

การแยกและการนำกลับของแคดเมียม(II) จากสารละลายซัลเฟต  
โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

นายทรงฤทธิ์ ตริไพบูลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (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 AND RECOVERY OF CADMIUM(II) FROM SULPHATE MEDIA  
BY USING HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

Mr. Songrit Treephaiboon

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกและนำกลับของแคดเมียม(II) จากสารละลาย
โดย	ซัลเฟตโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง
สาขาวิชา	นายทรงฤทธิ์ ตรีไพบูลย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	วิศวกรรมเคมี
	รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช)

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

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

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

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

# # 5271483721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE / SEPARATION / RECOVERY / CADMIUM / SULPHATE MEDIA

SONGRIT TREEPHAIBOON: SEPARATION AND RECOVERY OF CADMIUM(II) FROM SULPHATE MEDIA BY USING HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE.

ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, Ph.D., 88 pp.

Wastewater from zinc-mining, which uses sulfuric acid for zinc leaching, contains zinc, magnesium, manganese and cadmium. Since cadmium is used in electroplating, alloy industry and battery production, and therefore this research studied the extraction and the recovery of Cd(II) from wastewater of zinc-mining by using hollow fiber supported liquid membrane. Wastewater as the feed solution was supplied to the tube side while the stripping solution was supplied to the shell side of the hollow fiber module for 40 minutes. The flow patterns of the feed and the stripping solutions were continuous operation mode and counter-current at equal flow rate of 100 mL/min. The following parameters were investigated: pH of the feed solution from 1.5-6.5; type of the extractant (D2EHPA and Cyanex 923) in kerosene; concentration of the extractant from 0.02-0.22 mol/L; type of the stripping solution (acetic acid, sulfuric acid and distilled water); and pH of the stripping solution from 1-6. The conditions obtained from the extraction and recovery of Cd(II) from the synthetic solution by 1 module of the HFSLM were applied to the extraction and recovery of Cd(II) from wastewater of zinc-mining containing Cd(II) approximately of 50 ppm and other ions by 2 modules of the HFSLM. It was found that the final concentration of Cd(II) in the feed solution was 0.03 ppm complying with the standard of industrial wastewater. The percentages of extraction and recovery of Cd(II) were found to be 99.85 and 64.02 at the pH of the feed solution 5.5 by using D2EHPA 0.12 mol/L in kerosene as the extractant and sulfuric acid as the stripping solution, and at the pH of sulfuric acid 3.0. The mass-transfer coefficient of Cd(II) in the feed phase ( $k_i$ ) and that of the complex ions of cadmium and D2EHPA in the liquid membrane phase ( $k_m$ ) were  $2.73 \times 10^{-4}$  and  $6.99 \times 10^{-7}$  cm/s, respectively indicating that the diffusion of the complex ions through the liquid membrane was the mass-transfer controlling step.

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

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

Academic Year : .....2012.....

ทรงฤทธิ์ ตรีโพบูลย์: การแยกและการนำกลับของแคดเมียม(II) จากสารละลายซัลเฟตโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (SEPARATION AND RECOVERY OF CADMIUM(II) FROM SULPHATE MEDIA BY USING HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE) อ. ที่ปริภาวิธานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.อุรา ปานเจริญ, 88 หน้า.

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีที่ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกชะละลายสังกะสีประกอบด้วยไอออนสังกะสี แมกนีเซียม แมงกานีส และแคดเมียม เนื่องจากแคดเมียมใช้ประโยชน์ได้ในการชุบด้วยไฟฟ้า ใช้ทำโลหะผสม และการผลิตแบตเตอรี่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการแยกและนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง กำหนดให้น้ำเสียซึ่งเป็นสารละลายป้อนไหลในด้านท่อ ส่วนสารละลายนำกลับไหลในด้านเปลือกของมอดูลเส้นใยกลวงในเวลา 40 นาที การไหลเป็นแบบต่อเนื่องและสวนทางกันที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 1.5-6.5 ชนิดของสารสกัด D2EHPA และ Cyanex 923 ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเข้มข้นของสารสกัด 0.02-0.22 โมลาร์ ชนิดของสารละลายนำกลับกรดแอสिटิก กรดซัลฟิวริก และน้ำกลั่น และความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 1-6 ค่าของตัวแปรการทดลองที่ได้จากการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายซัลเฟตสังเคราะห์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล ได้นำมาใช้กับการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีที่มีไอออนแคดเมียมประมาณ 50 ส่วนในล้านส่วน ผสมกับไอออนโลหะอื่นๆ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออกหลังการแยกมีค่า 0.03 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ร้อยละการแยกและนำกลับไอออนแคดเมียมเท่ากับ 99.85 และ 64.02 ที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 ด้วยสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน และสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3 นอกจากนี้พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อน ( $k_f$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของแคดเมียมกับสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) เท่ากับ  $2.73 \times 10^{-4}$  และ  $6.99 \times 10^{-7}$  เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงว่าการแพร่ของไอออนเชิงซ้อนผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการถ่ายเทมวล

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

สาขาวิชา .....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปริภาวิธานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา.....2555.....

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็สำเร็จลุล่วงไปได้ ซึ่งความสำเร็จดังกล่าวจะเกิดขึ้นไม่ได้หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณของข้าพเจ้าทุกท่าน ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณอย่างมากจึงขอกล่าวขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ ได้ช่วยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ต่างๆ ตลอดจนช่วยอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษาในที่สุด

ขอขอบคุณบุคคลสำคัญที่ขาดเสียมิได้สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรมาธิช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ พัฒนะศรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม และรองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณ บริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม

ขอขอบคุณพี่และเพื่อนในกลุ่มงานวิจัย Mass Separation ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา ขอขอบคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ได้ให้ชีวิต สนับสนุนการศึกษา เป็นกำลังใจและส่งเสริมให้ปฏิบัติตนเป็นคนดีของสังคมตลอดมาจนประสบผลสำเร็จในวันนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 สมบัติและความสำคัญของแคดเมียม.....	3
1.2.1 การค้นพบแคดเมียม.....	4
1.2.2 ประโยชน์ของแคดเมียม.....	4
1.2.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม.....	4
1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	5
1.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแคดเมียม.....	5
1.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแคดเมียมจากสารละลายไอออนผสม...	6
1.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแมกนีเซียม.....	7
1.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแมงกานีส.....	7
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	11
2.1 เยื่อแผ่นเหลว.....	11
2.2 กลไกการถ่ายเทมวล.....	11
2.2.1 กลไกการถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน (co – transport).....	13
2.2.2 การถ่ายเทมวลแบบสวนทางกัน (counter – transport).....	14
2.3 ประเภทของเยื่อแผ่นเหลว.....	15
2.3.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่มีตัวรองรับ (unsupported liquid membrane).....	15

2.3.1.1	เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (emulsion liquid membrane, ELM) ..	15
2.3.1.2	เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (electrostatic pseudo – liquid membrane) .....	16
2.3.2	เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane).....	18
2.3.2.1	เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (flat sheet supported liquid membrane).....	18
2.3.2.2	เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (spiral-type supported liquid membrane).....	19
2.3.2.3	เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane, HFSLM) .....	19
2.4	รูปแบบการปฏิบัติการ (operation mode) .....	22
2.4.1	ปฏิบัติการแบบกะ (batch operation mode).....	22
2.4.2	ปฏิบัติการแบบไหลต่อเนื่อง (continuous operation mode).....	23
2.5	ชนิดของสารสกัด .....	24
2.5.1	สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant).....	24
2.5.2	สารสกัดชนิดเบส (basic extractant) .....	25
2.5.3	สารสกัดชนิดซอลเวต (solvating extractant).....	26
2.6	การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	27
2.6.1	ร้อยละการแยก (percentage of extraction, %E) และร้อยละการนำกลับของไอออนแคตไอออนิก (percentage of recovery, %R).....	27
2.6.2	การคำนวณค่าคงที่สมดุลการแยก (equilibrium extraction, $K_{ex}$ ) .....	27
2.6.3	การพิจารณาการถ่ายเทมวลจากความต้านทานในการแพร่ผ่านรวม .....	28
2.6.4	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (Permeability, $P$ ) .....	29
2.6.5	การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่และความหนืดของตัวทำละลาย .....	30
2.6.6	ร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือก .....	31
บทที่ 3	สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	32
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	34
3.2.1	การทดลองด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย .....	34



3.2.2 การทดลองด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง .....	34
3.3 วิธีการทดลอง .....	35
3.3.1 ศึกษาการสกัดแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วย การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	35
3.3.1.1 การประมาณเวลาในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม .....	36
3.3.1.2 การเลือกชนิดของสารสกัดและศึกษาความเป็นกรด-เบสของ สารละลายป้อนที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับไอออน แคดเมียม .....	36
3.3.1.3 การเลือกชนิดของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมในการนำกลับ ไอออนแคดเมียม .....	37
3.3.2 ศึกษาการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียม ซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง 1 มอดูล.....	37
3.3.2.1 เวลาปฏิบัติการ.....	37
3.3.2.2 ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสมในการแยก และการนำกลับไอออนแคดเมียม.....	38
3.3.2.3 ความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับ ไอออนแคดเมียม .....	38
3.3.2.4 ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมในการนำกลับ ไอออนแคดเมียม .....	38
3.3.3 ศึกษาการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง 1 และ 2 มอดูล.....	39
3.3.3.1 การแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง 1 มอดูล.....	39
3.3.3.2 การแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง 2 มอดูล.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	41

4.1 การแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟต	
สังเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย .....	41
4.1.1 เวลาในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม .....	41
4.1.2 ชนิดของสารสกัดและความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสม	
ในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม.....	42
4.1.3 ชนิดของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมในการนำกลับไอออนแคดเมียม ....	43
4.2 การแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟต	
สังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล.....	44
4.2.1 เวลาปฏิบัติการ .....	44
4.2.2 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการแยกและการนำกลับ	
ไอออนแคดเมียม.....	45
4.2.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการแยกและการนำกลับไอออน	
แคดเมียม .....	46
4.2.4 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออน	
แคดเมียม .....	47
4.3 การคำนวณการถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย	
เส้นใยกลวงกับผลการทดลอง .....	48
4.3.1 ค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant, $K_{ex}$ ).....	48
4.3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (permeability, $P$ ) ของไอออนแคดเมียม .....	49
4.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมในวัฏภาคสารละลาย	
ป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (mass transfer coefficients, $k_i$ , $k_m$ ). .....	49
4.4 การแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี	
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 และ 2 มอดูล .....	51
4.4.1 การแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุง	
สังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล .....	51
4.4.2 การแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุง	
สังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล .....	54
4.4.2.1 พิจารณาร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกในมอดูลตัวที่ 1	54
4.4.2.2 พิจารณาร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกในมอดูลตัวที่ 2	54

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 การคำนวณค่าคงที่เกี่ยวกับการถ่ายเทมวล.....	59
5.2 การแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	59
ข้อเสนอแนะ .....	60
รายการอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก .....	66
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ .....	67
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ .....	75
ภาคผนวก ค ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	88

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ความเข้มข้นของไอออนโลหะต่างๆ ในน้ำเสียอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี .....	2
ตารางที่ 1.2 สมบัติของแคดเมียม.....	4
ตารางที่ 1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแคดเมียม.....	8
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ.....	21
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	33
ตารางที่ 3.2 สมบัติของมอดูลเส้นใยกลวง .....	35
ตารางที่ 5.1 สรุปลักษณะที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมซัลเฟต สังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	58
ตารางที่ 5.2 ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออกจากการไหลผ่าน ครั้งที่ 1-3 ด้วย 1 และ 2 มอดูล .....	60

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	แผนผังแสดงกระบวนการถลุงแร่สังกะสีโดยสังเขป.....	1
รูปที่ 2.1	กลไกการถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกจากวัฏภาคสารละลายป้อนสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับ .....	12
รูปที่ 2.2	การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทมวลแบบทางเดียวกัน .....	14
รูปที่ 2.3	การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกัน .....	15
รูปที่ 2.4	เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน .....	16
รูปที่ 2.5	ลักษณะของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต .....	17
รูปที่ 2.6	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน .....	18
รูปที่ 2.7	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน .....	19
รูปที่ 2.8	เส้นใยกลวง 1 เส้น ภายในเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง .....	20
รูปที่ 2.9	ลักษณะการถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมจากสารละลายป้อนสู่สารละลายนำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวง 1 เส้น.....	20
รูปที่ 2.10	ปฏิบัติการแบบกะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน.....	22
รูปที่ 2.11	ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน..	23
รูปที่ 2.12	ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน โดยการต่อมอดูลเส้นใยกลวงแบบอนุกรม 2 มอดูล .....	24
รูปที่ 3.1	โครงสร้างทางเคมีของสารสกัด .....	33
รูปที่ 3.2	มอดูลเส้นใยกลวง.....	35
รูปที่ 4.1	ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับเวลาด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย .....	42
รูปที่ 4.2	ร้อยละการแยกไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	43
รูปที่ 4.3	ร้อยละการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับชนิดของสารละลายนำกลับด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	43
รูปที่ 4.4	ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับเวลาด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง .....	44

รูปที่ 4.5	ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	45
รูปที่ 4.6	ร้อยละการแยกและการนำกลับของไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	46
รูปที่ 4.7	สัมประสิทธิ์การแพร่กับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02-0.22 โมลาร์ในตัวทำละลายเคโรซีน .....	47
รูปที่ 4.8	ร้อยละการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง .....	48
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[CdA_4(HA)_2][H^+]^2$ กับ $[Cd^{2+}][HA]_2^2$ ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน.....	49
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln(C_f/C_{f,0})$ กับ เวลาที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน .....	50
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/P$ กับ $(r_f/r_{lm})([H^+]/K_{ex} [(HA)_2]^2)$ ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง 0.02-0.22 โมลาร์ .....	51
รูปที่ 4.12	ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกันในมอดูลเส้นใยกลวง 1 มอดูล.....	52
รูปที่ 4.13	ร้อยละการแยกไอออนโลหะต่างๆ กับจำนวนครั้งในการไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวง .....	53
รูปที่ 4.14	ร้อยละการนำกลับไอออนโลหะต่างๆ กับจำนวนครั้งในการไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวง .....	53
รูปที่ 4.15	ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกันในมอดูลเส้นใยกลวงที่ต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล.....	55
รูปที่ 4.16	ร้อยละการแยกแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีกับจำนวนครั้งในการไหลผ่านด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 1 โดยการต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล .....	55

รูปที่ 4.17	ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีกับจำนวนครั้งในการไหลผ่านด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 1 โดยการต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล .....	56
รูปที่ 4.18	ร้อยละการแยกแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีกับจำนวนครั้งในการไหลผ่านด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 2 โดยการต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล .....	56
รูปที่ 4.19	ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีกับจำนวนครั้งในการไหลผ่านด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 2 โดยการต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล .....	57

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

## สัญลักษณ์

$A$	พื้นที่การถ่ายเทมวล
$C_f$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนที่เวลาต่างๆ
$C_{f,o}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนที่เวลาเริ่มต้น
$C_{f,in}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาเข้า
$C_{f,out}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาออก
$C_{s,out}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับขาออก
$D$	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient)
$D^*$	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)
$D_m^*$	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
$d_i$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง
$\% E$	ร้อยละการแยก
$\% S$	ร้อยละการนำกลับ
$K_{ex}$	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัด (equilibrium constant)
$k$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient)
$k_i$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยก (แคดเมียม) ในสารละลายป้อน
$k_m$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของไอออนที่ต้องการแยก (แคดเมียม) กับสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว



$k_s$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยก (แคดเมียม) ในสารละลายนำกลับ
$L$	ความยาวของเส้นใยกลาง
$l$	ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว
$M$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ
$M_f$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน
$M_{f,i}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
$M_{s,i}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว
$M_s$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ
$N$	จำนวนเส้นใยกลางในมอดูล
$P$	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient)
$Q_f$	อัตราการไหลของสารละลายป้อน
$r_i$	รัศมีภายในของเส้นใยกลาง
$r_o$	รัศมีภายนอกของเส้นใยกลาง
$r_{lm}$	รัศมี log - mean ของเส้นใยกลาง
$[HA]$	ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA
$S$	สารสกัดชนิดซอลเวต
$T$	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
$t$	เวลา
$V$	ปริมาตรของมอดูลชุดทดลองเส้นใยกลาง

$v$	ความเร็วของสารละลายป้อนภายในท่อ
$V_A$	ปริมาตรเชิงโมลาร์ของตัวถูกละลาย
$V_f$	ปริมาตรของสารละลายป้อน

### อักษรกรีก

$\varepsilon$	ความพรุนของเยื่อแผ่นเหลว
$\tau$	ค่าความคดเคี้ยวของเส้นใยกลางในมอดูล (tortuosity)
$\pi$	ค่าคงที่ 3.1416
$\eta$	ความหนืดของสารละลายภายในเยื่อแผ่นเหลว
$\phi$	ปริมาตรสัดส่วน
$\rho$	ความหนาแน่น

### ตัวห้อย

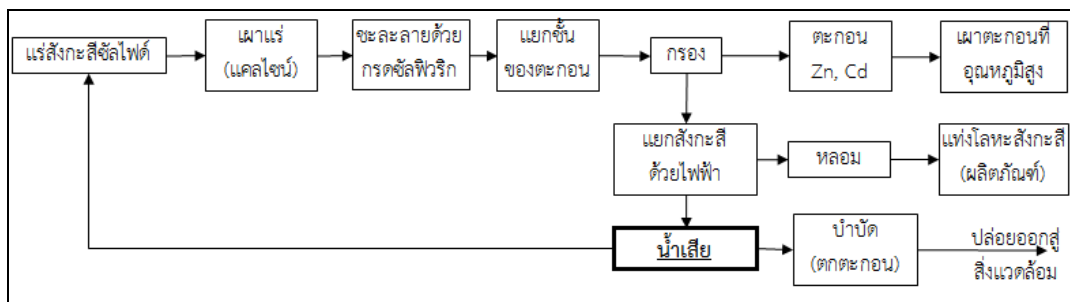
$aq$	สารละลายน้ำ
$f$	สารละลายป้อน
$s$	สารละลายนำกลับ
$m$	สารละลายเยื่อแผ่นเหลว
$mix$	สารละลายผสม
$f,i$	ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
$s,i$	ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การพัฒนาประเทศต้องการเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูง ใช้ทรัพยากรการผลิตและพลังงานต่ำ มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม การผลิตเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมและเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันของมนุษย์มีผลให้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีจำกัดลดลง และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมถ้าวิธีการบำบัดสิ่งที่ปลดปล่อยออกจากกระบวนการผลิตไม่ถูกต้อง การวิจัยและพัฒนาทางโลหวิทยาามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม สังกะสีเป็นโลหะพื้นฐานทางอุตสาหกรรมซึ่งได้จากกระบวนการถลุงแร่โดยใช้สารละลายของน้ำและสารเคมี (hydrometallurgical process) การถลุงแร่สังกะสีใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกในการชะละลายสินแร่ (leaching) ดังรูปที่ 1.1 ดังนั้นจึงพบไอออนโลหะซัลเฟตต่างๆ ในน้ำเสียของกระบวนการ



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงกระบวนการถลุงแร่สังกะสีโดยสังเขป

โดยทั่วไปมักพบโลหะแคดเมียมประมาณร้อยละ 0.5 – 1.5 ปนอยู่กับโลหะสังกะสี [1] แม้จะมีปริมาณค่อนข้างต่ำแต่แคดเมียมเป็นธาตุที่มีความเป็นพิษสูงทั้งแบบเฉียบพลันต่อระบบทางเดินอาหารและระบบทางเดินหายใจ และแบบเรื้อรังต่อระบบโลหิต กระดูก ปอด ไต [2-3] องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) กำหนดค่ามาตรฐานของแคดเมียมที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิต ดังนี้ ปริมาณฝุ่นแคดเมียมออกไซด์ในอากาศไม่เกิน 0.005 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ส่วนในพันล้านส่วน, parts per billion, ppb) ปริมาณไอออนแคดเมียมในน้ำดื่มไม่เกิน 0.003 มิลลิกรัมต่อลิตร (ส่วนในล้านส่วน, parts per million, ppm) [4] สำหรับน้ำเสียที่มีไอออนแคดเมียมซึ่งต้องการนำกลับมาใช้ใหม่ ปริมาณไอออนแคดเมียมต้องไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร [5] ทั้งนี้ปริมาณไอออนแคดเมียมตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ต้องไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร [6] แต่เนื่องจากแคดเมียมมีประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การชุบด้วย

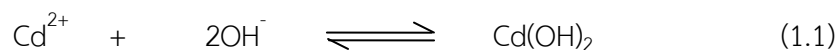
ไฟฟ้า การเคลือบแผ่นโลหะ การทำโลหะผสม การผลิตแบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม ส่วนผสมของเม็ตลีส [7] ดังนั้นการแยกและการนำกลับแคดเมียมจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีแคดเมียมปนเปื้อน ไม่เพียงแต่มีผลดีในเชิงเศรษฐศาสตร์ ยังสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การเลือกวิธีการแยกไอออนของโลหะต่างๆ ออกจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ควรพิจารณาให้เหมาะสมตามชนิดและปริมาณของโลหะนั้น

องค์ประกอบของน้ำจากกระบวนการถลุงสังกะสีมีไอออนโลหะต่างๆ เช่น แมงกานีส แมงกานีส สังกะสี และแคดเมียม ดังแสดงในตารางที่ 1.1

**ตารางที่ 1.1** ความเข้มข้นของไอออนโลหะต่างๆ ในน้ำเสียอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี

ไอออนโลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ข้อกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้ง ที่ระบายออกจากโรงงาน [6] (มิลลิกรัมต่อลิตร)
แคดเมียม	43	0.03
สังกะสี	333	5
แมงกานีส	356	5
แมงกานีส	2,180	ไม่ได้ระบุ

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีไอออนโลหะ นิยมใช้วิธีตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical precipitation) ไอออนโลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนที่ความเป็นกรด-เบสที่แตกต่างกัน ข้อจำกัดของการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้ คือ การปรับความเป็นกรด-เบส ให้เหมาะสมต่อการตกตะกอน และต้องใช้สารเคมีปริมาณมากเพื่อบำบัดให้ความเข้มข้นของไอออนโลหะหลังการบำบัดได้ตามที่ต้องการ แคดเมียมเป็นโลหะที่เกิดการตกตะกอนได้ดีในช่วงความเป็นกรด-เบสสูง การตกตะกอนด้วยสารเคมีจึงเป็นวิธีที่ยาก เพราะต้องใช้สารเคมีปริมาณมากในการปรับความเป็นกรด-เบส โดยปกติไอออนแคดเมียมที่ละลายน้ำจะอยู่ในรูปของไอออนบวกวาเลนซ์ 2 (divalent cation) แคดเมียมจะรวมตัวกับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group,  $\text{OH}^-$ ) ได้  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$  และ  $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$  แต่เมื่อความเป็นกรด-เบสสูงกว่า 9 ไอออนแคดเมียมจะอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ คือ  $\text{Cd}(\text{HO})_2$  [8] ดังสมการที่ (1.1) นอกจากนี้วิธีนี้ไม่สามารถบำบัดไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ ในระดับหนึ่งส่วนในล้านส่วน และหนึ่งส่วนในพันล้านส่วน เพราะการตกตะกอนทำได้ดีที่ความเข้มข้นสูงกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน [9]



จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้ศึกษาการแยกไอออนแคดเมียมด้วยวิธีอื่น เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) การดูดซับ (adsorption) และการแยกสลายด้วยไฟฟ้า (electrolysis) แต่ละวิธีมีข้อดี-ข้อจำกัด เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลายใช้แยกไอออนออกจากสารละลายผสม

โดยเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม การพัฒนาตัวทำละลายชนิดใหม่ๆ ที่ใช้สกัด ทำให้วิธีนี้มีความโดดเด่นยิ่งขึ้น แต่ก็มีข้อจำกัด เช่น อัตราการแยกช้า ต้องใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก [10] สำหรับการดูดซับเป็นการแยกสารด้วยตัวดูดซับที่มีรูพรุนและมีพื้นที่ในการดูดซับสูง สามารถแยกสารได้ความบริสุทธิ์สูง แต่มีข้อจำกัด เช่น มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากตัวดูดซับมีราคาแพง ต้องเปลี่ยนและต้องกำจัดตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพ และไม่สามารถนำกลับไอออนที่ต้องการได้ [11] ส่วนการแยกสลายด้วยไฟฟ้าใช้การผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังสารละลายด้วยพลังงานที่เพียงพอให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction) หรือรีดอกซ์ (redox) โดยอาศัยศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันสามารถแยกไอออนได้โลหะที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่ไม่สามารถนำกลับไอออนโลหะที่เหลืออยู่ในสารละลายได้ [12]

จากการศึกษาวิธีการแยกสารประเภทต่างๆ วิธีแยกสารด้วยเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane) ที่พัฒนาจากการแยกแบบพื้นฐานเป็นกระบวนการที่น่าสนใจ เพราะสามารถแยกและนำกลับไอออนได้ในขั้นตอนเดียวกัน สำหรับการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดต่างๆ เช่น เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane, HFSLM) มีข้อดี คือ มีพื้นที่ต่อปริมาตรสูงเมื่อเทียบกับการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่ไม่มีตัวรองรับที่มีขนาดเดียวกัน จึงมีการคัดเลือกและการถ่ายเทมวลสูง ข้อดีอื่น เช่น มีค่าใช้จ่ายต่ำเพราะใช้สารสกัด ตัวทำละลาย และสารละลายนำกลับปริมาณน้อย สามารถขยายขนาดและประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ง่าย นอกจากนี้จุดเด่นของวิธีนี้คือสามารถแยกสารที่ความเข้มข้นต่ำถึงระดับส่วนในล้านล้านส่วน (parts per trillion, ppt) [13-14] จึงเหมาะที่จะใช้แยกสารหลังจากการแยกด้วยวิธีอื่น (secondary separation unit) เพื่อให้ความเข้มข้นหลังการบำบัดได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน งานวิจัยนี้ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแยกและนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียของกระบวนการถลุงแร่สังกะสีที่มีไอออนแคดเมียมประมาณ 50 ส่วนในล้านส่วน โดยความเข้มข้นสุดท้ายของไอออนแคดเมียมไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร

## 1.2 สมบัติและความสำคัญของแคดเมียม [15]

แคดเมียมจัดเป็นธาตุในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ตัวที่ 2 ของหมู่ 2B สีเงินเทาขาว น้ำหนักเบา อ่อน ดัดโค้งได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน ไม่ค่อยพบในรูปของแคดเมียมบริสุทธิ์ แต่มักพบในรูปของสารประกอบของเกลือที่ไม่มีสี ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรด เช่น แคดเมียมซัลเฟต ( $\text{CdSO}_4$ ) แคดเมียมไนเตรต ( $\text{CdNO}_3$ ) และแคดเมียมคลอไรด์ ( $\text{CdCl}_2$ ) เป็นต้น แคดเมียมอาจรวมตัวกับสารอื่น เช่น ไฮยาไนด์ เอมีน ได้สารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ เช่น  $[\text{Cd}(\text{CN})_3]^-$ ,  $[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{2-}$  สมบัติต่างๆ ของแคดเมียมดังตารางที่ 1.2

## ตารางที่ 1.2 สมบัติของแคดเมียม [15]

เลขอะตอม	48
น้ำหนักอะตอม	112.411
จุดหลอมเหลว	320.9 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	767 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	8.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส
เลขออกซิเดชัน	+2

### 1.2.1 การค้นพบแคดเมียม [15]

ค้นพบโดย F. Strohmeyer ชาวเยอรมัน ในปี ค.ศ. 1817 จากการแยกออกไซด์ของธาตุปริมาณเล็กน้อยนี้ที่ปนกับซิงค์คาร์บอเนต ( $ZnCO_3$ ) โดยทำให้ตกตะกอนด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) แล้วรีดิวซ์ต่อไปเป็นโลหะอิสระ Strohmeyer เรียกโลหะนี้ว่า "cadmia" มาจากคำว่า calamine ซึ่งเป็นชื่อเรียกซิงค์คาร์บอเนตในสมัยนั้น

### 1.2.2 ประโยชน์ของแคดเมียม [16-17]

- เคลือบบนแผ่นเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม โดยการชุบด้วยไฟฟ้า สำหรับนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ วิทยุ อุปกรณ์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- โลหะผสมเพื่อเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการกัดกร่อน
- ผลิตแบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม (Ni-Cd) สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้าพกพา
- ใช้เป็นส่วนผสมของเม็ดสีในอุตสาหกรรมผลิตสี
- ผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์
- เป็นตัวควบคุมอัตราการแตกตัวของนิวเคลียร์ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู
- เป็นส่วนผสมในสารฆ่าเชื้อราในงานเกษตรกรรม

### 1.2.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม [15]

มีการรายงานไว้อย่างชัดเจนถึงผลกระทบและความเป็นพิษต่อมนุษย์ทั้งแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง โรคที่เกิดจากพิษของแคดเมียมรู้จักกันในชื่อ อีไต-อีไต (Itai Itai disease) พบครั้งแรกที่ประเทศญี่ปุ่น แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้โดยผ่านทางน้ำและอาหารที่อยู่ในภาวะบรรจุที่มีแคดเมียมเป็นส่วนผสม การสะสมของแคดเมียมในร่างกายในปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดโรคมะเร็ง

### 1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา

#### 1.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแคดเมียม

Reddy et al. [16] ศึกษาการแยกไอออนแคดเมียมจากสารละลายซัลเฟตโดยใช้การสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดในตัวทำละลายโครซินที่ใช้ คือ TOPS 99, PC 88A, Cyanex 272 และสารสกัดแบบผสม ใช้เวลา 5 นาที ที่จะถึงสมดุลการสกัด และ 10 นาที เพื่อการแยกชั้นระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและสารสกัด พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOPS 99, PC 88A และ Cyanex 272 เพิ่มจาก 0.02 เป็น 0.04 โมลาร์ ร้อยละการสกัดไอออนแคดเมียมสูงขึ้น 85.0, 83.4 และ 82.1 ตามลำดับ สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกมีค่าการนำกลับสูงกว่าสารละลายนำกลับกรดไฮโดรคลอริกเมื่อใช้สารสกัด TOPS 99 และ PC 88A และสารละลายนำกลับกรดไฮโดรคลอริกมีค่าการนำกลับสูงกว่าสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกเมื่อใช้สารสกัด Cyanex 272

Parhi et al. [18] ศึกษาการแยกไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ สารสกัดในตัวทำละลายโครซินที่ใช้ คือ D2EHPA, PC 88A และ Cyanex 272 ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารสกัด และผลที่ศึกษา คือ ค่าพลาซิกการแยกและสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแคดเมียม พบว่าภาวะที่สามารถแยกไอออนแคดเมียมได้สูงสุด คือ ความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนเท่ากับ 7.5 และความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA และ PC 88A เท่ากับ 600 โมลต่อลูกบาศก์เมตร และ Cyanex 272 เท่ากับ 800 โมลต่อลูกบาศก์เมตร ความสามารถในการแยกไอออนแคดเมียมของสารสกัด คือ D2EHPA > PC 88A > Cyanex 272 ร้อยละการแยกโดยใช้สารสกัด D2EHPA เท่ากับ 65.61 และพบว่าเมื่อใช้สารสกัด D2EHPA, PC 88A และ Cyanex 272 ค่าพลาซิกของการแยกไอออนแคดเมียมสูงสุดเท่ากับ  $1.132 \times 10^{-5}$ ,  $0.95 \times 10^{-5}$  และ  $0.89 \times 10^{-5}$  โมลต่อตารางเมตร-วินาที ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแคดเมียมสูงสุดเท่ากับ  $2.53 \times 10^{-9}$ ,  $5.435 \times 10^{-9}$  และ  $11.22 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

Kumar et al. [19] ศึกษาการแยกไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดในตัวทำละลายโครซินที่ใช้ คือ Cyanex 923, Cyanex 272 และ D2EHPA ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัด และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ ความสามารถในการแยกไอออนแคดเมียมของสารสกัด คือ D2EHPA > Cyanex 272 > Cyanex 923 ภาวะที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นของ D2EHPA ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโครซิน ใช้เวลา 5 นาที ที่จะถึงสมดุลการสกัด และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 180 กรัมต่อลิตร สามารถนำกลับไอออนแคดเมียมได้เกือบทั้งหมด

### 1.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแคตเมียมจากสารละลายไอออนผสม

Sato et al. [20] ศึกษาการสกัดของไอออนโลหะประจุ(II) ได้แก่ แมงกานีส โคบอลต์ ทองแดง สังกะสี และแคตเมียม จากสารละลายคลอไรด์ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดที่ใช้ คือ Aliquat 336 และ TOA ในตัวทำละลายเบนซีน พบว่าสารสกัด Aliquat 336 สามารถแยกไอออนโลหะประจุ(II) ได้ดีกว่า TOA ซึ่งความสามารถในการแยกที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่ำกว่า 1 โมลต่อลิตร คือ ไอออนแคตเมียม > สังกะสี >> ทองแดง โคบอลต์ และ แมงกานีส สำหรับที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร คือ ไอออนแคตเมียม > สังกะสี > ทองแดง > โคบอลต์ > แมงกานีส และที่ความเข้มข้น 7 โมลต่อลิตร คือ ไอออนแคตเมียม > สังกะสี > โคบอลต์ > ทองแดง > แมงกานีส

Reddy et al. [21] ศึกษาการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียม นิกเกิล และ โคบอลต์ จากสารละลายคลอไรด์จากน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่นิกเกิล-แคตเมียม ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัด สารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีนที่ใช้ ได้แก่ TOPS 99, PC 88A, Cyanex 923 และ Cyanex 272 พบว่าสารสกัด Cyanex 923 สามารถแยกแบบคัดเลือกไอออนแคตเมียมออกจากนิกเกิลและโคบอลต์ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารสกัดจาก 0.1 เป็น 0.6 โมลาร์ ร้อยละการแยกไอออนแคตเมียมเพิ่มจาก 29 เป็น 96.5 โดยถือว่าไม่เกิดการแยกไอออนโคบอลต์และนิกเกิล

Swain et al. [22] ศึกษาการแยกไอออนแคตเมียมและสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ สารสกัดที่ใช้ คือ TOPS 99 ในตัวทำละลายเคโรซีน ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของเกลือในสารละลายป้อน ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมไนเตรด ( $\text{NaNO}_3$ ) โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) โซเดียมแอสซิเตต ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ) โซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ ) และโซเดียมคลอเรต ( $\text{NaClO}_3$ ) ที่ความเข้มข้น 0-1,000 โมลต่อลูกบาศก์เมตร ค่าพลาสิกซ์ของการแยกไอออนสังกะสีลดลง แต่ค่าพลาสิกซ์ของการแยกไอออนแคตเมียมคงที่ เนื่องจากความแตกต่างของไอออนลบทำให้เกิดการรวมตัวกับสารสกัดเป็นไอออนเชิงซ้อนที่ต่างกัน ค่าพลาสิกซ์ของการแยกไอออนสังกะสีเมื่อมีการเติมเกลือในสารละลายป้อน คือ โซเดียมคลอไรด์ > โซเดียมไทโอไซยาเนต > โซเดียมแอสซิเตต > โซเดียมไนเตรด > โซเดียมซัลเฟต > โซเดียมคลอเรต โดยค่าพลาสิกซ์และความสามารถในการแยกไอออนสังกะสีสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อไม่เติมเกลืออิเล็กโทรไลต์ (electrolyte salts)

Mortahab et al. [23] ศึกษาการแยกไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันโดยใช้สารสกัด TIOA ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดและความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 3 ชนิด ได้แก่ กรดแอสติค กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก และชนิดของตัวทำละลาย 3 ชนิด ได้แก่ โทลูอีน ไซโครเฮกเซน และเคโรซีน พบว่ากรดแอสติคที่ความเป็นกรด-เบส 2.4 สามารถแยกไอออนแคตเมียมได้สูงที่สุด เนื่องจากกรดแอสติคเป็นกรดอ่อนจึงแตกตัวให้



ไอออนไฮโดรเจนได้ช้ากว่ากรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริกซึ่งเป็นกรดแก่ ส่วนตัวทำละลายทั้งสามชนิดให้ค่าการแยกแคดเมียมที่มีความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 1 เนื่องจากตัวทำละลายทั้งหมดเป็นสารไม่มีขั้วจึงไม่ขัดขวางการแพร่ของไอออนแคดเมียม

### 1.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแมกนีเซียม

Tsakiridis and Agatzini [24] ศึกษาการแยกไอออนโคบอลต์และนิกเกิลจากสารละลายซัลเฟตที่ประกอบด้วยไอออนโคบอลต์ นิกเกิล แมงกานีส และแมกนีเซียม ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดที่ใช้คือ Cyanex 301 ในตัวทำละลาย Exxsol D-80 ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด และอุณหภูมิการสกัด โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายนำกลับ พบว่าที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 2.0 ความเข้มข้นของสารสกัดร้อยละ 20 โดยปริมาตร และอุณหภูมิการสกัด 50 องศาเซลเซียส สามารถแยกไอออนโคบอลต์และนิกเกิลจากสารละลายผสมได้ร้อยละ 99.9 และ 99.7 ตามลำดับ

Tsakiridis and Agatzini [25] ศึกษาการแยกและการนำกลับไอออนอะลูมิเนียมจากสารละลายซัลเฟตที่ประกอบด้วยไอออนโคบอลต์ นิกเกิล และแมกนีเซียมด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดที่ใช้ คือ Cyanex 272 ในตัวทำละลาย Exxsol D-80 ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด และอุณหภูมิการสกัด พบว่าที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 3.0 ความเข้มข้นของสารสกัดร้อยละ 20 โดยปริมาตร และอุณหภูมิการสกัด 40 องศาเซลเซียส สามารถแยกไอออนอะลูมิเนียมได้ร้อยละ 99.5 และไม่เกิดการแยกไอออนนิกเกิล

Yu and Liu [26] ศึกษาการแยกไอออนแมกนีเซียมจากสารละลายกรดฟอสฟอริกด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดที่ใช้ คือ DNNSA ในตัวทำละลายเคโรซีน ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของตัวทำละลาย ได้แก่ เฮกเซน เคโรซีน ฟีนอกซิล และคลอโรฟอร์ม เวลาและอุณหภูมิการสกัด พบว่าเฮกเซนสามารถแยกไอออนแมกนีเซียมได้ดีที่สุด เมื่อเพิ่มเวลาการสกัดจาก 10 เป็น 40 นาที พบว่าร้อยละการแยกเพิ่มจาก 48.13 เป็น 68.65 และเมื่อใช้อุณหภูมิการสกัด 298-313 เคลวิน พบว่าแยกไอออนแมกนีเซียมได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อุณหภูมิสูงจะสูญเสียตัวทำละลายจากการระเหย ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 298-303 เคลวิน

### 1.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแมงกานีส

Sato and Nakamura [27] ศึกษาการสกัดไอออนโลหะประจุ(II) ได้แก่ แมงกานีส โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง สังกะสี แคดเมียม และปรอท จากสารละลายกรดซัลฟิวริกด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดที่ใช้ คือ D2EHPA พบว่าความสามารถในการแยกไอออนสังกะสี > แคดเมียม > แมงกานีส > ทองแดง > โคบอลต์ > นิกเกิล > ปรอท และสัมประสิทธิ์การกระจายตัวขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายกรดและสารสกัด D2EHPA

Devi and Mishra [28] ศึกษาสมมูลการแยกไอออนแมงกานีสด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้สารสกัด Cyanex 302 ในตัวทำละลายเคโรซีน ปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารสกัด เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจาก 0.025 เป็น 0.10 โมลาร์ พบว่าสามารถแยกไอออนแมงกานีสได้มากขึ้น กลไกการแยกเกิดจากออกซิเจนและกำมะถันในสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์

Sousa Jr. et al. [29] ศึกษาสมมูลการแยกไอออนแมงกานีสในสารละลายซัลเฟตด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายไอโซพาราฟิน (17/21) เมื่อใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์และการปรับแต่งสมการของ Davie ศึกษาความเข้มข้นและความเป็นกรด-เบสของไอออนแมงกานีสในสารละลายป้อน พบว่าการทำนายผลโดยใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์มีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่เกิดขึ้น

Pakarinen and Paatero [30] ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการแยกไอออนแมงกานีสและแคลเซียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโลหะด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย สารสกัดที่ใช้คือ D2EHPA และ Cyanex 272 ในตัวทำละลาย Exxsol D-80 พบว่าสารสกัดที่เหมาะสมสำหรับการแยกแบบคัดเลือกไอออนแมงกานีสและแคลเซียม คือ Cyanex 272 และ D2EHPA ตามลำดับ

**ตารางที่ 1.3** งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแคดเมียม

ปี	นักวิจัย	วิธีการ	สารละลายป้อน	สารสกัด	ตัวทำละลาย	อ้างอิง
1984	Sato et al.	SE <sup>a</sup>	MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O/HCl, CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O/HCl, CuCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O/HCl, ZnCl <sub>2</sub> /HCl, CdCl <sub>2</sub> .2.5H <sub>2</sub> O/HCl	Aliquat 336	เบนซีน	[20]
2004	Reddy et al.	SE <sup>a</sup>	Cd/ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	TOPS 99, PC 88A, Cyanex 272	เคโรซีน	[16]
2005	Reddy et al.	SE <sup>a</sup>	Cd/HCl Ni/HCl Co/HCl	TOPS 99, PC 88A, Cyanex 923, Cyanex 272	เคโรซีน	[21]

ตารางที่ 1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกไอออนแคดเมียม (ต่อ)

ปี	นักวิจัย	วิธีการ	สารละลายป้อน	สารสกัด	ตัวทำละลาย	อ้างอิง
2006	Swain et al.	SLM <sup>b</sup>	ZnSO <sub>4</sub> , 3CdSO <sub>4</sub> .8H <sub>2</sub> O/NaCl, NaNO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaClO <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> COONa, NaSCN	TOPS 99	เคโรซีน	[22]
2009	Parhi et al.	SLM <sup>b</sup>	CdSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NaOH	D2EHPA, PC 88A, Cyanex 272	เคโรซีน	[18]
2009	Kumar et al.	SE <sup>a</sup>	CdSO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O	D2EHPA, Cyanex 923, Cyanex 272	เคโรซีน	[19]
2009	Mortaheb et al.	ELM <sup>c</sup>	Cd/HI, HCl	TIOA	โทลูอิน	[23]

#### หมายเหตุ

- a SE คือ การสกัดด้วยตัวทำละลาย
- b SLM คือ การแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane)
- c ELM คือ การแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (emulsion liquid membrane)
- d HFSLM คือ การแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ และจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

#### 1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายสำหรับกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงได้แก่ เวลา ชนิดของสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีน (D2EHPA และ Cyanex 923)

ชนิดของสารละลายนำกลับ (สารละลายกรดแอสติก ซัลฟิวริก และน้ำกลั่น) และความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน

1.5.2 ศึกษาปัจจัยและภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากสารละลายแคตเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล ดังนี้

1. เวลาปฏิบัติการ
2. ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 1.5-6.5
3. ความเข้มข้นของสารสกัด 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน
4. ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 1-6

1.5.3 ศึกษาการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีผ่าน 1 มอดูล

1.5.4 ศึกษาการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีผ่าน 2 มอดูล

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.6.1 องค์ความรู้ในการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1.6.2 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี ซึ่งช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการได้รับสารพิษ

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 เยื่อแผ่นเหลว

การแยกไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane extraction) เป็นกระบวนการแยกตัวถูกละลายหรือองค์ประกอบที่ละลายได้ โดยใช้สารสกัดเป็นตัวนำพาที่ละลายอยู่ในวัฏภาคที่แตกต่างกัน การแยกเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อนละลายในตัวทำละลายในขณะที่ยังคงอยู่ในวัฏภาคเริ่มต้น ส่วนการนำกลับจะเกิดขึ้นคล้ายกับการแยกโดยองค์ประกอบที่ต้องการนำกลับทำปฏิกิริยานำกลับกับสารละลายนำกลับเข้าสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับ โดยที่การแยกและการนำกลับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

วัฏภาคหลักในการแยกองค์ประกอบ คือ

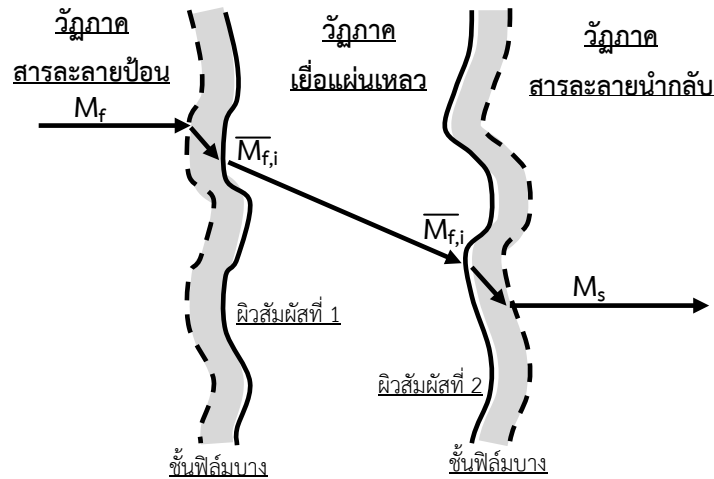
1. วัฏภาคสารละลายป้อน (feed phase) เป็นส่วนที่มีองค์ประกอบของไอออนที่ต้องการแยกละลายอยู่

2. วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) เป็นส่วนที่ประกอบด้วยสารสกัด (extractant) ละลายในตัวทำละลายกันอยู่ระหว่าง 2 วัฏภาค ดังนั้นเยื่อแผ่นเหลวมีหน้าที่หลัก คือ แยกวัฏภาคทั้ง 2 ไม่ให้ผสมกัน และเลือกผ่านเฉพาะไอออนที่ต้องการในตัวถูกละลาย

3. วัฏภาคสารละลายนำกลับ (stripping phase) ทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวและนำกลับองค์ประกอบที่ต้องการ (recovery) จากสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนที่ต้องการแยกกับสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

#### 2.2 กลไกการถ่ายเทมวล

ขั้นตอนการแยกและการนำกลับไอออนเริ่มต้นจากองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อน ( $M_f$ ) แพร่สู่วิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $M_{f,i}$ ) (โดยสัญลักษณ์ขีดบนหมายถึงอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์) จากนั้นแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ทำปฏิกิริยานำกลับกับสารละลายนำกลับ แยกตัวออกมาละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายนำกลับ ( $M_s$ ) ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบของสารที่ต้องการ จากวัฏภาคสารละลายป้อนผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับได้ ดังรูปที่ 2.1

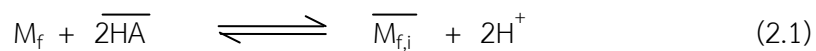


**รูปที่ 2.1** กลไกการถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกจากภูมิภาคสารละลายป้อนสู่ภูมิภาคสารละลายนำกลับ

