 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา

#### การศึกษา

- พ.ศ. 2543 สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนวัดโพธิ์แสงกาญจนราษฎร์ จังหวัดฉะเชิงเทรา
- พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ จังหวัดฉะเชิงเทรา
- พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
- พ.ศ. 2552 เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### ประสบการณ์

- พ.ศ. 2551 มีนาคม-พฤษภาคม 2551 นักศึกษาฝึกงาน ฝ่ายกระบวนการผลิต บริษัท ปตท. อะโรเมติกส์และการกลั่น จำกัด (มหาชน) (PTTAR)

#### ทุนสนับสนุนการวิจัย

- พ.ศ. 2552 โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี-จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### ผลงานทางวิชาการ

1. Duenphen Buachuang and Ura Pancharoen. Development Efficiency Extraction of Mixture between Niobium (V) and Tantalum (V) Via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference, Miracle Grand Hotel, January 5-7, 2011
2. Duenphen Buachuang, Prakorn Ramakul, Natchanun Leepipatpiboon, and Ura Pancharoen, Mass transfer modeling on the separation of tantalum and niobium from dilute hydrofluoric media through a hollow fiber supported liquid membrane. Journal of Alloys and Compounds 509(2011): 9549-9557.