ขั้นตอนการแยกและการนำกลับไอออนที่ต้องการด้วยเยื่อแผ่นเหลวมี 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ไอออนที่ต้องการแยกอยู่ในภูมิภาคของสารละลายป้อน ( $M_f$ ) แพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางสู่บริเวณผิวสัมผัสที่ 1 ซึ่งเป็นผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ด้วยแรงขับเคลื่อนจากความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient)

ขั้นตอนที่ 2 ไอออนที่ต้องการแยกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ 1 เกิดปฏิกิริยาการแยกกับสารสกัด  $(\overline{HA})_2$  เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนที่ต้องการแยก  $\overline{M}_{f,i}$  และไอออนไฮโดรเจน ( $2H^+$ ) ซึ่งปฏิกิริยาการแยกดังสมการที่ (2.1)



ขั้นตอนที่ 3 ไอออนเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนที่ต้องการแยกเกิดขึ้น ณ บริเวณผิวสัมผัสที่ 1 ( $\overline{M}_{f,i}$ ) แพร่ผ่านภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวไปสู่ผิวสัมผัสที่ 2 ด้วยแรงขับเคลื่อนจากความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน

ขั้นตอนที่ 4 ไอออนเชิงซ้อนที่บริเวณผิวสัมผัสที่ 2 เกิดปฏิกิริยานำกลับกับสารละลายนำกลับ ทำให้ไอออนที่ต้องการแยกละลายออกไปยังภูมิภาคสารละลายนำกลับ เกิดเป็นไอออนที่ต้องการแยกละลายในภูมิภาคสารละลายนำกลับ และสารสกัดจะแพร่กลับไปยังผิวสัมผัสที่ 1 ด้วยแรงขับเคลื่อนจากความแตกต่างของความเข้มข้น และเกิดปรากฏการณ์นี้ซ้ำไปซ้ำมา ซึ่งปฏิกิริยาการนำกลับดังสมการที่ (2.2)



ขั้นตอนที่ 5 ไอออนที่ต้องการแยกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ 2 แพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับ ด้วยความแตกต่างความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกกับไอออนที่ถูกนำกลับ

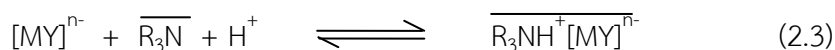
จากกลไกข้างต้นแรงขับเคลื่อนของความแตกต่างของความเป็นกรด-เบส (pH gradient) และความแตกต่างของความเข้มข้นทำให้กระบวนการแยกและการนำกลับไอออนที่ต้องการแยกเกิดปรากฏการณ์ซ้ำไปมาอย่างต่อเนื่อง

การถ่ายเทมวลแบบอาศัยสารสกัดเป็นตัวพาสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การถ่ายเทมวลแบบทางเดียวกัน และการถ่ายเทมวลแบบสวนทาง โดยการถ่ายเทมวลในแต่ละแบบนี้ขึ้นอยู่กับ การเกิดปฏิกิริยาการแยกในการเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนระหว่างไอออนในสารละลายป้อนกับสารสกัด

### 2.2.1 การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน (co-transport)

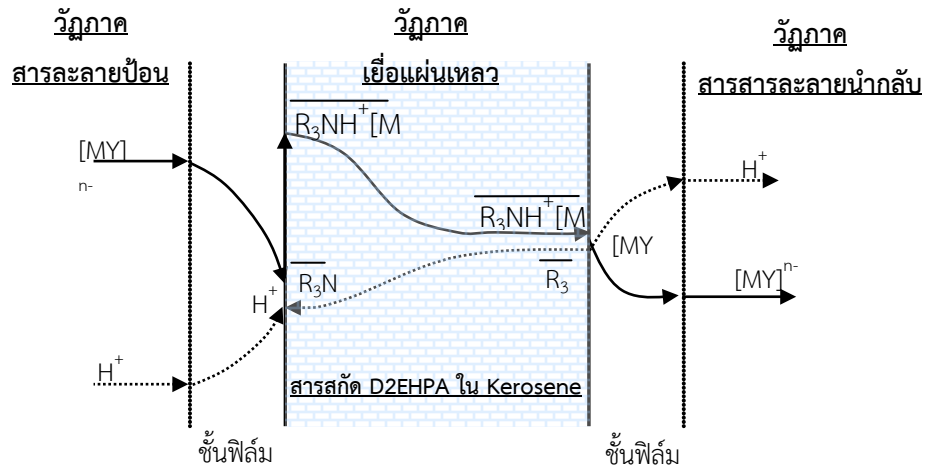
การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน คือ การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกพร้อมกับไอออนไฮโดรเจนในวัฏภาคสารละลายป้อนเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนภายในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันอธิบายได้ ดังนี้

ไอออนที่ต้องการแยกในรูปประจุลบ  $[MY]^{n-}$  กับไอออนไฮโดรเจน ( $H^+$ ) ในวัฏภาคสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดเบส ( $\overline{R_3N}$ ) ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน ( $\overline{R_3NH^+[MY]^{n-}}$ ) ดังสมการการแยกที่ (2.3)



ไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว แพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อน เป็นแรงขับไปยังด้านผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้ไอออนเชิงซ้อนจะเกิดปฏิกิริยานำกลับเป็นไอออนไฮโดรเจน และไอออนที่ต้องการแยกออกมาอยู่ในวัฏภาคสารละลายนำกลับ และได้สารสกัดมาอยู่ภายในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและแพร่ไปยังด้านวัฏภาคสารละลายป้อนอีกเพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการในวัฏภาคสารละลายป้อนวนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.2 และสมการการนำกลับ (2.4)



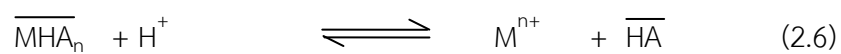
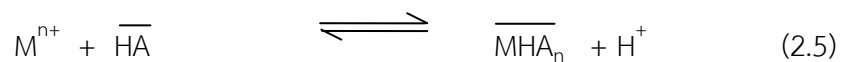


รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกัน

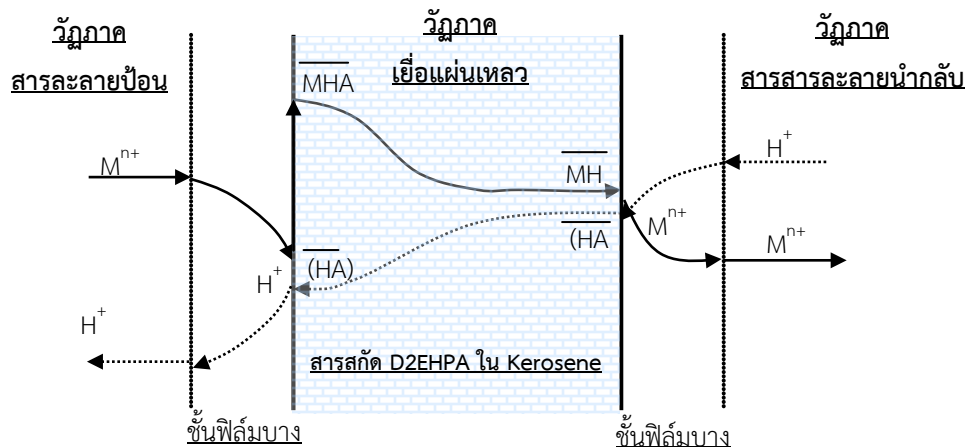
2.2.2 การถ่ายเทมวลแบบสวนทางกัน (counter-transport)

การถ่ายเทมวลแบบสวนทางกัน คือ การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการในวัฏภาคสารละลายป้อนกับไอออนไฮโดรเจนที่ใช้ในการเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่แบบสวนทางกันอธิบายได้ ดังนี้

ไอออนที่ต้องการประจุบวก ( $M^{n+}$ ) ที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรด ( $\overline{HA}$ ) ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน ( $\overline{MHA}_n$ ) ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและไอออนไฮโดรเจน ( $H^+$ ) ในวัฏภาคสารละลายป้อน ดังสมการการสกัดที่ (2.5) ไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจากผลต่างความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อน เป็นแรงขับไปยังด้านผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้ไอออนเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยานำกลับกับไอออนไฮโดรเจนในวัฏภาคสารละลายนำกลับ และถ่ายเทมวลไอออนที่ต้องการไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับ จากนั้นสารสกัดจะทำปฏิกิริยาแยกกับไอออนที่ต้องการในวัฏภาคสารละลายป้อนเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน โดยการรับไอออนที่ต้องการแยกจากวัฏภาคสารละลายป้อนและปล่อยไอออนไฮโดรเจนสู่วัฏภาคสารละลายป้อน ดังสมการการนำกลับที่ (2.6) จึงทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสวนทางกันระหว่างไอออนที่ต้องการและไอออนไฮโดรเจน และจะเกิดขึ้นวนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.3







รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกัน

## 2.3 ประเภทของเยื่อแผ่นเหลว

เยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

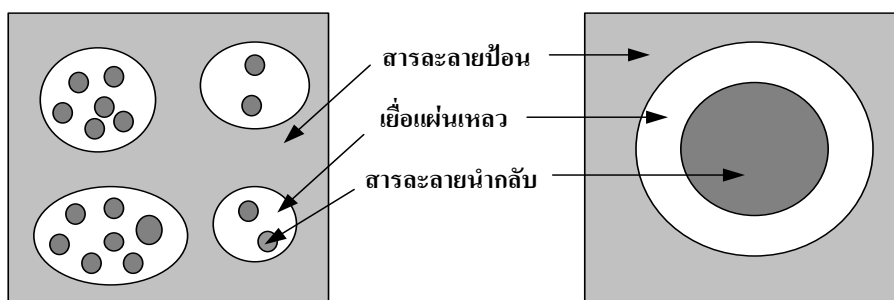
1. เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่มีตัวรองรับ (unsupported liquid membrane) เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ จะไม่มีตัวรองรับกั้นระหว่างวัฏภาคทำให้ชั้นเยื่อแผ่นเหลวไม่มีความแข็งแรง การกั้นไม่ให้วัฏภาคทั้ง 2 รวมตัวกันเกิดขึ้นจากการสร้างชั้นเองจึงทำให้เกิดความซับซ้อนมากขึ้น

2. เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับ (supported liquid membrane) ใช้ตัวรองรับที่เป็นพอลิเมอร์ ที่มีรูพรุนเป็นตัวรองรับ โดยเยื่อแผ่นเหลวจะถูกตรึงไว้ในรูพรุนด้วยแรงคาпилลารี (capillary force) [31-32] ทำให้ชั้นเยื่อแผ่นเหลวมีความแข็งแรงมากขึ้น ตัวรองรับชนิดนี้มีหลายแบบได้แก่ แบบแผ่นแบน (flash sheet) แบบแผ่นม้วน (spiral-wound) และแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber)

### 2.3.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่มีตัวรองรับ (unsupported liquid membrane)

#### 2.3.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (emulsion liquid membrane, ELM)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้สารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์อยู่ภายในซึ่งเป็นลักษณะวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง และจะเกิดการถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการไปอยู่ในวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.4 การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน โดยนำสารละลายนำกลับผสมกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะต้องไม่ละลายกัน จากนั้นนำไปปั่นจนผสมด้วยความเร็วสูงเพื่อให้วัฏภาคสารละลายนำกลับเป็นเม็ดเล็กๆ ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันจะมีความเสถียรต่ำ จึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิว เพื่อเพิ่มความเสถียรในการเกิดอิมัลชัน



รูป 2.4 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน [33]

การแยกด้วยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการแยกในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนจากนั้นแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้ไอออนเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยานำกลับกับสารละลายนำกลับได้ไอออนที่ต้องการในสารละลายนำกลับ และสารสกัดกลับมายังสารละลายเยื่อแผ่นเหลว และแพร่กลับไปสู่ผิวด้านสารละลายป้อนเพื่อทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยกต่อไป เมื่อเกิดการแยกแล้วองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจะไปอยู่ในสารละลายนำกลับ และแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน โดยการนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันที่ผ่านการแยกแล้วไปแยกวัฏภาคภายในออกเป็นสารละลายผลิตภัณฑ์ ส่วนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

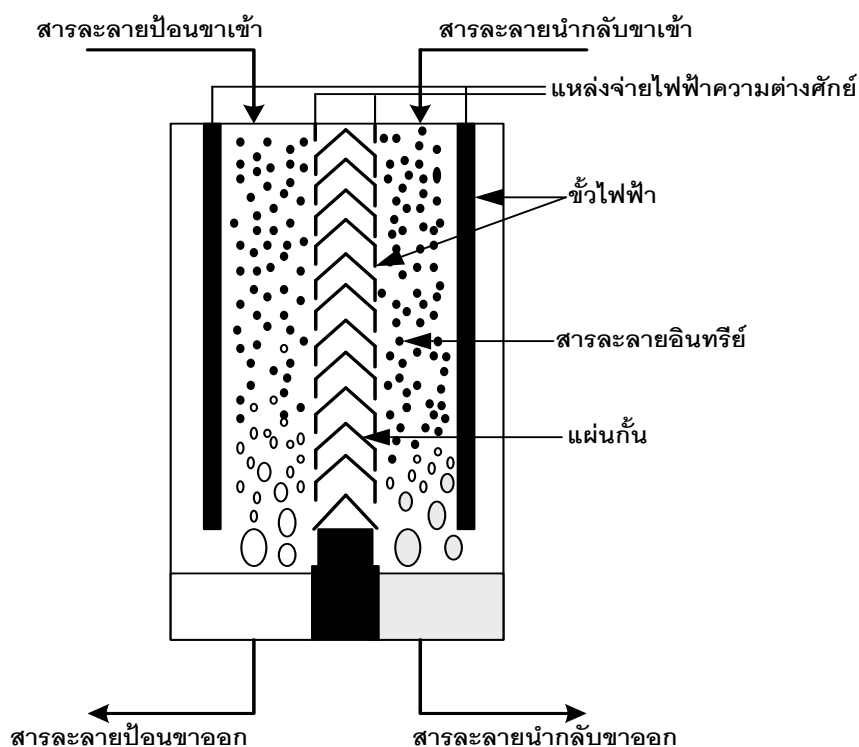
ชนิดของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในสารอินทรีย์ (water in oil emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ
2. เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของสารอินทรีย์ในน้ำ (oil in water emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นสารอินทรีย์

### 2.3.1.2 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต

(electrostatic pseudo – liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตพัฒนาจากการรวมเทคนิคการแยกด้วยตัวทำละลายแบบคอลัมน์ (ชนิดหอสกัดแบบหยด) โดยใช้หลักไฟฟ้าสถิตและเทคนิคการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้ เช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน ความเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว และการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ โดยลักษณะการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต [34]

อุปกรณ์ของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเซลล์แยก และส่วนของเซลล์นำกลับที่มีแผ่นกั้น (baffle plates) เป็นโลหะรูปตัวอักษร V คว้าเรียงต่อกันเว้นช่องว่าง และมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่าๆ กัน ซึ่งมีลวดโลหะยึดแต่ละแผงไว้และใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะที่สำหรับแบ่งกั้นวัฏภาคระหว่างสารละลายป้อนขาออก (raffinate) กับสารละลายนำกลับขาออก ระหว่างเซลล์แยกและเซลล์นำกลับมีแท่งขั้วไฟฟ้า (electrode) จุ่มแช่อยู่ ซึ่งต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต ขั้นตอนการดำเนินการเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์จนได้ระดับของปริมาตรที่ต้องการ โดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี้จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต จากนั้นป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นในแต่ละวัฏภาค จึงทำให้เกิดการแยกและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตเป็นปัจจัยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงขึ้น หากมีหยดของสารละลายป้อนหรือสารละลายนำกลับหลุดกลับเข้าไปในช่องของแผ่นกั้นระหว่างวัฏภาคทั้ง 2 หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนที่รวมกันได้เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตมีความต่างศักย์สูง และส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดของวัฏภาคสารละลายเป็นรูปทรงยืดยาวออกเป็นรูปทรงรีเนื่องจากความเป็นขั้วทางไฟฟ้า (polarization) ของวัฏภาคสารละลาย ดังนั้นเมื่อมีหยดของวัฏภาคของสารละลายซึ่งอยู่

ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตจะรวมกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาคสารละลายกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ที่จะส่งผลให้วัฏภาคทั้ง 2 เคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ อีกทั้งยังมีแผ่นกั้นที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษซึ่งจะช่วยให้หยดของวัฏภาคที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้น ให้รวมตัวกันเองและตกกลับไปยังเซลล์ตามเดิม

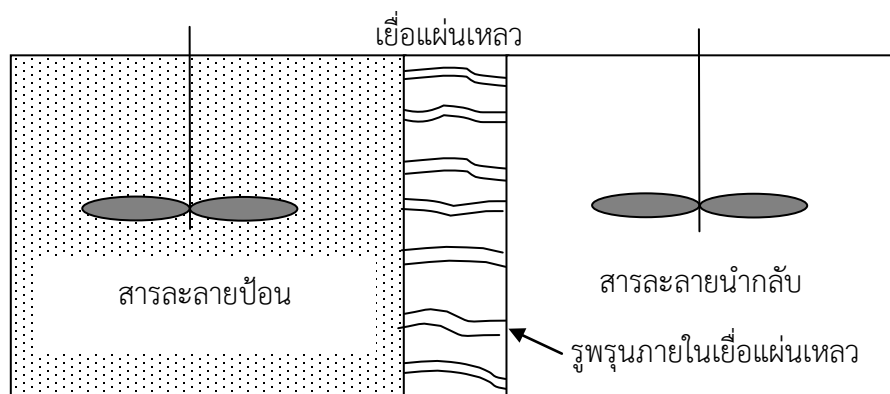
เทคนิคการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตมีข้อดีอยู่มากมาย เช่น มีประสิทธิภาพในการแยกและการนำกลับสูง การปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคต่ำซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านชั้นเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรไม่สูง วัฏภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ ใช้กับกระบวนการที่วัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น ระบบการแยกมีอัตราการไหลของวัฏภาคต่างๆ ในกระบวนการต่ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในการแยก และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง

### 2.3.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane)

#### 2.3.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน

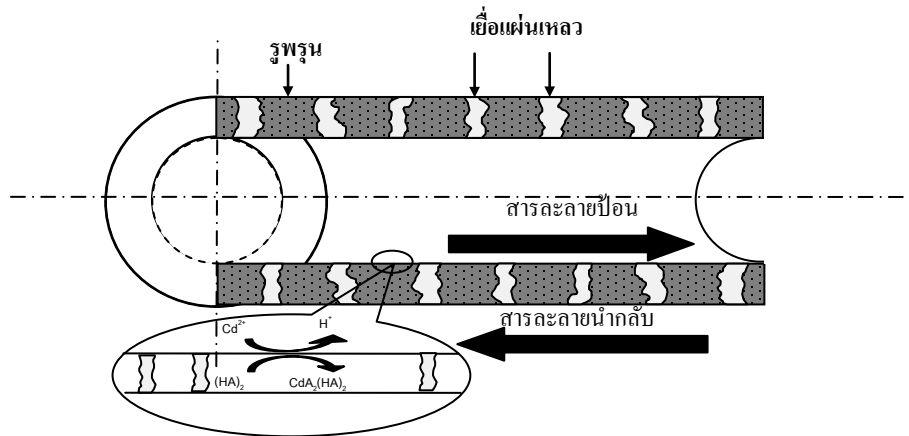
##### (flat sheet supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน เหมาะในการนำมาศึกษา กลไกการถ่ายเทมวลเนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่ไม่ซับซ้อน มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดน้อยทำให้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อยส่งผลให้เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวน้อย แสดงดังรูป 2.6



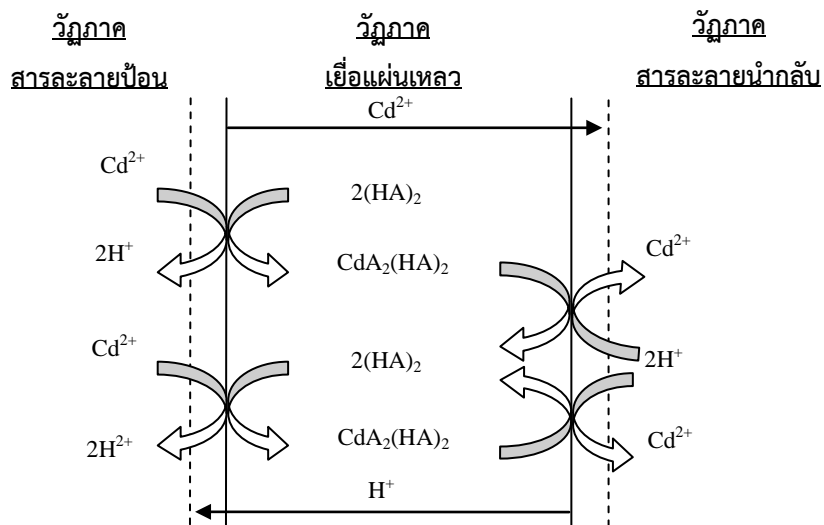
รูปที่ 2.6 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน [35]





รูปที่ 2.8 เส้นใยกลวง 1 เส้น ภายในเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การเตรียมกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง เยื่อแผ่นเหลวจะถูกยึดตรึงไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นชั้นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลบบนตัวรองรับ เมื่อนำตัวรองรับมาขึ้นระหว่างภูมิภาคของสารละลายป้อนและภูมิภาคของสารละลายนำกลับที่ไม่ละลายกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ตัวรองรับเส้นใยกลวงจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทไอออนที่ต้องการจากภูมิภาคสารละลายป้อนทำปฏิกิริยาการแยกกับสารสกัดในชั้นเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน จากนั้นไอออนเชิงซ้อนเกิดปฏิกิริยานำกลับกับสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคของสารละลายนำกลับ และไอออนที่ต้องการแยกจะแพร่เข้าสู่สารละลายนำกลับ ดังรูปที่ 2.9 โดยตัวรองรับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำ



รูปที่ 2.9 ลักษณะการถ่ายเทมวลของไอออนแคตเมียมจากสารละลายป้อนสู่สารละลายนำกลับ เมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวง 1 เส้น

ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง

- ค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูง
- อัตราการถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดเดียวกัน
- สามารถเพิ่มความเข้มข้น และความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย
- สามารถแยกสารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าสูง
- มูลค่าการลงทุน และการดำเนินการต่ำ
- สามารถดัดแปลงหรือขยายขนาดได้ง่าย

จะเห็นได้ว่าเทคนิคการแยกด้วยวิธีต่างๆ ล้วนมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ตามลักษณะการใช้งาน และพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงได้เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสีย ของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่ารูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานและศึกษามากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากกว่าชนิดอื่นๆ [13] เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูง การลงทุนและการดำเนินการต่ำ และสามารถดัดแปลงหรือขยายขนาดได้ง่าย [35-37]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ [36]

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต		เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับ	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
สัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง	ใช้สารอินทรีย์ปริมาณสูง	มีเสถียรภาพสูง	กำลังการผลิตต่ำ	ค่าการคัดเลือกสูง	สัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ
กำลังการผลิตสูง	ใช้พลังงานสูง	ประสิทธิภาพสูง	สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขี้ต่ำ	ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ
กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน	ปัญหาการปนเปื้อน	การปนเปื้อนต่ำ	สารอินทรีย์ต้องเป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น	ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ	การสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว
	ปัญหาการใช้สารลดแรงตึงผิว และการบำบัด	ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก	ใช้พลังงานต่ำ	

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (ต่อ)

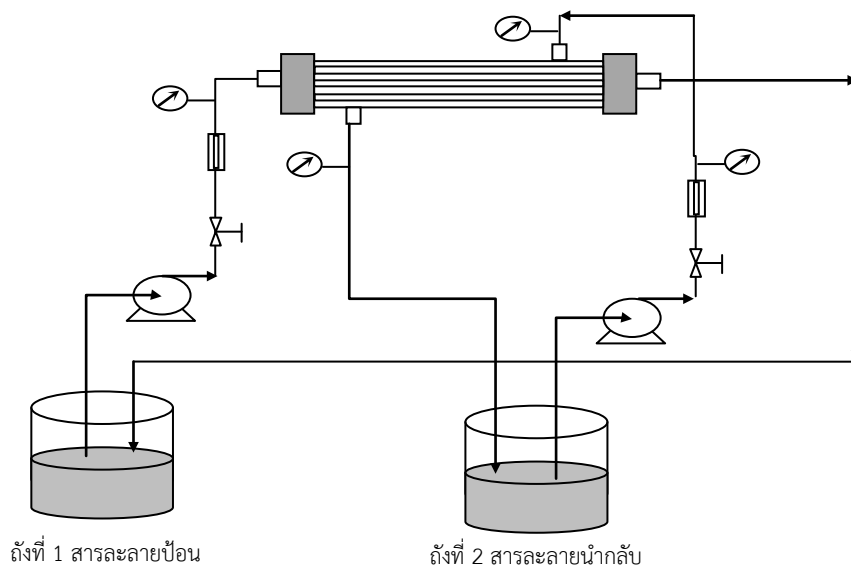
เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต		เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับ	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
				ขยายขนาดง่าย	
				อัตราการถ่ายเทมวลสูง	

## 2.4 รูปแบบการปฏิบัติการ (operation mode)

การปฏิบัติการผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เป็นการไหลผ่านของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับโดยแบ่งรูปแบบการปฏิบัติการได้ 2 รูปแบบ คือ

### 2.4.1 ปฏิบัติการแบบกะ (batch operation mode)

การปฏิบัติการแบบกะใช้สารละลายป้อน 1 ถัง และสารละลายนำกลับ 1 ถัง โดยให้การไหลของสารละลายป้อนเข้าในฝั่งท่อไหลผ่านมอดูลและขาออกไหลวนอยู่ในถังเดียวกัน และสารละลายนำกลับเข้าไหลผ่านมอดูลฝั่งเปลือกและขาออกไหลวนอยู่ในถังเดียวกัน ในทิศทางตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.10 การปฏิบัติการแบบนี้มักใช้เมื่อมีสารละลายป้อนปริมาณน้อยๆ ข้อดี คือ สามารถแยกไอออนที่ต้องการออกจากสารละลายป้อนได้ความเข้มข้นต่ำมาก

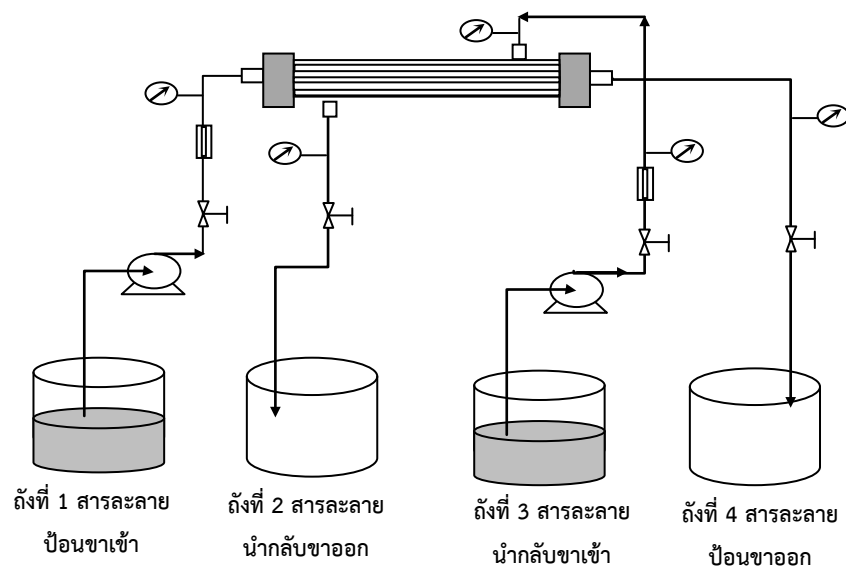


รูปที่ 2.10 ปฏิบัติการแบบกะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน



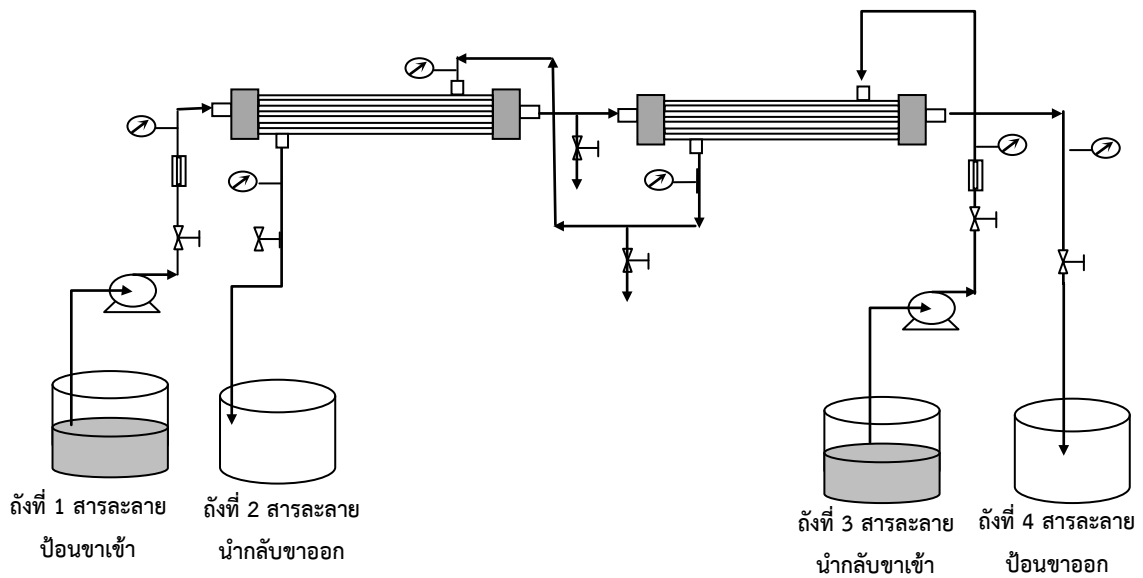
### 2.4.2 ปฏิบัติการแบบไหลต่อเนื่อง (continuous operation mode)

การปฏิบัติการแบบไหลต่อเนื่องใช้สารละลายป้อน 2 ถัง และสารละลายนำกลับ 2 ถัง โดยถังที่ 1 เป็นสารละลายป้อนขาเข้ามอดูล ถังที่ 4 เป็นถังเปล่าเพื่อรับสารละลายป้อนผ่านมอดูล ถังที่ 3 เป็นสารละลายนำกลับขาเข้ามอดูล ถังที่ 2 เป็นถังเปล่าเพื่อรับสารละลายนำกลับที่ผ่านมอดูล ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนขาเข้าไหลผ่านมอดูลฝั่งท่อและสารละลายนำกลับป้อนขาเข้าไหลผ่านมอดูลฝั่งเปลือกในทิศทางตรงกันข้าม โดยที่สารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกสามารถนำมวนกลับผ่านมอดูลตามจำนวนรอบและเวลาในการแยกที่ต้องการศึกษา ดังรูปที่ 2.11 ในการไหลผ่านแต่ละครั้งให้สารละลายที่ผ่านมอดูลเส้นใยกลางทั้งหมดรวมเป็นถังใหม่ นำกลับมาป้อนใหม่นับเป็นการไหลผ่านครั้งที่ 2 ซึ่งการปฏิบัติการแบบนี้เหมาะที่จะใช้กับสารละลายป้อนในปริมาณมาก และนำมาประยุกต์ในระดับอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.11 ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน

การไหลแบบต่อเนื่องสามารถเพิ่มมอดูลเส้นใยกลางโดยการต่ออนุกรมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สารละลายป้อนขาเข้าไหลด้านท่อผ่านมอดูลตัวที่ 1 ไปยังมอดูลตัวที่ 2 จากนั้นออกไปยังถังรองรับของสารละลายป้อนขาออก ส่วนสารละลายนำกลับขาเข้าจะไหลด้านเปลือกผ่านมอดูลตัวที่ 2 ไปยังมอดูลตัวที่ 1 จากนั้นออกไปยังถังรองรับสารละลายนำกลับขาออกในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งการต่ออนุกรม 2 มอดูล สามารถเพิ่มพื้นที่การสัมผัสกันระหว่างสารละลายป้อนและสารสกัดในแต่ละรอบการไหล การไหลผ่านในแต่ละครั้งจึงมีร้อยละการแยกและนำกลับไอออนที่ต้องการสูงขึ้น



รูปที่ 2.12 ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับไหลสวนทางกันโดยการต่อมอดูลเส้นใยกลางแบบอนุกรม 2 มอดูล

## 2.5 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด [38]

### 2.5.1 สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant)

สารสกัดชนิดกรดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ สารสกัดชนิดกรด และสารสกัดชนิดคีเลต (chelating extractant) สารสกัดชนิดกรดประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น  $-\text{COOH}$ ,  $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$  และ  $-\text{SO}_3\text{H}$  เป็นต้น และสารสกัดชนิดคีเลตจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) กับไอออนที่ต้องการแยกที่มีประจุบวก สามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้ง 2 กลุ่ม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลางและสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ดังสมการ (2.7)



ปฏิกิริยาการแยกเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่ต้องการแยกซึ่งความสามารถในการแยกไอออนขึ้นกับความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคสารละลายป้อน และธรรมชาติของไอออนที่ต้องการแยกนั้นๆ

สารสกัดที่เป็นกรด พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการแยกไอออนเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (organic derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (monocarboxylic acids) ซึ่งในสารสกัดที่เป็นกรดนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรด ได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก

(Di-2-ethyl hexyl phosphoric acids, D2EHPA) เนื่องจากมีข้อดีมากมาย เช่น มีเสถียรภาพทางเคมี มีจลนศาสตร์ของการแยกที่ดี สามารถแยกและนำกลับได้ง่าย สามารถแยกไอออนได้หลายชนิด และหาซื้อได้ง่าย

สารสกัดที่เป็นคีเลตเป็นสารสกัดที่ประกอบด้วยกลุ่มดอนเนอร์ (donor group) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (bidentate complexes) ซึ่งปัจจุบันสารสกัดที่เป็นคีเลตในเชิงพาณิชย์มีอยู่ 2 ประเภท คือ

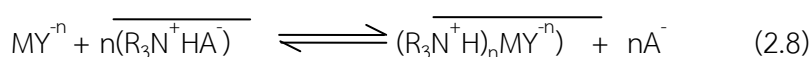
1. กลุ่มของ 2-ไฮดรอกซี เบนโซฟีโนน ออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SEM ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA

2. กลุ่มของ 8-ไฮดรอกซี ควิโนไลน์ (8-hydroxy quinoline) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Kelex สารสกัดกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้ในการแยกไอออนทองแดง ทั้งจากสารละลายกรดที่มาจากกระบวนการชะละลาย (acidic leach liquors) หรือจากสารละลายแอลคาไลน์ (alkaline solutions) ข้อดีของสารสกัดที่เป็นคีเลต คือ เมื่อใช้แยกในสารละลายที่เป็นกรดจะมีจลนศาสตร์ที่ช้าแต่ในสารละลายอัลคาไลน์จะเกิดจลนศาสตร์ที่ดี

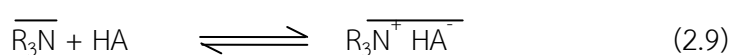
### 2.5.2 สารสกัดชนิดเบส (basic extractant)

สารสกัดชนิดเบสเป็นสารสกัดอินทรีย์ที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบของเกลือได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีน (amine) และแอมโมเนียมแฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (quaternary ammonium halides) ได้มีการพัฒนาการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (primary,  $\text{RNH}_2$ ) ชนิดทุติยภูมิ (secondary,  $\text{R}_2\text{NR}$ ) ชนิดตติยภูมิ (tertiary,  $\text{R}_3\text{N}$ ) และชนิดจตุภูมิ (quaternary,  $\text{R}_4\text{N}^+$ )

การแยกไอออนที่ต้องการแยกด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายของน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (anionic species) กับสารสกัดชนิดเบส ดังสมการ (2.8)



เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนเอมีนจะต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่ต้องการแยกประจุบวก ดังสมการ (2.9)



เอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนที่มีขั้ว  $\overline{(R_3N^+HA^-)}$  ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับวัฏภาคสารละลายป้อนที่ประกอบด้วยไอออนที่ต้องการแยก  $MY^{-n}$  เกิดการแลกเปลี่ยนประจุเป็นไอออนเชิงซ้อน ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออิทธิพลการแยกโดยการใช้เอมีน เป็นสารสกัด คือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของตัวทำละลาย และธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ โดยการรวมตัว จะทำให้เกิดเป็นวัฏภาคที่ 3 ดังสมการที่ (2.10)



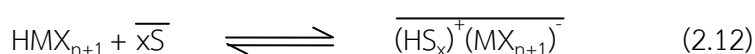
การเกิดวัฏภาคที่ 3 ทำให้วัฏภาคของสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งเป็น ปัญหาสำคัญในการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (modifiers) เช่น อะลิฟาติก แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ยาว (long-chain aliphatic alcohols) เช่น โดเดคานอล (dodecanol) เป็นต้น

ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการแยกไอออนด้วยเอมีน คือ ธรรมชาติของสายโซ่คาร์บอน และ จำนวนอะตอมคาร์บอนในสายโซ่ ซึ่งโดยปกติที่ใช้กันจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 250-400 กรัมต่อโมล พบว่าถ้าน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 250 กรัมต่อโมล เอมีนจะมีแนวโน้มในการละลายในน้ำได้ แต่ถ้า น้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 600 กรัมต่อโมล เอมีนไม่สามารถละลายในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ได้

### 2.5.3 สารสกัดชนิดซอลเวต (solvating extractant)

สารสกัดชนิดซอลเวตสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยพันธะ ระหว่างออกซิเจนและคาร์บอน เช่น อีเทอร์ (ether) เอสเทอร์ (ester) แอลกอฮอล์ (alcohol) และ คีโตน (ketone) ส่วนอีกกลุ่มประกอบด้วยพันธะระหว่างออกซิเจนหรือซัลเฟอร์กับฟอสฟอรัส เช่น อัลคิลฟอสเฟส (alkyl phosphate) หรืออัลคิลไทโอฟอสเฟส (alkylthio phosphate) เป็นต้น

สารสกัดชนิดซอลเวตหรือสารสกัดที่เป็นกลาง (neutral extractant) เป็นสารสกัดที่มี เฉพาะกลุ่มดอนเนอร์ จึงไม่สามารถแตกตัวให้โปรตอน ดังนั้น สารสกัดชนิดนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออน ที่มีประจุบวกหรือลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุลไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายของน้ำ สารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุกลาง เกิดขึ้นจากการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัด ซึ่งขึ้นกับ ความสามารถของไอออนที่ต้องการแยกในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เช่นเดียวกับกรณี ของสารสกัดชนิดเบส การแยกเป็นการรวมตัวกันของอะตอมที่อยู่ตรงกลางของสารประกอบเชิงซ้อน หรือรวมกับโปรตอนในกรณีการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังสมการที่ (2.11) และ (2.12)



เมื่อ S คือ สารสกัดชนิดซอลเวต

## 2.6 การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 2.6.1 ร้อยละการแยก (percentage of extraction, %E) และร้อยละการนำกลับของไอออนแคดเมียม (percentage of recovery, %R)

$$\text{ร้อยละการแยก} = \frac{[C]_{f,in} - [C]_{f,out}}{[C]_{f,in}} \times 100 \quad (2.13)$$

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{[C]_{s,out}}{[C]_{f,in}} \times 100 \quad (2.14)$$

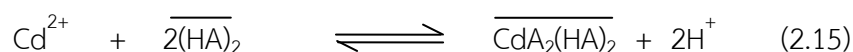
เมื่อ  $[C]_{f,in}$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$[C]_{f,out}$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$[C]_{s,out}$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

### 2.6.2 การคำนวณค่าคงที่สมดุลการแยก (equilibrium extraction, $K_{ex}$ )

การถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) ในสารละลายซัลเฟตผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางโดยใช้สารสกัด D2EHPA ( $\overline{HA}$ ) ในตัวทำละลายเคโรซีน ปฏิกริยาระหว่างไอออนแคดเมียมกับสารสกัด เป็นปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนเกิดเป็นไอออนแคดเมียมเชิงซ้อนขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.15) [18]



เมื่อ HA คือ สารสกัด D2EHPA

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการแยกไอออนแคดเมียม คือ

$$K_{ex} = \frac{[CdA_2(HA)_2]_{Org} [H^+]_{Aq}^2}{[Cd^{2+}]_{Aq} [(HA)_2]_{Org}^2} \quad (2.16)$$

ค่าสัดส่วนการกระจายตัวของไอออนแคดเมียม ( $D$ )

$$D = \frac{[CdA_2(HA)_2]_{Org}}{[Cd^{2+}]_{Aq}} = K_{ex} \frac{[(HA)_2]_{Org}^2}{[H^+]_{Aq}^2} \quad (2.17)$$

แทนค่า (2.17) ใน (2.16)

$$K_{ex} = \frac{D[H^+]_{Aq}^2}{[(HA)_2]_{Org}^2} \quad (2.18)$$

### 2.6.3 การพิจารณาการถ่ายเทมวลจากความต้านทานในการแพร่ผ่านรวม

กลไกการถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียม เกิดจากการถ่ายเทมวลผ่านวัฏภาคทั้ง 3 วัฏภาค มีขั้นตอนการเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ไอออนแคดเมียมแพร่ผ่านภายในวัฏภาคของสารละลายป้อน โดยอาศัยความต่างของความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อน ในการเคลื่อนผ่านมายังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวรวมกันเกิดเป็นชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

ขั้นตอนที่ 2 เกิดปฏิกิริยาการสกัดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนแคดเมียมกับสารสกัด จากนั้นไอออนเชิงซ้อนไอออนแคดเมียมแพร่ผ่านภายในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ไปสู่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวและวัฏภาคสารละลายนำกลับเป็นจำนวนมาก

ขั้นตอนที่ 3 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนแคดเมียมกับสารสกัดแพร่ผ่านในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับเกิดเป็นชั้นฟิล์มขึ้น จากนั้นเกิดปฏิกิริยานำกลับโดยการรับไอออนไฮโดรเจนในสารละลายนำกลับ และปล่อยไอออนแคดเมียมสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับ ซึ่งปฏิกิริยานำกลับที่เกิดขึ้นได้เร็วมากเนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนแคดเมียมกับสารสกัดในชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและวัฏภาคของสารละลายนำกลับมีปริมาณมาก จากนั้นไอออนแคดเมียมที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านชั้นฟิล์มสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับ

ดังนั้น การถ่ายเทมวลรวมของไอออนแคดเมียมพิจารณาจากความต้านทานการแพร่ผ่านรวมของไอออนแคดเมียมจากวัฏภาคสารละลายป้อน ชั้นเยื่อแผ่นเหลว และวัฏภาคสารละลายนำกลับ ดังสมการที่ (2.19)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_m} \frac{1}{Dk_m} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{k_s} \quad (2.19)$$

ในการศึกษาขั้นตอนการควบคุมการถ่ายเทมวลของการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้สมมุติฐานที่ว่าชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว มีความหนามากกว่าชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับมาก ( $l_{i,f} \gg l_{i,s}$ ) [39] เนื่องจากในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนแคดเมียมและสารสกัดต้องอาศัยปฏิกิริยาการสกัด ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในสารละลายป้อนน้อยกว่าความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในสารละลายนำกลับมาก ( $[H^+]_f \ll [H^+]_s$ ) และความเข้มข้นของสารสกัดมากกว่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนมาก ( $(HA)_2 \gg CdA_2(HA)_2$ ) [40] จึงทำให้เกิดชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคของสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวที่มากกว่าชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายป้อน จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนแพร่ผ่านมายังชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ

โดยอาศัยความแตกต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนไปสู่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคของสารละลายนำกลับเป็นจำนวนมาก โดยขั้นตอนในการควบคุมการแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น เกิดจากความหนืดภายในของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวในการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด ดังนั้นจึงมีไอออนเชิงซ้อนเป็นจำนวนมากในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ทำให้มีสารประกอบเชิงซ้อนจำนวนมากทำปฏิกิริยานำกลับสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับ ปฏิกิริยานำกลับจึงเกิดขึ้นเร็วมากและส่งผลให้ชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับบางกว่าชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายป้อนมาก จึงสามารถลดความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในวัฏภาคสารละลายนำกลับได้

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของไอออนแคดเมียม คือ

$$\begin{aligned} \frac{1}{P} &= \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{Dk_m} \\ &= \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm} k_m K_{ex}} \frac{[H^+]^2}{[(HA)_2]^2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\text{โดยที่ } r_{lm} = \frac{(r_o - r_i)}{\left(\ln \frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (2.21)$$

- เมื่อ  $P$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)  
 $k_i$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)  
 $r_i$  คือ รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)  
 $r_{lm}$  คือ รัศมี log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)  
 $D$  คือ อัตราการกระจายตัว (-)  
 $k_m$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)  
 $r_o$  คือ รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)  
 $k_s$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นฟิล์มระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ (เซนติเมตรต่อวินาที)

#### 2.6.4 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (Permeability, $P$ )

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านใช้สมมุติฐานที่ว่า สัดส่วนการกระจายตัวของไอออนแคดเมียมระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมากกว่าสัดส่วน

การกระจายตัวของไอออนแคตเมียมระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายนำกลับมาก สามารถคำนวณได้จากสมการของ Danesi [41] สมการที่ (2.22) และ (2.23)

$$V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right) = -AP \frac{\phi}{\phi+1} t \quad (2.22)$$

$$\text{โดยที่ } \phi = \frac{Q_f}{PL\varepsilon\pi Nr_i} \quad (2.23)$$

- เมื่อ  $P$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)  
 $V_f$  คือ ปริมาตรของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $C_f$  คือ ความเข้มข้นของไอออนแคตเมียมในภูมิภาคสารละลายป้อน ณ เวลาใดๆ (ส่วนในล้านส่วน)  
 $C_{f,0}$  คือ ความเข้มข้นของไอออนแคตเมียมในภูมิภาคสารละลายป้อน ณ เวลาเริ่มต้น (ส่วนในล้านส่วน)  
 $A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล (ตารางเซนติเมตร)  
 $t$  คือ เวลา (นาทีก)  
 $Q_f$  คือ อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)  
 $L$  คือ ความยาวของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)  
 $\varepsilon$  คือ ความพรุนของเส้นใยกลวง (ร้อยละ)  
 $N$  คือ จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล (เส้น)  
 $r_i$  คือ รัศมีภายในเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

### 2.6.5 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่และความหนืดของตัวทำละลาย

สัมประสิทธิ์การแพร่และความหนืดในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวมีความสัมพันธ์กัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากสมการของ Wilke-Chang [42] สมการที่ (2.24) และในการหาค่าความหนืดในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวของสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายละลายเคโรซีน สามารถหาได้จากสมการของ Kendel and Monroe [43] สมการที่ (2.25)

สมการ Wilke-Chang

$$D^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} \cdot T}{\eta \cdot V_A^{0.6}} \quad (2.24)$$



- เมื่อ  $D^*$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)  
 $M$  คือ มวลโมเลกุลของตัวทำละลาย (กรัมต่อโมล)  
 $T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)  
 $\eta$  คือ ความหนืด (เซนติพอยส์)  
 $V_A$  คือ ปริมาตรเชิงโมลาร์ของตัวถูกละลาย (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)

สมการ Kendel and Monroe

$$\eta_{mix} = \left( \frac{M_2 \phi_1 \rho_1 (\eta_1)^{\frac{1}{3}} + M_1 \phi_2 \rho_2 (\eta_2)^{\frac{1}{3}}}{M_2 \phi_1 \rho_1 + M_1 \phi_2 \rho_2} \right)^3 \quad (2.25)$$

- เมื่อ  $\eta_{mix}$  คือ ความหนืดของสารละลายผสม (เซนติพอยส์)  
 $\eta$  คือ ความหนืดของสารละลาย (เซนติพอยส์)  
 $M$  คือ มวลโมเลกุลของตัวทำละลาย (กรัมต่อโมล)  
 $\phi$  คือ ปริมาตรสัดส่วน (-)  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของสารละลาย (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

## 2.6.6 ร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือก

การแยกและการนำกลับไอออนโลหะต่างๆ แบบคัดเลือกจากสารละลายไอออนผสม เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการแยกและการนำกลับของไอออนแต่ละชนิด ร้อยละการแยกแบบคัดเลือกของไอออนแต่ละชนิดที่ต้องการในกระบวนการของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงขึ้นอยู่กับชนิดของสารสกัดที่เหมาะสมของการเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งต้องอาศัยการทดลองเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาการแยกและการนำกลับที่เกิดขึ้น

$$\text{ร้อยละการแยกแบบคัดเลือก} = \frac{[C]_{f,in}^i - [C]_{f,out}^i}{\sum_{i=1}^n ([C]_{f,in}^i - [C]_{f,out}^i)} \times 100 \quad (2.26)$$

$$\text{ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือก} = \frac{[C]_{s,out}^i - [C]_{s,in}^i}{\sum_{i=1}^n ([C]_{f,in}^i - [C]_{f,out}^i)} \times 100 \quad (2.27)$$

- เมื่อ  $[C]_{f,in}^i$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายป้อนขาเข้า (ส่วนในล้านส่วน)  
 $[C]_{f,out}^i$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายป้อนขาออก (ส่วนในล้านส่วน)  
 $[C]_{s,out}^i$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายนำกลับขาออก (ส่วนในล้านส่วน)  
 $[C]_{s,in}^i$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายนำกลับขาเข้า (ส่วนในล้านส่วน)

### บทที่ 3

#### สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง สารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิธีการทดลองในแต่ละตัวแปร โดยศึกษาการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ และจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีที่ประกอบด้วยไอออนโลหะผสม

การทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่

- เวลาในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม
- ชนิดของสารสกัด
- ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน
- ชนิดของสารละลายนำกลับ

2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่

- เวลาปฏิบัติการ
- ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 1.5-6.5
- ความเข้มข้นของสารสกัด 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน
- ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 1-6

3. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีที่มีไอออนโลหะผสม 4 ชนิด (แคดเมียม สังกะสี แมงกานีส และแมงกานีส) ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล และ 2 มอดูล ที่ต่อแบบอนุกรม

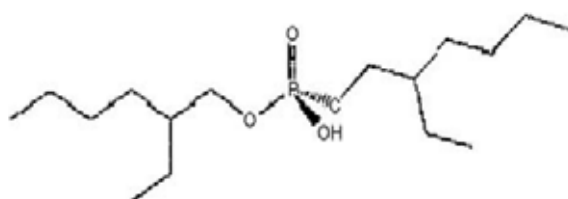
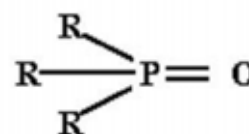
#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล
สารละลายสังเคราะห์แคดเมียมซัลเฟต	แคดเมียมซัลเฟต	$3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
น้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี	แคดเมียมซัลเฟต	$\text{CdSO}_4$
	สังกะสีซัลเฟต	$\text{ZnSO}_4$
	แมงกานีสซัลเฟต	$\text{MnSO}_4$
	แมกนีเซียมซัลเฟต	$\text{MgSO}_4$
กรดในสารละลายป้อน	กรดซัลฟิวริก	$\text{H}_2\text{SO}_4$
สารสกัด	D2EHPA	$((\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7)_3\text{P}(\text{O}))_2$
	Cyanex 923	$(\text{C}_8\text{H}_{17}\text{O})_2\text{POOH}$
ตัวทำละลายอินทรีย์	เคโรซีน	-
สารละลายนำกลับ	กรดแอสติก	$\text{CH}_3\text{COOH}$
	กรดซัลฟิวริก	$\text{H}_2\text{SO}_4$
	น้ำกลั่น	$\text{H}_2\text{O}$
สารที่ใช้ปรับความเป็นกรด-เบสของ สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ	โซเดียมไฮดรอกไซด์	$\text{NaOH}$
	กรดซัลฟิวริก	$\text{H}_2\text{SO}_4$

สารสกัด D2EHPA และ Cyanex 923 ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน ระดับคุณภาพวิเคราะห์ (analytical reagent grade) จากบริษัท Merck สารสกัด D2EHPA มีมวลโมเลกุลเฉลี่ย 322 กรัมต่อโมล สารสกัด Cyanex 923 เป็นสารสกัดผสมของออกไซด์ฟอสไฟต์ 4 ชนิด คือ  $\text{R}_3\text{PO}$  (8.5%),  $\text{R}_2\text{R}'\text{PO}$  (37.4%),  $\text{RR}_2'\text{PO}$  (30.4%) และ  $\text{R}'_3\text{PO}$  (16.1%) โดยที่ R คือ  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7$  และ R' คือ  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5$  มีมวลโมเลกุลเฉลี่ย 348 กรัมต่อโมล [7] สารสกัดทั้ง 2 ชนิด มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 3.1

(ก) D2EHPA  $((\text{C}_8\text{H}_{17}\text{O})_2\text{POOH})$ (ข) Cyanex 923 (R =  $\text{C}_8\text{H}_{17}$  and  $\text{C}_6\text{H}_{13}$ )

รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของสารสกัด (ก) D2EHPA [44] และ (ข) Cyanex 923 [45]

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 การทดลองด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

1. เครื่องกวนผสม และแท่งแม่เหล็ก
2. กรวยแยกสาร และกระดาษกรองเบอร์ 42
3. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. ปีกเกอร์ขนาด 50 และ 250 มิลลิลิตร
5. กระจกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร
6. นาฬิกาจับเวลา
7. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส
8. เครื่องมือวิเคราะห์ไอออนโลหะ Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS

#### 3.2.2 การทดลองด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1. ปีกเกอร์ขนาด 5 ลิตร
2. กรวยแยกสาร และกระดาษกรองเบอร์ 42
3. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. ปีกเกอร์ขนาด 50 และ 250 มิลลิลิตร
5. ปีม 2 ชุด
6. กระจกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร
7. นาฬิกาจับเวลา
8. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส
9. เครื่องมือวิเคราะห์ไอออนโลหะ AAS ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS
10. ชุดทดลอง liqui-cel<sup>®</sup> liquid/liquid extraction system รุ่น Cat. #5PCM-106

ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ประกอบด้วย

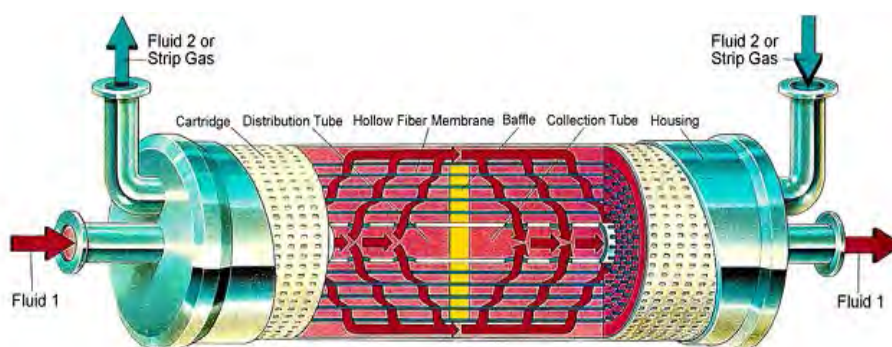
- เครื่องสูบ 2 ชุด อัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที
- มาตรฐานอัตราการไหล 2 ชุด

11. มอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ชนิดมีรูพรุน Celgard<sup>®</sup> X-30 สมบัติ

แสดงดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของมอดูลเส้นใยกลวง

สมบัติ	รายละเอียด
วัสดุเส้นใยกลวง	พอลิพรพิลีน
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนเส้นใยกลวงที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลวง	ร้อยละ 30
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 ตารางเมตร (15.2 ตารางฟุต)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ขนาดของมอดูล (เส้นผ่านศูนย์กลาง×ยาว)	6.3 × 20.3 เซนติเมตร
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการ	1 - 60 องศาเซลเซียส
จำนวนเส้นใยกลวง	35,000



รูปที่ 3.2 มอดูลเส้นใยกลวง [45]

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 ศึกษาการสกัดแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ใช้การสกัดด้วยตัวทำละลายในการประมาณเวลา เลือกชนิดของสารสกัดและชนิดของสารละลายนำกลับ และศึกษาความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม

### 3.3.1.1 การประมาณเวลาในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม

1. เตรียมสารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งมีค่าเท่ากับองค์ประกอบของไอออนแคดเมียมที่พบในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-เบส 5.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือกรดซัลฟิวริก และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมเริ่มต้น
2. เตรียมสารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
4. ผสมสารละลายป้อนและสารสกัดเข้าด้วยกันในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายป้อนและสารสกัดแยกชั้นออกจากกัน โดยใช้กรวยแยกสารเป็นเวลา 40 นาที เก็บตัวอย่างสารละลายชั้นล่าง 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS
5. ผสมส่วนที่สกัดได้ (raffinate) จากข้อ (4) กับสารละลายนำกลับในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายผสมแยกชั้นออกจากกันโดยใช้กรวยแยกสารเป็นเวลา 40 นาที เก็บตัวอย่างสารละลายชั้นล่าง 10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS
6. ทดลองซ้ำข้อ (1)-(5) โดยเปลี่ยนเวลาในการปั่นกวนเป็นเวลา 5, 15, 20 และ 25 นาที

### 3.3.1.2 การเลือกชนิดของสารสกัดและศึกษาความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม

1. เตรียมสารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์และสารละลายนำกลับ เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.1.1 ข้อ (1) และ (3) ตามลำดับ
2. เตรียมสารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. ทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.1.1 ข้อ (4)-(6) และใช้เวลาปั่นกวนที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 3.3.1.1
4. ทดลองซ้ำข้อ (1)-(3) โดยเปลี่ยนความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเป็น 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 และ 6.5

5. ทดลองซ้ำข้อ (1)-(4) แต่เปลี่ยนชนิดสารสกัดเป็น Cyanex 923 ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน

### 3.3.1.3 การเลือกชนิดของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมในการนำกลับไอออนแคดเมียม

1. เตรียมสารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์และสารละลายนำกลับเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.1.2 ข้อ (1) ปรับความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ให้ร้อยละการแยกและการนำกลับสูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.3.1.2
2. เตรียมสารสกัดที่ให้ร้อยละการแยกและการนำกลับสูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.3.1.2 ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน
3. ทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อการทดลองที่ 3.3.1.2 ข้อ (3)
4. ทดลองซ้ำข้อ (1)-(3) แต่เปลี่ยนชนิดของสารละลายนำกลับเป็นสารละลายกรดแอสติก และน้ำกลั่น ตามลำดับ

### 3.3.2 ศึกษาการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง 1 มอดูล

#### 3.3.2.1 เวลาปฏิบัติการ

1. เตรียมสารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ ความเข้มข้น 50 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 5 ลิตร และกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 ปรับความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ให้ร้อยละการแยกและการนำกลับสูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.3.1.2 และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียม
2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยเลือกชนิดของสารสกัดที่ให้ร้อยละการแยกและการนำกลับสูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.3.1.2 ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้ามอดูลเส้นใยกลางทั้งในฝั่งท่อและฝั่งเปลือกเป็นเวลา 40-50 นาที เพื่อให้สารสกัดยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลาง
3. เตรียมสารละลายนำกลับที่ให้ร้อยละการนำกลับสูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.3.1.3 ปริมาตร 5 ลิตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ใช้ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลต่อเนื่องและสวนทางกันเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลาง

5. เก็บสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS

### 3.3.2.2 ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม

1. เตรียมสารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ สารสกัด และสารละลายนำกลับเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.2.1 ข้อ (1)-(3)
2. ทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.2.1 ข้อ (4)-(5) และเก็บสารละลายตัวอย่างของสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลาปฏิบัติการที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 3.3.2.1
3. ทดลองซ้ำข้อ (1)-(2) โดยเปลี่ยนความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเป็น 2.5, 3.5, 4.5 และ 5.5

### 3.3.2.3 ความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม

1. เตรียมสารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ สารสกัด และสารละลายนำกลับเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.2.2 ข้อ (1) ใช้ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ให้ร้อยละการแยกและการนำกลับที่ดีที่สุดจากผลการทดลองที่ 3.3.2.2
2. ทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.2.2 ข้อ (2)
3. ทดลองซ้ำข้อ (1)-(2) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.02, 0.07, 0.12, 0.17 และ 0.22 โมลาร์

### 3.3.2.4 ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมในการนำกลับไอออนแคดเมียม

1. เตรียมสารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ สารสกัด และสารละลายนำกลับเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.2.3 ข้อ (1) ใช้ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารสกัดที่ให้ร้อยละการแยกและการนำกลับที่ดีที่สุดจากผลการทดลองที่ 3.3.2.2 และ 3.3.2.3 ตามลำดับ
2. ทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.2.3 ข้อ (2)
3. ทดลองซ้ำข้อ (1)-(2) โดยเปลี่ยนความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับเป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6



### 3.3.3 ศึกษาการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง 1 และ 2 มอดูล

#### 3.3.3.1 การแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง 1 มอดูล

1. กรองสารละลายป้อนจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี ปริมาตร 5 ลิตร ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ปรับความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 3.3.2.1

2. เตรียมความเข้มข้นของสารสกัด และความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับที่ให้อัตราการแยกและการนำกลับสูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.3.2.3 และ 3.3.2.4 ตามลำดับ

3. ทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.2.1 ข้อ (4)-(5) และเก็บสารละลายตัวอย่างของสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลาปฏิบัติการที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 3.3.2.1

4. นำสารละลายป้อนขาออกที่ผ่านมอดูลเส้นใยกลางทั้งหมดปริมาตร 5 ลิตร ไปผ่านมอดูลครั้งที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

5. เตรียมสารละลายนำกลับ ปริมาตร 5 ลิตร และปรับความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับที่ให้อัตราการนำกลับสูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.3.2.4 เพื่อใช้ในการไหลผ่านครั้งที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

6. ทดลองไหลผ่านครั้งที่ 2 และ 3 เช่นเดียวกับข้อ (3)

จากภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้ซึ่งพิจารณาจากร้อยละการแยกและการนำกลับ คำนวณค่าคงที่เกี่ยวกับการถ่ายเทมวล เพื่อหาขั้นตอนควบคุมการถ่ายเทมวลของไอออนแคตเมียม

#### 3.3.3.2 การแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง 2 มอดูล

1. เตรียมสารละลายป้อน สารสกัด และสารละลายนำกลับ เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.3.1 ข้อ (1)-(2)

2. เตรียมมอดูลเส้นใยกลางที่ต่อกันแบบอนุกรม 2 มอดูล โดยให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อ และสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือก

3. ทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.3.1 ข้อ (3)

4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลต่อเนื่องและสวนทางกัน

เข้าสู่มอดูลเส้นใยกลาง เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนขาเข้าของมอดูลตัวที่ 1 และเก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกจากมอดูลตัวที่ 1 และ 2 ที่เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2.1

5. นำสารละลายป้อนขาออกที่ผ่านมอดูลเส้นใยกลางทั้งหมดปริมาตร 5 ลิตร ไปผ่านมอดูลที่ต่อกันแบบอนุกรม 2 มอดูล ครั้งที่ 2

6. เตรียมสารละลายนำกลับ โดยปรับความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับที่ให้ร้อยละการแยกและการนำกลับสูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.3.2.4 ปริมาตร 5 ลิตร เพื่อใช้ในการไหลผ่านในมอดูลที่ต่อกันแบบอนุกรม 2 มอดูล ครั้งที่ 2

7. ทดลองไหลผ่านครั้งที่ 2 เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนขาเข้าของมอดูลตัวที่ 1 และเก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกของมอดูลตัวที่ 1 และ 2 ที่เวลาที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2.1

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม แบ่งการรายงานผลออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ เวลา ชนิดของสารสกัดในตัวทำละลายโครซีน ชนิดของสารละลายนำกลับ และและความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสม

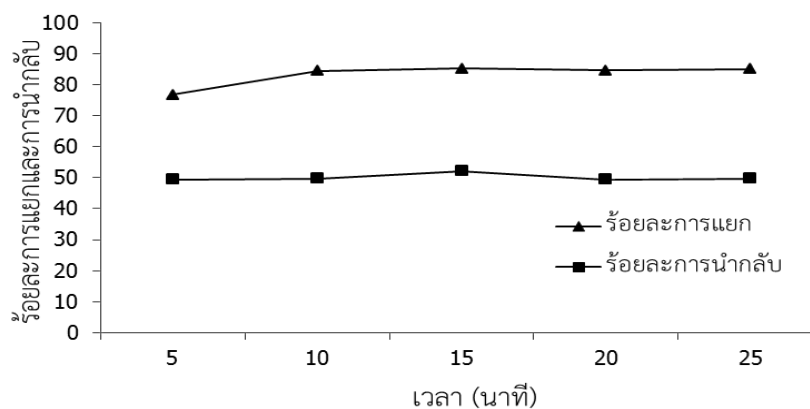
2. ภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล ได้แก่ เวลาปฏิบัติการ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด และความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การไหลเป็นแบบต่อเนื่องและสวนทางกัน

3. ภาวะที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีที่มีไอออนโลหะผสม แคดเมียม สังกะสี แมงกานีส และแมกนีเซียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล และ 2 มอดูล ที่ต่อแบบอนุกรม

#### 4.1 การแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

##### 4.1.1 เวลาในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม

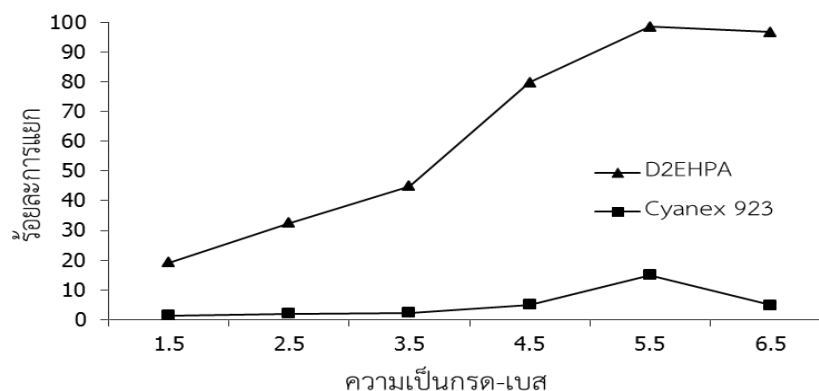
ศึกษาเวลาในการแยกด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้เวลานับกวนผสมสารละลายป้อนกับสารสกัดที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 นาที ความเร็วการปั่นกวน 1,000 รอบต่อนาที การแยกด้วยตัวทำละลายสามารถหาจุดสมดุลการสกัดได้ ซึ่งต่างกับการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง การหาเวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลการแยกและการนำกลับเป็นเพียงการใช้เวลาในการอ้างอิงผลการทดลองของการสกัดด้วยตัวทำละลายเท่านั้น โดยกำหนดปัจจัยอื่นๆ คงที่ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนไอออนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 6.5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.05 โมลาร์ ในตัวทำละลายโครซีน และความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 รูปที่ 4.1 พบว่าร้อยละการแยกและการนำกลับเริ่มเข้าสู่สมดุลการสกัดที่เวลา 10 นาที หลังจากนั้นร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมเริ่มคงที่ ดังนั้นได้ใช้เวลา 10 นาที ในการศึกษาตัวแปรอื่นต่อไป



**รูปที่ 4.1** ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับเวลาด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 6.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ในตัวทำละลาย เคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 และความเร็วการปั่นกวน 1,000 รอบต่อนาที

#### 4.1.2 ชนิดของสารสกัดและความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม

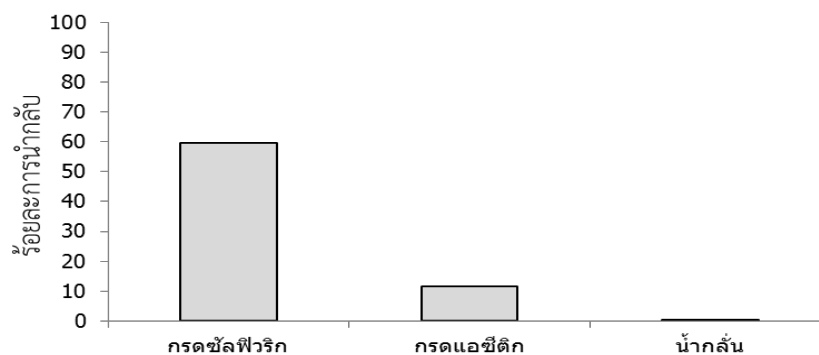
ศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 และ 6.5 ต่อร้อยละการแยก โดยกำหนดปัจจัยอื่นๆ คงที่ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนไอออนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิด 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 เวลาในการปั่นกวน 10 นาที และความเร็วการปั่นกวน 1,000 รอบต่อนาที เนื่องจากสารสกัด D2EHPA มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) มากกว่า Cyanex 923 จึงสามารถแลกเปลี่ยนประจุและแยกไอออนแคดเมียมได้ดีกว่าสารสกัด Cyanex 923 ในทุกช่วงความเป็นกรด-เบส [46] จากผลการทดลองพบว่าที่ความเป็นกรด-เบส 5.5 สารสกัด D2EHPA สามารถแยกไอออนแคดเมียมได้สูงสุดที่ร้อยละ 98.57 ดังรูปที่ 4.2



**รูปที่ 4.2** ร้อยละการแยกไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย: สารสกัด D2EHPA และ Cyanex 923 ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 เวลาในการปั่นกววน 10 นาที และความเร็วกการปั่นกววน 1,000 รอบต่อนาที

#### 4.1.3 ชนิดของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมในการนำกลับไอออนแคดเมียม

ผลของชนิดสารละลายนำกลับศึกษาด้วยสารละลาย 3 ชนิด คือ สารละลายกรดแอสติกและกรดซัลฟิวริกที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 4 และน้ำกลั่น ปัจจัยอื่นๆ ที่คงที่ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้เวลาในการปั่นกววน 10 นาที และความเร็วกการปั่นกววน 1,000 รอบต่อนาที พบว่าสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นกรดที่แก่สามารถนำกลับไอออนแคดเมียมได้สูงกว่าสารละลายกรดแอสติก ค่าการนำกลับประมาณร้อยละ 60

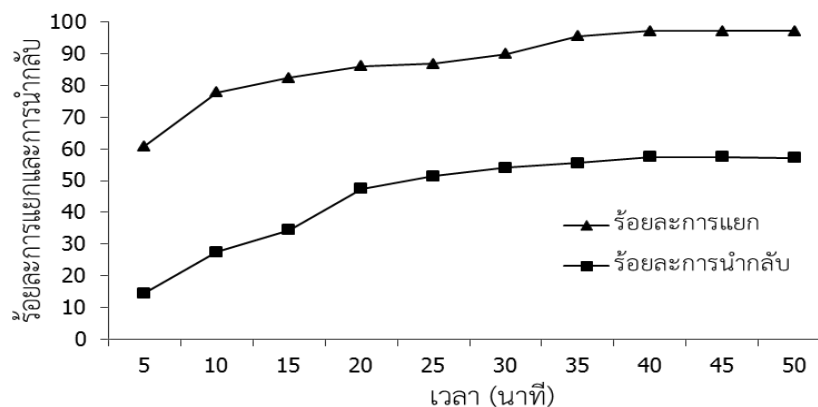


**รูปที่ 4.3** ร้อยละการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับชนิดของสารละลายนำกลับด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 เวลาในการปั่นกววน 10 นาที และความเร็วกการปั่นกววน 1,000 รอบต่อนาที

## 4.2 การแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากสารละลายแคตเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล

### 4.2.1 เวลาปฏิบัติการ

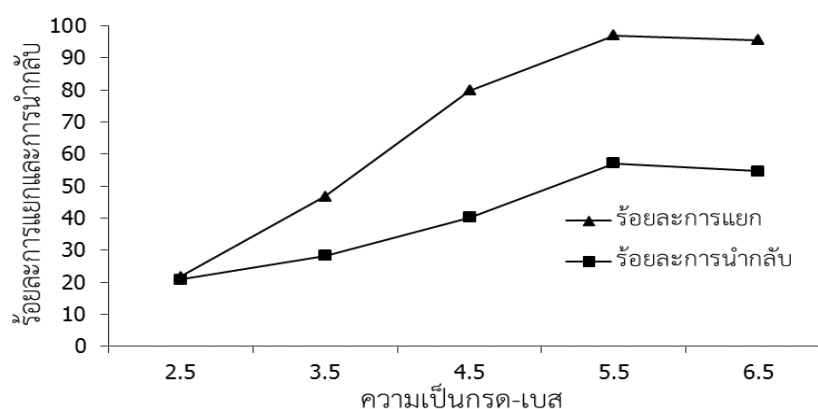
สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาเวลาในการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง เก็บตัวอย่างของไอออนแคตเมียมในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 นาที ปัจจัยอื่นๆ ที่คงที่ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนไอออนแคตเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน และความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 ให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อและสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือกที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน พบว่าที่เวลา 40 นาที การแยกและการนำกลับเริ่มคงที่ ดังรูปที่ 4.4 ดังนั้นในการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจึงเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 40 นาที



**รูปที่ 4.4** ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากสารละลายแคตเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับเวลาด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4.2.2 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม

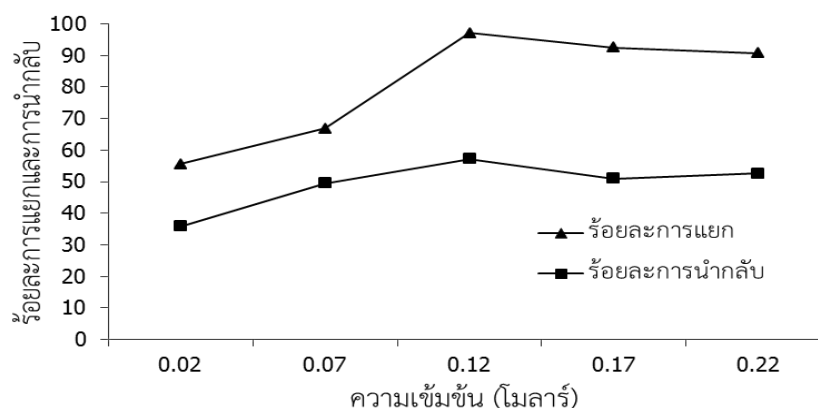
การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 2.5, 3.5, 4.5, 5.5 และ 6.5 ต่อร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ปัจจัยอื่นๆ ที่คงที่ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนไอออนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายโครซีน และความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 ให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อและสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือกที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน และเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 40 นาที พบว่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนในช่วง 2.5-5.5 มีร้อยละการแยกและการนำกลับที่สูงขึ้น และที่ความเป็นกรด-เบส 5.5 มีร้อยละการแยกและการนำกลับสูงสุดที่ 97.08 และ 57.16 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5 และเมื่อความเป็นกรด-เบสสูงกว่า 5.5 ร้อยละการแยกและการนำกลับมีแนวโน้มลดลง เพราะความเป็นกรด-เบสที่สูงขึ้นทำให้ไอออนโลหะบางส่วนเกิดการตกตะกอน [47] ไปอุดตันในรูพรุนเส้นใยกลวงจึงทำให้ร้อยละการแยกและการนำกลับลดลง



**รูปที่ 4.5** ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง: สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายโครซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาที

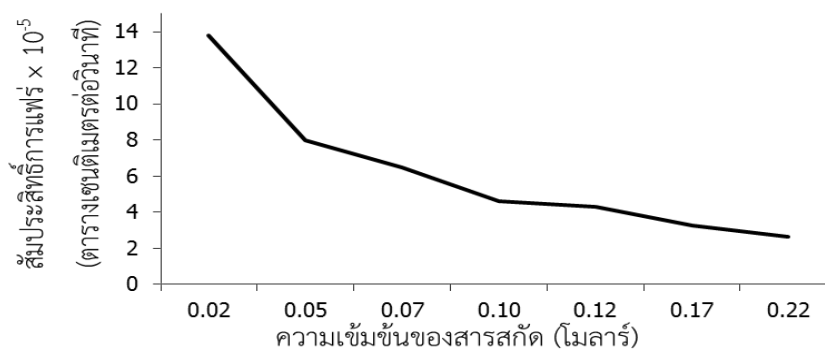
#### 4.2.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียม

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.02, 0.07, 0.12, 0.17 และ 0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายโครซีนต่อการแยกไอออนแคตเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ปัจจัยอื่นๆ ที่คงที่ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนไอออนแคตเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 ให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อและสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือกที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน พบว่าในการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในช่วง 0.02-0.12 โมลาร์ สามารถแยกและนำกลับไอออนแคตเมียมได้สูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้นตามทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอ ชาเตอริเยร์ [45] ที่ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ มีร้อยละการแยกและการนำกลับสูงสุด คือ 97.09 และ 57.16 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 และที่ความเข้มข้นสูงกว่า 0.12 โมลาร์ การแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดทำให้วฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น จึงขัดขวางการแพร่ของไอออนเชิงซ้อนในวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว [42] ซึ่งอ้างอิงได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ความเข้มข้นของสกัดต่างๆ ที่คำนวณด้วยสมการของ Wilke-Chang สมการที่ (2.24) และรูปที่ 4.7



**รูปที่ 4.6** ร้อยละการแยกและการนำกลับของไอออนแคตเมียมจากสารละลายแคตเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายโครซีนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโครซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 4 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาที

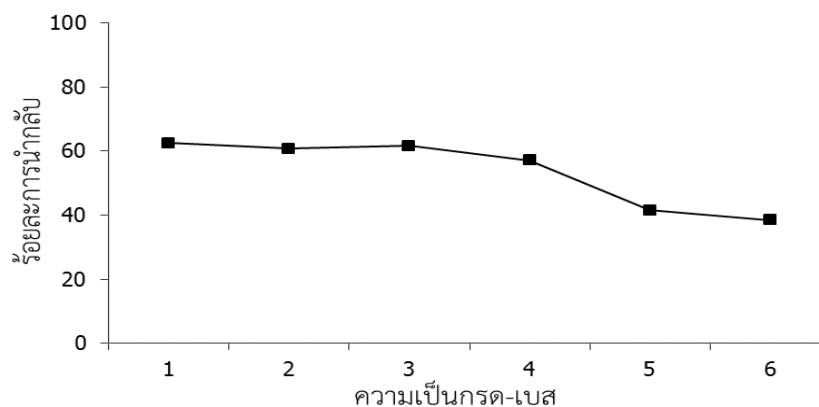




รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การแพร่กับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน

#### 4.2.4 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออน แคตเมียม

ศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ต่อการแยกไอออนแคตเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงมีปัจจัยอื่นๆ คงที่ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนไอออนแคตเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อและสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือกที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน พบว่าที่ความเป็นกรด-เบสของกรดซัลฟิวริกในช่วง 1-3 ร้อยละการนำกลับไม่แตกต่างกัน มีค่าประมาณ 62 และเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับสูงกว่า 3 ร้อยละการนำกลับลดลง ดังรูปที่ 4.8 เนื่องจากแรงขับไอออนไฮโดรเจนในการเกิดปฏิกิริยาการแยกเกิดจากผลต่างของความเป็นกรด-เบสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับ ดังนั้นเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้นทำให้ผลต่างของความเป็นกรด-เบสลดลง ร้อยละการนำกลับจึงลดลง งานวิจัยนี้จึงใช้ความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคสารละลายนำกลับเท่ากับ 3

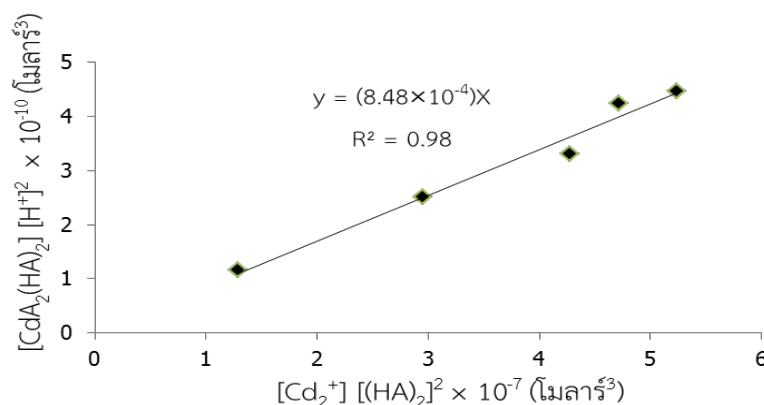


**รูปที่ 4.8** ร้อยละการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์กับความความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาที

#### 4.3 การคำนวณการถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงกับผลการทดลอง

##### 4.3.1 ค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant, $K_{ex}$ )

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการแยกไอออนแคดเมียมได้จากสมการที่ (2.16) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $[CdA_4(HA)_2][H^+]^2$  กับ  $[Cd_2^+][(HA)_2]^2$  ภาวะที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนไอออนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ 3 ให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อและสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือกที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน ค่าคงที่สมดุลได้จากความชันของกราฟเส้นตรงที่ตัดกับแกน y ในรูปที่ 4.9 มีค่าเท่ากับ  $8.48 \times 10^{-4}$



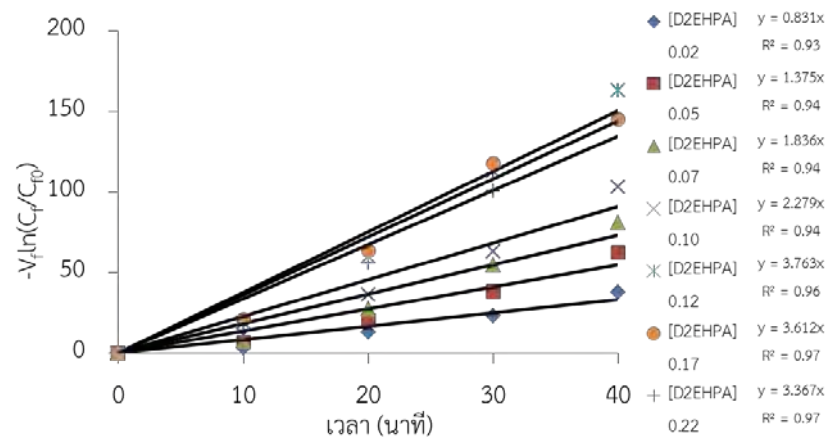
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $[CdA_4(HA)_2][H^+]^2$  กับ  $[Cd_2^+][(HA)_2]^2$  ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายโครซีน

#### 4.3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (permeability, $P$ ) ของไอออนแคดเมียม

สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านหรือสภาพให้ซึมผ่านได้ของปฏิกิริยาการแยกไอออนแคดเมียมได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.10 ซึ่งมาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.22) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายโครซีน ความเข้มข้นของสารละลายป้อนไอออนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 3 ให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อและสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือกที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน ค่าความชันของแต่ละความเข้มข้นของสารสกัดนำไปคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน ( $P$ ) ซึ่งเป็นการแพร่ผ่านรวมของไอออนแคดเมียมในวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

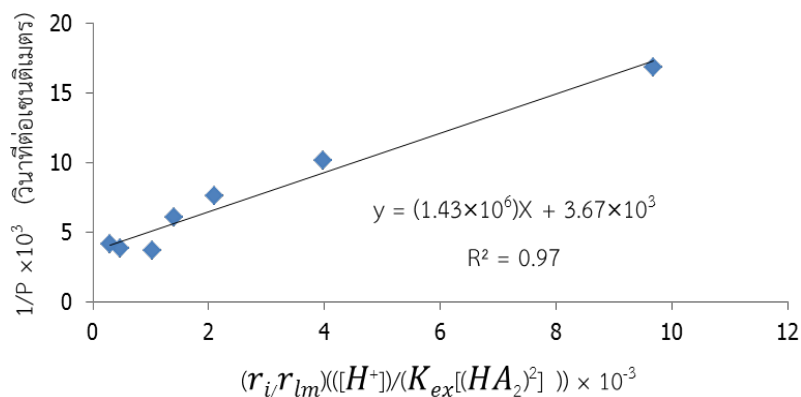
#### 4.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมในวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (mass transfer coefficients, $k_i$ , $k_m$ )

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมในวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวของปฏิกิริยาการแยกไอออนแคดเมียม พิจารณาจากความสัมพันธ์การแพร่ผ่านของไอออนแคดเมียมจากสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว



**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln(C_f/C_{f,0})$  กับเวลาที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จากการเปรียบเทียบสมการการแพร่ผ่านจากวัฏภาคสารละลายป้อนสู่วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ (2.20) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02-0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเข้มข้นของสารละลายป้อนไอออนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ 50 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 3 ให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อและสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือกที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $(r_i/r_m)([H^+]/K_{ex} [(HA_2)^2])$  ในรูปที่ 4.11 มีจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/k_i$  และมีความชันเท่ากับ  $1/k_m$  ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมในวัฏภาคสารละลายป้อน ( $k_i$ ) เท่ากับ  $2.73 \times 10^4$  เซนติเมตรต่อวินาที และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบไอออนเชิงซ้อนระหว่างไอออนแคดเมียมกับสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) เท่ากับ  $6.99 \times 10^{-7}$  เซนติเมตรต่อวินาที เห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคสารละลายป้อน ดังนั้นแสดงว่าการแพร่ของไอออนเชิงซ้อนของแคดเมียมกับสารสกัด D2EHPA ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการถ่ายเทมวล

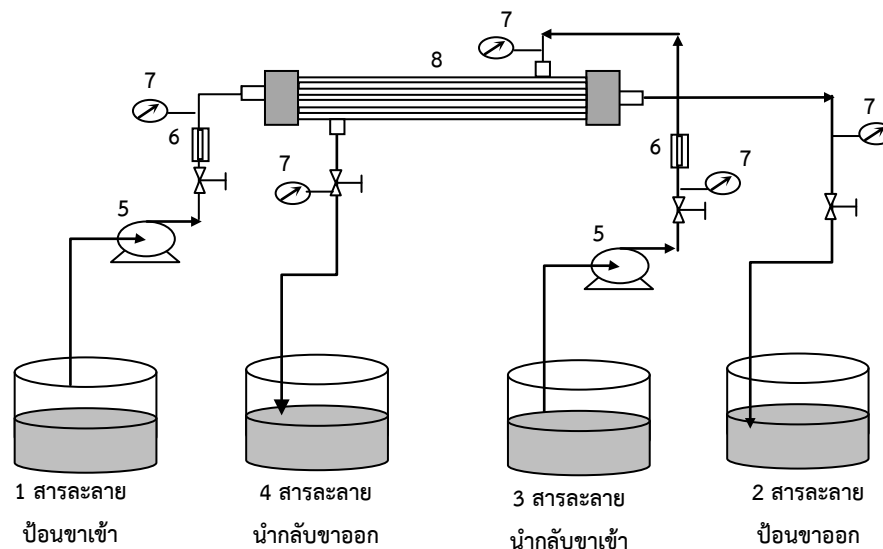


**รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $(r_i/r_{lm}) \left( \frac{[H^+]}{K_{ex} [(HA_2)^2]} \right)$  ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง 0.02-0.22 โมลาร์

#### 4.4 การแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 และ 2 มอดูล

##### 4.4.1 การแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล

การศึกษาการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนโลหะชนิดต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีซึ่งมีไอออนโลหะชนิดต่างๆ เช่น แคตเมียม สังกะสี แมงกานีส และแมกนีเซียม ดังองค์ประกอบที่ได้แสดงในบทที่ 1 ตารางที่ 1.1 การศึกษาการแยกแบบคัดเลือกไอออนโลหะต่างๆ มีปัจจัยคงที่ ดังนี้ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ กรดซัลฟิวริก 3 ให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อและสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือกที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน ดังรูปที่ 4.12 ผลการทดลองพบว่าไอออนสังกะสีจะถูกแยกออกก่อนไอออนแคตเมียม ส่วนไอออนแมงกานีสและแมกนีเซียมไม่เกิดการแยกและการนำกลับ เนื่องจากสังกะสีและแคตเมียมเป็นธาตุในกลุ่มโลหะทรานซิชันที่มีสมบัติคล้ายกัน (หมู่ 2B) ดังนั้นภาวะในการแยกและการนำกลับที่เหมาะสมในการแยกไอออนแคตเมียมจึงสามารถแยกไอออนสังกะสีได้ดีเช่นกัน และโดยทั่วไปการแพร่ขึ้นกับขนาด รูปร่างของโมเลกุล และความเข้มข้นของสารที่แพร่ สังกะสีมีมวลอะตอมต่ำและขนาดโมเลกุลเล็กกว่าแคตเมียม รวมถึงมีความเข้มข้นในสารละลายป้อนสูงกว่าไอออนแคตเมียมมาก จึงคาดว่าไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีสามารถแพร่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวได้ดีกว่าไอออนเชิงซ้อนของแคตเมียมและทำให้เกิดการแยกแบบคัดเลือก

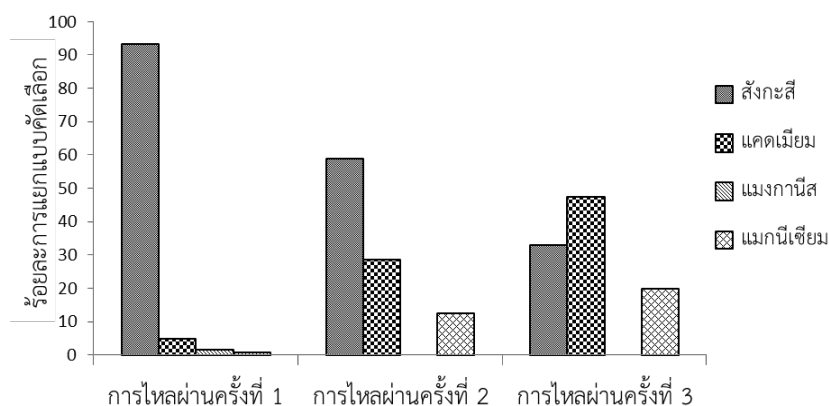


**รูปที่ 4.12** ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับไหลสวนทางกันในมอดูลเส้นใยกลวง 1 มอดูล

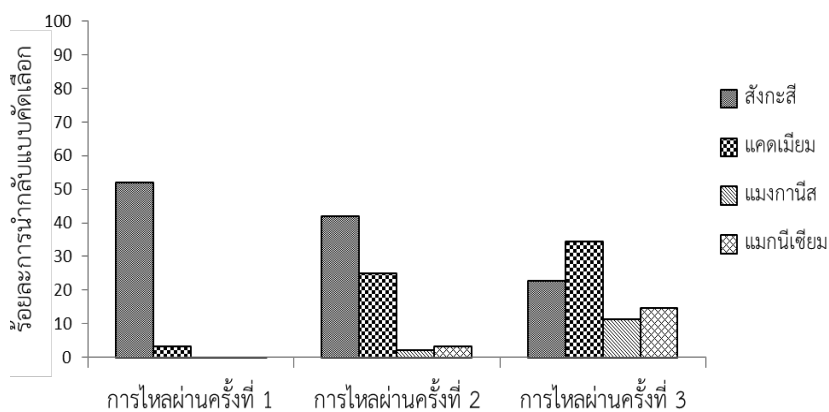
- หมายเลข 1 : สารละลายป้อนขาเข้า      หมายเลข 5 : ปั๊ม  
 หมายเลข 2 : สารละลายป้อนขาออก      หมายเลข 6 : เครื่องวัดอัตราการไหล  
 หมายเลข 3 : สารละลายน้ำกลับขาเข้า      หมายเลข 7 : เครื่องวัดแรงดัน  
 หมายเลข 4 : สารละลายน้ำกลับขาออก      หมายเลข 8 : มอดูลเส้นใยกลวง

ในการทดลองได้เปรียบเทียบการแยกและการนำกลับไอออนโลหะทั้ง 4 ชนิด กับจำนวนครั้งที่น้ำเสียจากอุตสาหกรรมถูกล้างด้วยน้ำจืดผ่านมอดูลเส้นใยกลวง ดังนี้

1. การไหลผ่านครั้งที่ 1 ร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกไอออนสังกะสี สูงสุดที่ 93.25 และ 52.16 ตามลำดับ และพบว่าความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออก 29.42 ส่วนในล้านส่วน
2. การไหลผ่านครั้งที่ 2 ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนสังกะสี 58.89 และ 42.11 ตามลำดับ และพบว่าความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออก 2.54 ส่วนในล้านส่วน
3. การไหลผ่านครั้งที่ 3 ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม 47.24 และ 34.44 ตามลำดับ และพบว่าความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออกเหลือ 0.02 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งอยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (ไม่เกิน 0.03 ส่วนในล้านส่วน)



**รูปที่ 4.13** ร้อยละการแยกไอออนโลหะต่างๆ กับจำนวนครั้งในการไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลาง: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาที



**รูปที่ 4.14** ร้อยละการนำกลับไอออนโลหะต่างๆ กับจำนวนครั้งในการไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลาง: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาที

#### 4.4.2 การแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล

ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีจากมอดูลที่ 1 มีค่าเกินข้อกำหนดของมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม จึงเลือกใช้การต่อมอดูลเส้นใยกลวงแบบอนุกรม 2 มอดูล ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการแยกและการนำกลับ จึงถ่ายเทมวลไอออนที่ต้องการแยกได้สูงขึ้น ดังนั้นจึงพิจารณาร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีโดยการต่อมอดูลเส้นใยกลวงแบบอนุกรม 2 มอดูล โดยค่านี้น่าจะความเข้มข้นของไอออนแคตเมียมในสารละลายป้อนขาออกอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

##### 4.4.2.1 พิจารณาร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกในมอดูลตัวที่ 1

พิจารณาร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกไอออนสังกะสี และไอออนแคตเมียมผ่านมอดูลเส้นใยกลวงที่ต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล ด้วยการเก็บตัวอย่างจากสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกจากมอดูลตัวที่ 1 พบว่า

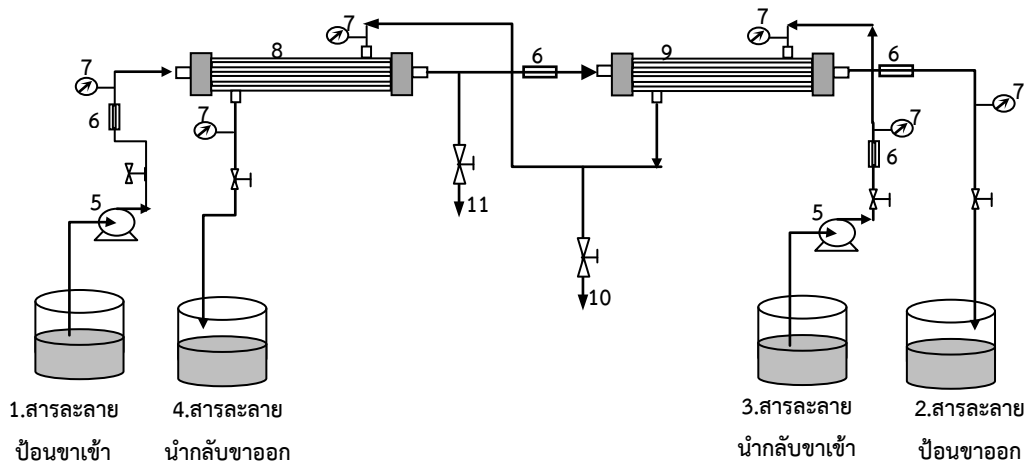
1. การไหลผ่านครั้งที่ 1 สามารถแยกและนำกลับไอออนสังกะสีได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับไอออนโลหะอื่น ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนสังกะสี เท่ากับ 93.64 และ 78.16 ตามลำดับ
2. การไหลผ่านครั้งที่ 2 สามารถแยกและนำกลับไอออนแคตเมียมได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับไอออนโลหะอื่น ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมเท่ากับ 55.24 และ 29.16 ตามลำดับ

##### 4.4.2.2 พิจารณาร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกในมอดูลตัวที่ 2

พิจารณาร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกไอออนสังกะสี และไอออนแคตเมียมผ่านมอดูลเส้นใยกลวงที่ต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล ด้วยการเก็บตัวอย่างจากสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกจากมอดูลตัวที่ 2 พบว่า

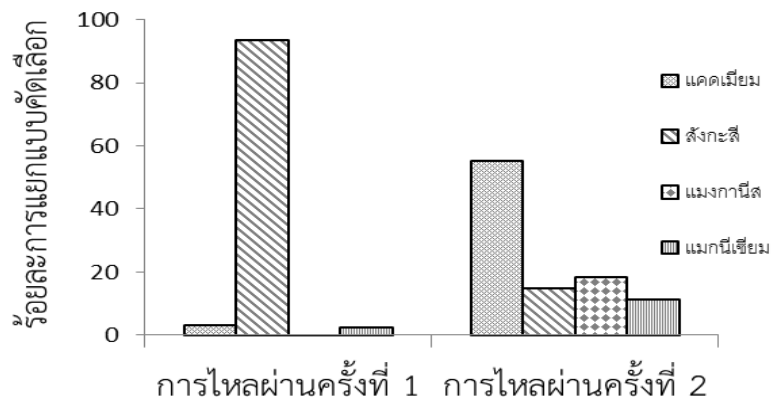
1. การไหลผ่านครั้งที่ 1 ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนสังกะสีและแคตเมียมมีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่าสารละลายป้อนขาออกมีความเข้มข้นของไอออนแคตเมียมเท่ากับ 3.20 ส่วนในล้านส่วน
2. การไหลผ่านครั้งที่ 2 ร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนสังกะสีและแคตเมียมต่ำ และพบว่าสารละลายป้อนขาออกมีความเข้มข้นของไอออนแคตเมียมเท่ากับ 0.03 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม



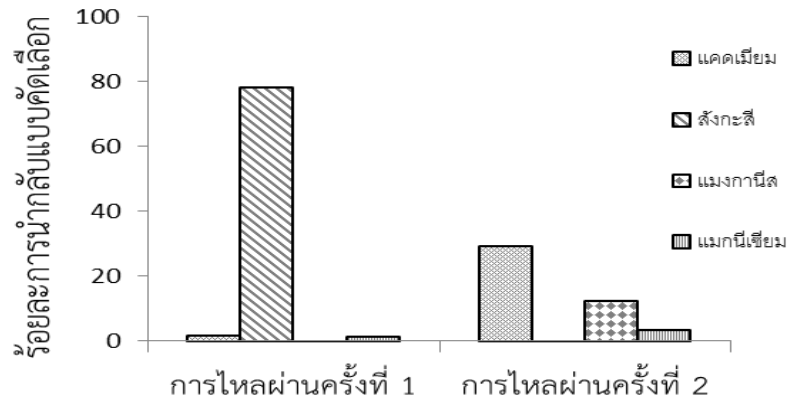


รูปที่ 4.15 ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับไหลสวนทางกันในมอดูลเส้นใยกลวงที่ต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล

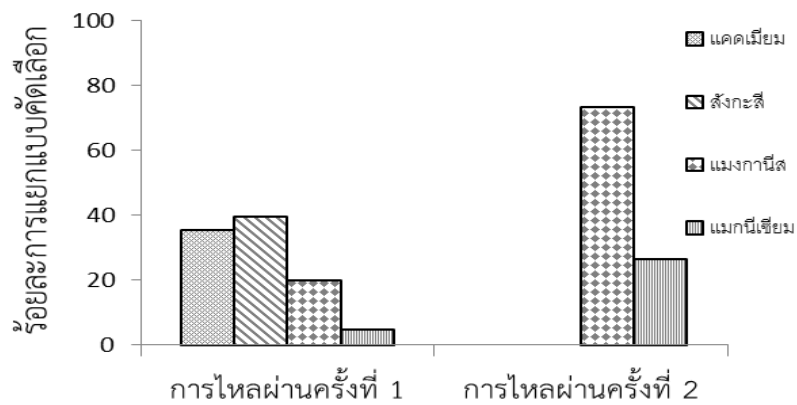
- หมายเลข 1 : สารละลายป้อนขาเข้า
- หมายเลข 2 : สารละลายป้อนขาออก
- หมายเลข 3 : สารละลายน้ำกลับขาเข้า
- หมายเลข 4 : สารละลายน้ำกลับขาออก
- หมายเลข 5 : ปัม
- หมายเลข 6 : เครื่องวัดอัตราการไหล
- หมายเลข 7 : เครื่องวัดแรงดัน
- หมายเลข 8 : มอดูลเส้นใยกลวงตัวที่ 1
- หมายเลข 9 : มอดูลเส้นใยกลวงตัวที่ 2
- หมายเลข 10 : สารละลายน้ำกลับขาออกจากมอดูลตัวที่ 2
- หมายเลข 11 : สารละลายป้อนขาออกจากมอดูลตัวที่ 1



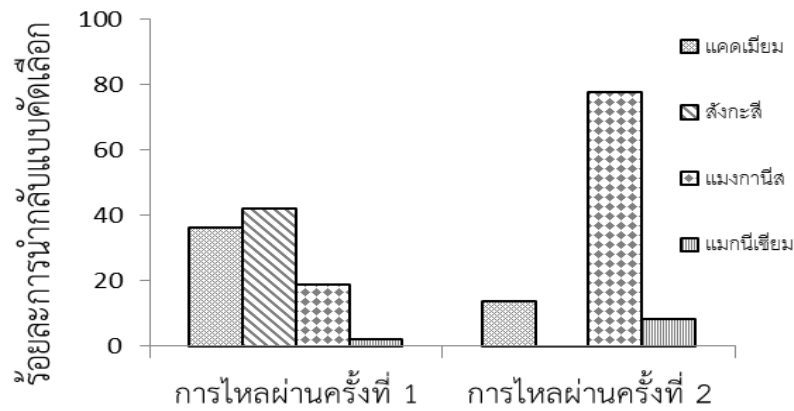
รูปที่ 4.16 ร้อยละการแยกแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีกับจำนวนครั้งในการไหลผ่านด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและน้ำกลับจากมอดูลตัวที่ 1 โดยการต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลาย เครโซลีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายน้ำกลับกรดซัลฟิวริก 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาที



**รูปที่ 4.17** ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีกับจำนวนครั้งในการไหลผ่านด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 1 โดยการต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาที



**รูปที่ 4.18** ร้อยละการแยกแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีกับจำนวนครั้งในการไหลผ่านด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 2 โดยการต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลาย เคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาที



**รูปที่ 4.19** ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีกับจำนวนครั้งในการไหลผ่านด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 2 โดยการต่อแบบอนุกรม 2 มอดูล: ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายนำกลับ กรดซัลฟิวริก 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาที

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ใช้ปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกันที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บสารละลายตัวอย่างที่เวลา 40 นาที ภาวะการแยกและการนำกลับที่เหมาะสมของไอออนแคดเมียม สามารถแยกและนำกลับไอออนแคดเมียมได้สูงสุดร้อยละ 97 และ 58 ตามลำดับ สรุปได้ดังตารางที่ 5.1

**ตารางที่ 5.1** สรุปภาวะที่เหมาะสมในการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ภูมิภาค	ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	ภาวะที่ศึกษา	ภาวะที่เหมาะสม
สารละลายป้อน	1.ความเป็นกรด-เบส	pH 1.5-6.5	5.5
เยื่อแผ่นเหลว	1.ชนิดของสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีน	1.D2EHPA 2.Cyanex 923	D2EHPA
	2.ความเข้มข้นของสารสกัด (โมลาร์)	0.02-0.22 โมลาร์	0.12
สารละลายนำกลับ	1.ชนิดของสารละลายนำกลับ	1.กรดแอสติค 2.กรดซัลฟิวริก 3.น้ำกลั่น	กรดซัลฟิวริก
	2.ความเป็นกรด-เบส	pH 1-6	3

## 5.1 การคำนวณค่าคงที่เกี่ยวกับการถ่ายเทมวล

จากภาวะการแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่เหมาะสม สามารถนำผลที่ได้ไปคำนวณค่าคงที่เกี่ยวกับการถ่ายเทมวล ดังนี้

1. ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการแยกไอออนแคตเมียม ( $K_{ex}$ ) มีค่าเท่ากับ  $8.48 \times 10^{-4}$
2. สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแคตเมียมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ( $D^*$ ) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ เท่ากับ  $4.31 \times 10^{-5}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที
3. สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของไอออนแคตเมียม ( $P$ ) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ เท่ากับ  $2.71 \times 10^{-4}$
4. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคตเมียมในสารละลายป้อน ( $k_f$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคตเมียมเชิงซ้อนในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) มีค่าเท่ากับ  $2.73 \times 10^{-4}$  และ  $6.99 \times 10^{-7}$  เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

คำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคตเมียมเพื่อหาขั้นตอนควบคุมการถ่ายเทมวล (mass-transfer-controlling step) ของไอออนแคตเมียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคตเมียมในสารละลายป้อน ( $k_f$ ) มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนระหว่างไอออนแคตเมียมกับสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ดังนั้น การแพร่ของไอออนเชิงซ้อนในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวจึงเป็นขั้นตอนควบคุมการถ่ายเทมวล (mass-transfer-controlling step)

## 5.2 การแยกและการนำกลับไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงสามารถบำบัดไอออนแคตเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ดังนี้

1. การแยกด้วยมอดูลเส้นใยกลวง 1 มอดูล ต้องไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวง 3 ครั้ง ได้ความเข้มข้นขาออก 0.02 ส่วนในล้านส่วน
2. การแยกด้วยการต่อมอดูลเส้นใยกลวงแบบอนุกรม 2 มอดูล ต้องไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวง 2 ครั้ง ได้ความเข้มข้นขาออก 0.03 ส่วนในล้านส่วน

ตารางที่ 5.2 ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออกจากการไหลผ่านครั้งที่ 1-3 ด้วย 1 และ 2 มอดูล

การต่อมอดูล	การไหลผ่านครั้งที่ 1 (ส่วนในล้านส่วน)	การไหลผ่านครั้งที่ 2 (ส่วนในล้านส่วน)	การไหลผ่านครั้งที่ 3 (ส่วนในล้านส่วน)
1 มอดูล	29.42	2.5	0.02
อนุกรม 2 มอดูล	3.20	0.03	-

3. การเพิ่มมอดูลสามารถเพิ่มร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนโลหะต่างๆ ในการไหลผ่านแต่ละครั้ง

### ข้อเสนอแนะ

1. เส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลองเป็นพอลิเมอร์ชนิดพอลิโพรพิลีน เป็นพอลิเมอร์ชนิดไม่ชอบน้ำ เพื่อไม่ให้เยื่อแผ่นเหลวหลุดออกจากมอดูลเส้นใยกลวงจึงต้องใช้สารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ดังนั้นควรมีการศึกษาชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์หรือเปรียบเทียบเพิ่มเติม เพื่อให้การแยกและการนำกลับไอออนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2. ความเข้มข้นของไอออนโลหะต่างๆ ที่นำมาวิเคราะห์มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันมาก จึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ปริมาณสาร ดังนั้นควรแยกช่วงความเข้มข้นให้เหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ เพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น

3. ในการหาขั้นตอนควบคุมการถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียม เป็นผลจากการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ จึงอาจมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียมจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีซึ่งมีไอออนโลหะต่างๆ ละลายอยู่ ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการหาขั้นตอนควบคุมการถ่ายเทมวล โดยการใช้สารละลายไอออนโลหะผสมเพื่อให้เกิดความถูกต้องมากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] Safarzadeh, M.S., Bafghi, M.S., Moradkhani, D., and Ilkhchi, M.O. A review on hydrometallurgical extraction and recovery of cadmium from various resources. Minerals Engineering. 20 (2007) : 211–220.
- [2] Benguella, B., and Benaissa, H. Cadmium removal from aqueous solution by chitin kinetic and equilibrium studies. Water Research. 36 (2002) : 2463-2474.
- [3] Mohan, D., and Singh, K.P. Single and multi-component adsorption of cadmium and zinc using activated carbon derived from bagasse-an agricultural waste. Water Research. 36 (2002) : 2304–2318.
- [4] World Health Organization. Exposure to Cadmium: a Major Public Health Concern. Available from <http://www.who.int/ipcs/features/cadmium.pdf> [2013, April 1]
- [5] World Health Organization (Regional Office for the Eastern Mediterranean Regional Centre for Environmental Health Activities). A Compendium of Standards for Wastewater Reuse in the Eastern Mediterranean Region, 2006. Available from <http://applications.emro.who.int/dsaf/dsa1184.pdf> [2013, April 1]
- [6] กระทรวงอุตสาหกรรม. กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน. ฉบับที่ 2, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. 2539.
- [7] Rathore, N.S., Leopold, A., Pabby, A.K., Fortuny, A., Coll, M.T., and Sastre, A.M. Extraction and permeation studies of Cd(II) in acidic and neutral chloride media using Cyanex 923 on supported liquid membrane. Hydrometallurgy. 96 (2009) : 81–87.
- [8] EPA. Water-related environmental fate of 129 priority pollutants: volume I. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C., 1979.
- [9] Inbaraj, B.S., Wang, J.S., Lu, J.F., Siao, F.Y., and Chen, B.H. Adsorption of toxic mercury(II) by an extracellular biopolymer poly(c-glutamic acid). Bioresource Technology. 100 (2009) : 200–207.

- [10] Tavlarides, L.L. Bae, J.H., and Lee C.K. Solvent extraction, membranes and ion exchange in hydrometallurgical dilute metals separation. Separation Science and Technology. 22 (1987) : 581-617.
- [11] Li, Y.H., Wang, S., Luan, Z., Ding, J., Xu, C., and Wu, D. Adsorption of cadmium (II) from aqueous solution by surface oxidized carbon nanotubes. Carbon. 41 (2003) : 1057-1062.
- [12] Yang, B., Wang, C.Y., Li, D.F., Yin F., Chen, Y.Q., and Wang, N.W. Selective separation of copper and cadmium from zinc solutions by low current density electrolysis. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 20 (2010) : 533-536.
- [13] Klaassen, R., Feron, P., and Jansen, A. Membrane contactor applications. Desalination. 224 (2008) : 81-87.
- [14] 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 (2009) : 518-523.
- [15] Kirk-Othmer. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 5<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons, 2005.
- [16] Reddy, B.R., Priya, D.N., and Kumar J.R. Solvent extraction of cadmium(II) from sulphate solutions using TOPS 99, PC 88A, Cyanex 272 and their mixtures. Hydrometallurgy. 74 (2004) : 277-283.
- [17] Swain, B., Sarangi, K., and Das, R.P. Separation of cadmium and zinc by supported liquid membrane using TOPS-99 as mobile carrier. Separation Science and Technology. 39 (2004) : 2171-2188.
- [18] Parhi, P.K., Das, N.N., and Sarangi, K. Extraction of cadmium from dilute solution using supported liquid membrane. Journal of Hazardous Materials. 172 (2009) : 723-729.
- [19] Kumar, V., Kumar, M., Jha, M.K., Jeong, J., and Lee, J. Solvent extraction of cadmium from sulfate solution with di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid diluted in kerosene. Hydrometallurgy. 96 (2009) : 230-234.



- [20] Sato, T., Shimomura, T., Murakami, S., Maeda, T., and Nakamura, T. Liquid-liquid extraction of divalent manganese, cobalt, copper, zinc and cadmium from aqueous chloride solutions by tricaprylmethylammonium chloride. Hydrometallurgy. 12 (1984) : 245-254.
- [21] Reddy, B.R., Priya, D.N., Rao, S.V., and Radhika, P. Solvent extraction and separation of Cd(II), Ni(II) and Co(II) from chloride leach liquors of spent Ni-Cd batteries using commercial organo-phosphorus extractant. Hydrometallurgy. 77 (2005) : 253-261.
- [22] Swain, B., Sarangi, K., and Das, R.P. Effect of different anion on separation of cadmium and zinc by supported liquid membrane using TOPS-99 as mobile carrier. Journal of Membrane Science. 277 (2006) : 240-248.
- [23] Mortaheb, H.R., Kosuge, H., Mokhtarani, B., Amini, M.H., and Banihashemi, H.R. Study on removal of cadmium from wastewater by emulsion liquid membrane. Journal of Hazardous Materials. 165 (2009) : 630-636.
- [24] Tsakiridis, P.E., and Agatzini, S.L. Simultaneous solvent extraction of cobalt and nickel in the presence of manganese and magnesium from sulfate solutions by Cyanex 301. Hydrometallurgy. 72 (2004) : 269–278.
- [25] Tsakiridis, P.E., and Agatzini, S.L. Solvent extraction of aluminium in the presence of cobalt, nickel and magnesium from sulphate solutions by Cyanex 272. Hydrometallurgy. 80 (2005) : 90– 97.
- [26] Yu, J., and Liu, D. Extraction of magnesium from phosphoric acid using dinonylnaphthalene sulfonic acid. Chemical Engineering Research and Design. 88 (2010) : 712–717.
- [27] Sato, T., and Nakamura, T. Solvent extraction of divalent metals from sulfuric acid solutions by dialkylphosphoric acid. Journal of the Mining and Metallurgical Institute Japan. 101 (1985) : 309–312.
- [28] Devi, N.B., and Mishra, S. Solvent extraction equilibrium study of manganese(II) with Cyanex 302 in kerosene. Hydrometallurgy. 103 (2010) : 118–123.
- [29] Sousa Jr., C.S., Nascimento, M., Masson, I.O.C., and Cunha, O.G.C. Equilibrium study for manganese extraction in sulfate media with D2EHPA in Isoparaffin (17/21). Hydrometallurgy. 103 (2010) : 114–117.

- [30] Pakarinen, J., and Paatero, E. Effect of temperature on Mn-Ca selectivity with organophosphorus acid extractants. Hydrometallurgy. 106 (2011) : 159-164.
- [31] Marr, R., and Kopp, A. Liquid membrane technology a survey of phenomena. American Institute of Chemical Engineering Journal. (1982) : 44-60.
- [32] Schulz, G. Separation techniques with supported liquid membranes. Desalination. 68 (1988) : 191-202.
- [33] วิทยา นามสว่าง. การแยกไอออนแลนทานัมเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [34] Gu, Z. Electrostatic Pseudo-Liquid-Membrane. Membrane Handbook. New York : Van Nostrand Reinhold, (1992) : 867-884.
- [35] อรุา ปานเจริญ. กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [36] ปกรณ์ รามกุล. การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดิเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544.
- [37] 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. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 11 (2005) : 926-931.
- [38] Ramakul, P., and Pancharoen, U. Synergistic extraction and separation of mixture of lanthanum and neodymium by hollow fiber supported liquid membrane. Korean Journal of Chemical Engineering. 20 (2003) : 724-730.
- [39] Uedee, E., Ramakul, P., Pancharoen, U., and Lothongkum, A.W. Performance of hollow fiber supported liquid membrane on extraction of mercury(II) ions. Korean Journal Chemical Engineering. 25 (2008) : 1486-1494.
- [40] Marchese, J., and Campderros, M. Mass transfer of cadmium ions in a hollow-fiber module by pertraction. Desalination. 164 (2004) : 141-149.

- [41] Danesi, P.R. A simplified model for the coupled transport of metal ions through hollow fiber supported liquid membranes. Journal of Membrane Science. 20 (1984) : 231-248.
- [42] Kislik, V.S. Carrier - Facilitated coupled transport through liquid membranes : general theoretical considerations and influencing parameters. In V.S. Kislik (ed.), Liquid membranes : Principles and applications in chemical separations and wastewater treatment. 1<sup>st</sup> ed. Elsevier B.V. (2010) : 17-71.
- [43] Koekemoer, L.R., Badenhorst, M.J.G., and Everson, R.C. Determination of viscosity and density of Di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid + aliphatic kerosene. Journal of Chemical and Engineering Data. 50 (2005) : 587-590.
- [44] Lothongkum, A.W., Khemglad, Y., Usomboon, N., and Pancharoen, U. Selective recovery of nickel ions from wastewater of stainless steel industry via HFSLM. Journal of Alloys and Compounds. 476 (2009) : 940-949.
- [45] 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 (2010) : 72-79.
- [46] Lawrance, A.G. Introduction to Coordination Chemistry. 1<sup>st</sup> ed. The United Kingdom : John Wiley and Sons Ltd., 2010.
- [47] Wannachod, P., Chaturabul, S., Pancharoen, U., Lothongkum, A.W., and Patthaveekongka, W. The effective recovery of praseodymium from mixed rare earths via a hollow fiber supported liquid membrane and its mass transfer related. Journal of Alloys and Compounds. 509 (2011) : 354-361.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณ

**ก-1 การคำนวณร้อยละการแยกและการนำกลับไอออนแคดเมียม**

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

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

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

โดยที่

$C_{f,in}$  คือ ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาเข้า (ส่วนในล้านส่วน)

$C_{f,out}$  คือ ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออก (ส่วนในล้านส่วน)

$C_{s,out}$  คือ ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายนำกลับขาออก (ส่วนในล้านส่วน)

**1. การคำนวณร้อยละการแยก**

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-6 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับ 0.12 โมลาร์  
ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาเข้า = 51.10 ส่วนในล้านส่วน  
ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออก = 1.49 ส่วนในล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการแยก} &= \frac{51.10 - 1.49}{51.10} \times 100 \\ &= 97.08 \text{ (ตั้งตารางที่ ข-6)} \end{aligned}$$

**2. การคำนวณร้อยละการนำกลับ**

จากสมการการคำนวณร้อยละการนำกลับ

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-6 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์  
ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายนำกลับขาออก = 29.22 ส่วนในล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการนำกลับ} &= \frac{29.22}{51.10} \times 100 \\ &= 57.18 \text{ (ตั้งตารางที่ ข-6)} \end{aligned}$$

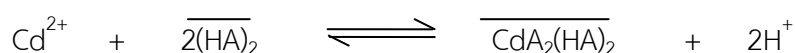
## ก-2 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant, $K_{ex}$ )

จากสมการการคำนวณค่าคงที่สมดุลสมการที่ (2.16)

$$K_{ex} = \frac{[CdA_2(HA)_2]_{Org} [H^+]_{Aq}^2}{[Cd^{2+}]_{Aq} [(HA)_2]_{Org}^2}$$

วิธีการหาค่าความเข้มข้น (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-6)

จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนแคดเมียมและความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมเมื่อใช้สารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์



$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาเข้า} &= 4.546 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= (51.10 \text{ ส่วนในล้านส่วน}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออก} &= 1.326 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= (1.49 \text{ ส่วนในล้านส่วน}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมที่หายไปทำปฏิกิริยา} &= 4.546 \times 10^{-4} - 1.326 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= 4.413 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมที่หายไปทำปฏิกิริยา หรือความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อน  $[CdA_2(HA)_2]$  ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการแยกไอออนแคดเมียมมีค่าเท่ากับ  $4.413 \times 10^{-4}$  โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เวลาเริ่มต้นมีค่า ดังนี้

$$\begin{aligned} [Cd^{2+}] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาเข้า} \ 51.10 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ &= 4.546 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [(HA)_2] &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับ} \ 0.12 \text{ โมลาร์} \\ &= 1.225 \times 10^{-1} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สมดุลมีค่า ดังนี้

$$\begin{aligned} [Cd^{2+}] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออก} \ 1.49 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ &= 1.326 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [(HA)_2] &= 0.12 - 2 \times (4.546 \times 10^{-4}) \\ &= 1.119 \times 10^{-1} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่สมดุลมีค่า ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ไอออนเชิงซ้อน } [\text{CdA}_2(\text{HA})_2] &= 4.546 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร} \\ [\text{H}^+] &= 2 \times (4.546 \times 10^{-4}) \\ &= 9.092 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร} \\ \text{ดังนั้น } [\text{CdA}_2(\text{HA})_2][\text{H}^+]^2 &= 4.546 \times 10^{-4} \times (9.092 \times 10^{-4})^2 \\ &= 3.758 \times 10^{-10} \text{ โมลต่อลิตร} \\ \text{และ } [\text{Cd}^{2+}][(\text{HA})_2^-] &= (1.326 \times 10^{-5}) \times (1.119 \times 10^{-1})^2 \\ &= 1.660 \times 10^{-7} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

สร้างกราฟระหว่าง  $[\text{CdA}_2(\text{HA})_2][\text{H}^+]^2$  กับ  $[\text{Cd}^{2+}][(\text{HA})_2^-]$  ในรูปที่ 4.10 และหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการแยกไอออนแคดเมียม ( $K_{ex}$ ) จากความชันของกราฟได้เท่ากับ  $8.48 \times 10^{-4}$

### ก-3 ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (permeability coefficient, $P$ )

สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านคำนวณจากสมการที่ (2.22) คำนวณที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับ 0.12 โมลาร์ โดยใช้สมการของ Denesi ที่เวลา 20 นาที (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-10)

$$-V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f,0}} \right) = AP \frac{\beta}{\beta + 1} t, \quad \beta = \frac{Q_f}{PL\epsilon\pi Nr_i}$$

โดยที่

- $P$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
- $V_f$  คือ ปริมาตรของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)  
5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- $C_f$  คือ ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาเข้า (ส่วนในล้านส่วน)
- $C_{f,0}$  คือ ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาเข้าที่เวลาเริ่มต้น (ส่วนในล้านส่วน)
- $A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล (ตารางเซนติเมตร)  
 $1.40 \times 10^4$  ตารางเซนติเมตร
- $t$  คือ เวลา (นาที)
- $Q_f$  คือ อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)  
100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



- $L$  คือ ความยาวของมอดูล (เซนติเมตร)  
20.3 เซนติเมตร
- $\epsilon$  คือ ความพรุนของเส้นใยกลาง (ร้อยละ)  
30 %
- $N$  คือ จำนวนเส้นใยกลาง (เส้น)  
10,000 เส้น
- $r_i$  คือ รัศมีภายในเส้นใยกลาง (เซนติเมตร)  
0.012 เซนติเมตร
- $A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล  
 $1.4 \times 10^4$  ตารางเซนติเมตร

แทนค่าในสมการ

$$-5,000 \left( \frac{3.73}{58.5} \right) = 1.40 \times 10^{-4} P \frac{\beta}{\beta + 1} t$$

$$\beta = \frac{100}{P \times 20.3 \times 0.3 \times \pi \times 10,000 \times 0.012}$$

$$-5,000 \left( \frac{3.73}{58.5} \right) = 1.4 \times 10^{-4} \frac{0.0435}{0.0435P + P^2} t$$

ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f,0}} \right)$  กับเวลา ได้ความชันในแต่ละช่วงความเข้มข้น และนำค่าความชันไปหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านแต่ละความเข้มข้น พบว่าที่ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ มีความชัน คือ 3.763

ความชันที่ความเข้มข้นสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ คือ 3.763 ดังนั้น

$$3.763 = 1.4 \times 10^{-4} P \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$P = 2.71 \times 10^{-4}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของไอออนแคตเมียม ( $P$ ) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ มีค่า  $2.71 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที

ก-4 ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแคดเมียมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ( $D_m^*$ )

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแคดเมียมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว จากสมการของ Wilke-Chang สมการที่ (2.24)

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

โดยที่

$M$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของแคโรซีน  
200 กรัมต่อโมล

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (เคลวิน)  
299 เคลวิน (25 องศาเซลเซียส)

$\eta$  คือ ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายแคโรซีน (cP)  
1.285 cP

$V_A$  คือ ปริมาตรเชิงโมลาร์ของสารละลายผสมเยื่อแผ่นเหลว (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)  
2.83 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} D_m^* &= \frac{7.4 \times 10^{-8} (200)^{0.5} 299}{1.241 \times 2.83^{0.6}} \\ &= 4.314 \times 10^{-5} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนแคดเมียมในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว คือ  $4.314 \times 10^{-5}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

ก-5 ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมในวัฏภาคสารละลายป้อน ( $k_i$ ) และวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมคำนวณจาก สมการที่ (2.19) คำนวณที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับ 0.12 โมลาร์ โดยพิจารณาจากการถ่ายเทมวลจากความต้านทานการแพร่ผ่านจากวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

พิจารณาการถ่ายเทมวลจากความต้านทานการแพร่จากวัฏภาคสารละลายป้อน และวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{Dk_m}, \quad r_{lm} = \frac{(r_o - r_i)}{\ln \frac{r_o}{r_i}}$$

โดยที่

$P$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (เซนติเมตรต่อวินาที)

$k_i$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)

$r_i$  คือรัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

$r_{lm}$  คือรัศมี log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

$D$  คือ อัตราการกระจายตัว (-)

$k_m$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบไอออนเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)

$r_o$  คือรัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และ  $(r_i/r_{lm})([H^+]/K_{ex}[(HA_2)^2])$  จากสมการที่ (2.20) นำมาสร้างกราฟที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่างๆ โดยพิจารณาจากการถ่ายเทมวลจากความต้านทาน ดังรูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $(r_i/r_{lm})([H^+]/K_{ex}[(HA_2)^2])$  ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง 0.02-0.22 โมลาร์ สมการที่เกิดขึ้น คือ

$$\frac{1}{P} = 1.43 \times 10^6 X + 3.67 \times 10^3$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{1}{k_i} = 3,660 \quad ; k_i = 2.73 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

$$\frac{1}{k_m} = 1.43 \times 10^6 \quad ; k_m = 6.99 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

#### ก-6 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนแต่ละชนิด

ร้อยละการแยกแบบคัดเลือกคำนวณจากสมการที่ (2.26) ดังนี้

$$\text{ร้อยละการแยกแบบคัดเลือก} = \frac{[C]_{f,in}^i - [C]_{f,out}^i}{\sum_{i=1}^n ([C]_{f,in}^i - [C]_{f,out}^i)} \times 100$$

$$\text{ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือก} = \frac{[C]_{s,out}^i - [C]_{s,in}^i}{\sum_{i=1}^n ([C]_{f,in}^i - [C]_{f,out}^i)} \times 100$$

เมื่อ

$[C]_{f,in}^i$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายป้อนขาเข้า (ส่วนในล้านส่วน)

$[C]_{f,out}^i$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายป้อนขาออก (ส่วนในล้านส่วน)

$[C]_{s,out}^i$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายนำกลับขาออก (ส่วนในล้านส่วน)

$[C]_{s,in}^i$  คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในสารละลายนำกลับขาเข้า (ส่วนในล้านส่วน)

### 1. การคำนวณร้อยละการแยกแบบคัดเลือก

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-11 ที่การไหลผ่านครั้งที่ 1

ร้อยละการแยกแบบคัดเลือกของไอออนแคดเมียม คือ

$$\begin{aligned} & \frac{(45.72 - 29.42)}{\{(45.72 - 29.42) + (346 - 24.18) + (345 - 340) + (1,842 - 1,840)\}} \times 100 \\ &= \frac{16.28}{345.10} \times 100 \\ &= 4.72 \end{aligned}$$

### 2. การคำนวณร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือก

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-11 ที่การไหลผ่านครั้งที่ 1

ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนแคดเมียม คือ

$$\begin{aligned} & \frac{16.38}{\{(45.72 - 29.42) + (346 - 24.18) + (345 - 340) + (1,842 - 1,840)\}} \times 100 \\ &= \frac{16.38}{345.10} \times 100 \\ &= 4.75 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

## ภาคผนวก ข

## ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ

ตาราง ข-1 ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมที่เวลาต่างๆ ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

เวลา (นาทิจ)	ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียม (ส่วนในล้านส่วน)
0	48.3
5	11.2
10	7.5
15	7.1
20	7.4
25	7.2

**สภาวะทดลอง:** สารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ความเข้มข้น 6.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 4 และความเร็วการปั่นกววน 1,000 รอบต่อนาที

ตาราง ข-2 ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมจากการเปรียบเทียบชนิดของสารสกัดด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ชนิดสารสกัด	สารละลายป้อน (ส่วนในล้านส่วน)		ร้อยละการแยก
	ขาเข้า	ขาออก	
D2EHPA	46.42	0.88	98.58
Cyanex 923	46.42	39.47	14.97

**สภาวะทดลอง:** สารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ความเข้มข้น 5.5 สารสกัด ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 4 เวลาในการปั่นกววน 10 นาที และความเร็วการปั่นกววน 1,000 รอบต่อนาที

**ตาราง ข-3** ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมจากการเปรียบเทียบความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ความเป็นกรด-เบส	สารละลายป้อน (ส่วนในล้านส่วน)		ร้อยละการแยก
	ขาเข้า	ขาออก	
1.5	46.42	37.53	19.15
2.5	46.42	31.36	32.44
3.5	46.42	25.59	44.87
4.5	46.42	9.33	79.90
5.5	46.42	0.66	98.59
6.5	46.42	1.52	96.73

**สภาวะทดลอง:** สารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกความเป็นกรด-เบส 4 เวลาในการปั่นกวน 10 นาที และความเร็วการปั่นกวน 1,000 รอบต่อนาที

**ตาราง ข-4** ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมจากการเปรียบเทียบชนิดสารละลายนำกลับด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ชนิดสารละลายนำกลับ	สารละลายนำกลับ (ส่วนในล้านส่วน)		ร้อยละการนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก	
กรดซัลฟิวริก	46.42	27.67	59.61
น้ำกลั่น	46.42	0.03	0.05
กรดแอสติค	46.42	5.36	11.55

**สภาวะทดลอง:** สารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ความเป็นกรด-เบส 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน เวลาในการปั่นกวน 10 นาที และความเร็วการปั่นกวน 1,000 รอบต่อนาที

ตาราง ข-5 ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก  
ที่เวลา 0–50 นาที ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

เวลา (นาที)	สารละลายป้อน (ส่วนในล้านส่วน)	สารละลายนำกลับ (ส่วนในล้านส่วน)
0	51.12	0
5	20.00	7.4
10	11.33	14.06
15	9.02	17.6
20	7.14	24.26
25	6.75	26.3
30	5.13	27.67
35	3.28	28.4
40	1.44	29.34
45	1.43	29.4
50	1.49	29.22

สภาวะทดลอง: สารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ความเป็นกรด-เบส 5.5 สารสกัด  
D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับ  
กรดซัลฟิวริกความเป็นกรด-เบส 4 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและ  
สารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที



ตาราง ข-6 ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขา  
ที่ความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน 2.5-7.5 ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ความเป็น กรด-เบส	สารละลายป้อน (ส่วนในล้านส่วน)		สารละลายนำกลับขาออก (ส่วนในล้านส่วน)		ร้อยละ การแยก	ร้อยละ การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก		
2.5	51.42	40.27	0	10.72	21.68	20.85
3.5	51.26	27.25	0	14.52	46.84	28.33
4.5	51.16	10.32	0	20.55	79.81	40.20
5.5	51.12	1.49	0	29.22	97.09	57.16
6.5	52.04	2.32	0	28.41	95.54	54.59

สภาวะทดลอง: สารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกความเป็นกรด-เบส 4 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 50 นาที

ตาราง ข-7 ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก  
ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02–0.22 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน  
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

สารสกัด D2EHPA (โมลาร์)	สารละลายป้อน (ส่วนในล้านส่วน)		สารละลายนำกลับขาออก (ส่วนในล้านส่วน)		ร้อยละ การแยก	ร้อยละ การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก		
0.02	50.22	22.32	0	17.97	55.56	35.78
0.07	52.16	17.26	0	25.78	66.91	49.42
0.12	51.10	1.49	0	29.22	97.08	57.18
0.17	51.88	3.88	0	26.47	92.52	51.02
0.22	51.35	4.74	0	26.88	90.77	52.60

สภาวะทดลอง: สารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ความเป็นกรด-เบส 5.5 สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกความเป็นกรด-เบส 4 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 50 นาที

ตาราง ข-8 ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก  
ที่ความเป็นกรด-เบส ของสารละลายนำกลับ 1-6 ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ความเป็น กรด-เบส	สารละลายป้อน (ส่วนในล้านส่วน)		สารละลายนำกลับขาออก (ส่วนในล้านส่วน)		ร้อยละ การแยก	ร้อยละ การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก		
1	50.42	1.49	0	31.52	97.04	31.52
2	49.84	1.29	0	30.31	97.41	30.31
3	50.66	1.11	0	31.22	97.81	31.22
4	51.12	1.49	0	29.22	97.08	29.22
5	48.69	2.55	0	20.23	94.76	20.23
6	50.08	2.55	0	19.23	94.91	19.23

สภาวะทดลอง: สารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ที่ความเป็นกรด-เบส 5.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 50 นาที

ตาราง ข-9 ความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายป้อนขาออกที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02 ถึง 0.22 โมลาร์ ที่เวลาในการแยกต่างๆ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA (โมลาร์)						
	0.02	0.05	0.07	0.10	0.12	0.17	0.22
0	59.4	58.7	57.9	58.8	58.5	56.1	58.1
10	43.87	30.91	30.1	20.56	10.41	8.06	9.55
20	32.81	22.73	16.41	11.2	3.73	3	4.5
30	29.45	18.15	10.85	8.57	1.84	1.52	2.7
40	24.9	14.03	8.97	5.54	1.39	1.9	2.1

สภาวะทดลอง: สารละลายป้อนแคดเมียมซัลเฟตสังเคราะห์ที่ความเป็นกรด-เบส 5.5 สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกความเป็นกรด-เบส 3 และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ข-10 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านที่ความเข้มข้นต่างๆ กับความสัมพันธ์  $(r_i/r_{lm})([H^+]/K_{ex}[(HA_2)^2])$  ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.02 - 0.22 โมลาร์

D2EHPA (โมลาร์)	สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน ( $P$ )	$(r_i/r_{lm})([H^+]/K_{ex}[(HA_2)^2])$	ความชันกราฟจากสมการของ Denasi
0.02	$5.94 \times 10^{-5}$	$9.51 \times 10^{-3}$	0.831
0.05	$9.84 \times 10^{-5}$	$3.92 \times 10^{-3}$	1.375
0.07	$1.32 \times 10^{-4}$	$2.07 \times 10^{-3}$	1.836
0.10	$1.63 \times 10^{-4}$	$1.37 \times 10^{-3}$	2.279
0.12	$2.71 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-3}$	3.763
0.17	$2.62 \times 10^{-4}$	$4.61 \times 10^{-4}$	3.639
0.22	$2.42 \times 10^{-4}$	$2.97 \times 10^{-4}$	3.367

ตาราง ข-11 ความเข้มข้นของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีในสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับในการไหลผ่านครั้งที่ 1-3 ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง

การไหล ผ่านครั้งที่	สารละลายป้อนขาเข้า (หนึ่งในล้านส่วน)				สารละลายป้อนขาออก (หนึ่งในล้านส่วน)			
	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม
1	45.72	346	345	1,842	29.42	24.18	340	1,840
2	34.65	66.82	336	1,846	2.54	0.71	339	1,832
3	9.51	6.62	331	1,834	0.02	0.02	335	1,830

การไหล ผ่านครั้งที่	สารละลายนำกลับขาเข้า (หนึ่งในล้านส่วน)				สารละลายนำกลับขาออก (หนึ่งในล้านส่วน)			
	แคดเมียม	แคดเมียม	แคดเมียม	แคดเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม
1	0	0	0	0	11.38	180	1.32	0.2
2	0	0	0	0	28.18	47.28	2.51	3.61
3	0	0	0	0	6.92	4.58	2.31	2.94

สภาวะทดลอง: สารละลายป้อนความเป็นกรด-เบส 5.5 สารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกความเป็นกรด-เบส 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 50 นาที

ตาราง ข-12 ร้อยละการการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจาก อุตสาหกรรมถลุงสังกะสีในการไหลผ่านครั้งที่ 1-3 ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง

การไหล ผ่านครั้งที่	ร้อยละการแยกแบบคัดเลือก				ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือก			
	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม
1	4.72	93.25	1.45	0.58	4.75	52.16	0.38	0.06
2	28.64	58.89	0.00	12.47	25.10	42.11	2.24	3.22
3	47.24	32.85	0.00	19.91	34.44	22.80	11.50	14.63

ตาราง ข-13 ความเข้มข้นของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสี ในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในการไหลผ่านครั้งที่ 1-2 ด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบต่ออนุกรม 2 มอดูล ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 1

การไหล ผ่านครั้งที่	สารละลายป้อนขาเข้า (หนึ่งในสี่ส่วน)				สารละลายป้อนขาออก (หนึ่งในสี่ส่วน)			
	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม
1	48.69	323	339	1853	39.18	40.23	337	1,845
2	19.54	5.30	329	1831	0.03	0.03	322	1,827

การไหล ผ่านครั้งที่	สารละลายนำกลับขาเข้า (หนึ่งในสี่ส่วน)				สารละลายนำกลับขาออก (หนึ่งในสี่ส่วน)			
	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม
1	21.79	25.27	11.27	1.37	27.42	261	12.19	5.38
2	2.21	0.02	12.38	1.32	12.51	0.15	16.81	2.58

สภาวะทดลอง: สารละลายป้อนความเป็นกรด-เบส 5.5 สารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกความเป็นกรด-เบส 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 50 นาที

ตาราง ข-14 ร้อยละการการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีในการไหลผ่านครั้งที่ 1-2 ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบต่ออนุกรม 2 มอดูล ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 1

การไหล ผ่านครั้งที่	ร้อยละการแยกแบบคัดเลือก				ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือก			
	แคดเมียม	สังกะสี	แคดเมียม	สังกะสี	แคดเมียม	สังกะสี	แคดเมียม	สังกะสี
1	3.15	93.64	0.56	2.65	1.86	78.16	0.30	1.33
2	55.24	14.92	18.52	11.33	29.16	0.37	12.54	3.57

ตาราง ข-15 ความเข้มข้นของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในการไหลผ่านครั้งที่ 1-2 ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบต่ออนุกรม 2 มอดูล ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 2

การไหล ผ่านครั้งที่	สารละลายป้อนขาเข้า (หนึ่งในล้านส่วน)				สารละลายป้อนขาออก (หนึ่งในล้านส่วน)			
	แคดเมียม	แคดเมียม	แคดเมียม	แคดเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม
1	39.18	40.23	337	1845	3.20	0.21	317	1,840
2	0.03	0.03	322	1827	0.03	0.03	303	1,820

การไหล ผ่านครั้งที่	สารละลายนำกลับขาเข้า (หนึ่งในล้านส่วน)				สารละลายนำกลับขาออก (หนึ่งในล้านส่วน)			
	แคดเมียม	แคดเมียม	แคดเมียม	แคดเมียม	แคดเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	แมกนีเซียม
1	0.00	0.00	0.00	0.00	21.79	25.27	11.27	1.37
2	0.00	0.00	0.00	0.00	2.21	0.02	12.38	1.32

สภาวะทดลอง: สารละลายป้อนความเป็นกรด-เบส 5.5 สารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกความเป็นกรด-เบส 3 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลา 50 นาที

ตาราง ข-16 ร้อยละการแยกและการนำกลับแบบคัดเลือกของไอออนโลหะต่างๆ จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถลุงสังกะสีในการไหลผ่านครั้งที่ 1-2 ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบต่ออนุกรม 2 มอดูล ซึ่งพิจารณาจากสารละลายป้อนและนำกลับจากมอดูลตัวที่ 2

การไหล ผ่านครั้งที่	ร้อยละการแยกแบบคัดเลือก				ร้อยละการนำกลับแบบคัดเลือก			
	แคดเมียม	สังกะสี	แคดเมียม	สังกะสี	แคดเมียม	สังกะสี	แคดเมียม	สังกะสี
1	35.52	39.51	20.04	4.94	36.50	42.33	18.88	2.29
2	0.00	0.00	73.54	26.46	13.87	0.13	77.72	8.29

ภาคผนวก ค

ภาคผนวก ค  
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

หัวข้อคุณสมบัติของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน



ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม  
ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)  
ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535  
เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช่วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)” รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการ โรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของโรงงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- (1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0
- (2) ทิศีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้

2.1 ค่าทิสีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า ทิศีเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า ทิศีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

// (3) สารแขวนลอย ...



-2-

(3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้งแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

(4) โลหะหนักมีค่าดังนี้

4.1 ปรอท (Mercury)	ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.2 ซีลีเนียม (Selenium)	ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.3 แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.4 ตะกั่ว (Lead)	ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.5 อาร์เซนิก (Arsenic)	ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.6 โครเมียม (Chromium)	
4.6.1 Hexavalent Chromium	ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.6.2 Trivalent Chromium	ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.7 แบเรียม (Barium)	ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.8 นิกเกิล (Nickel)	ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.9 ทองแดง (Copper)	ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.10 สังกะสี (Zinc)	ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.11 แมงกานีส (Manganese)	ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(5) ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(6) ไอซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจน ไอซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

(7) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่มากกว่า 1	มิลลิกรัมต่อลิตร
(8) สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound)	ไม่มากกว่า 1	มิลลิกรัมต่อลิตร
(9) คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่มากกว่า 1	มิลลิกรัมต่อลิตร
(10) พืชพิษ (Pesticide)	ต้องไม่มี	
(11) อุณหภูมิ	ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส	
(12) สี	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	
(13) กลิ่น	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	

//(14) น้ำมันและไขมัน ...

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

**ชื่อ** นายทรงฤทธิ์ ตรีไพบูลย์

**เกิด** วันที่ 5 มกราคม 2528 ที่จังหวัดสงขลา

### การศึกษา

- พ.ศ. 2543 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนรัฐฯ จังหวัดตรัง
- พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสตรีทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช
- พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา
- พ.ศ. 2552 เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประสบการณ์

- พ.ศ. 2549 มีนาคม-พฤษภาคม นักศึกษาฝึกงานโรงแยกก๊าซธรรมชาติ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) จังหวัดนครศรีธรรมราช
- พ.ศ. 2550 เข้าทำงานบริษัท ฮอนด้าอโตโมบิล จำกัด ฝ่ายฉีดขึ้นรูปพลาสติก

### ทุนสนับสนุนการวิจัย

โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี-จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ผลงานทางวิชาการ

Songrit Treephaiboon, Ura Pancharoen, and Anchaleeporn W. Lothongkum. Separation and Recovery of Cadmium(II) from Wastewater of Zinc Mining by Using Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. 10<sup>th</sup> International Conference on Membrane Science and Technology 2012, Amari Atrium Hotel, Bangkok, Thailand, August 22-24, 2012.