

การถ่ายเทมวลของโบบอลต์ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นายเอกพิชญ์ ทรงคุณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขา

วิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

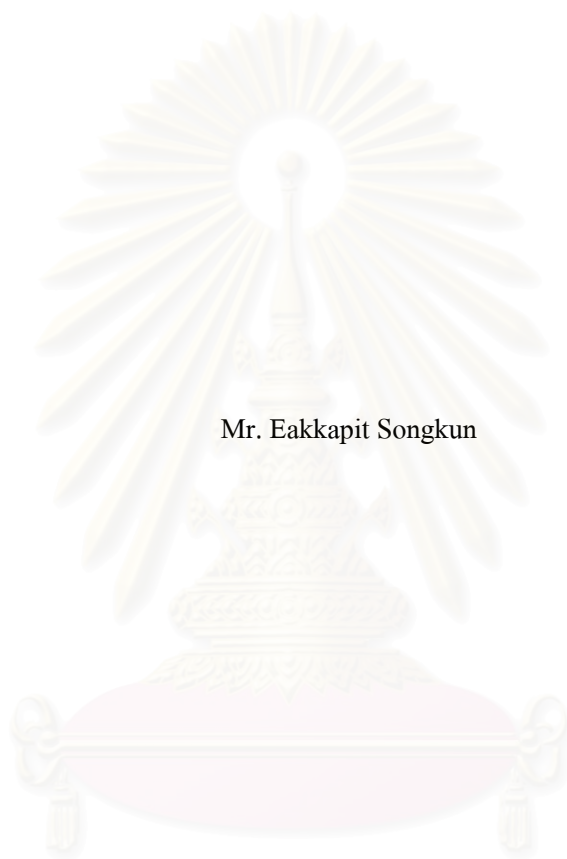
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-173721-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MASS TRANSFER OF COBALT IONS IN A HOLLOW-FIBER-SUPPORTED
LIQUID MEMBRANE



Mr. Eakkapit Songkun

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-3721-1


หัวข้อวิทยานิพนธ์	การถ่ายเทมวลของ โคลบอลด์ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
โดย	นายเอกพิชญ์ ทรงคุณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ

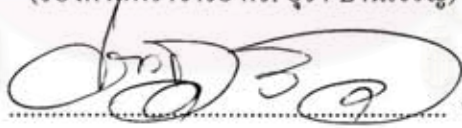
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สราวุธ ริมคุต)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

เอกพิชญ์ ทรงคุณ : การถ่ายเทมวลของโคบอลต์ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใย
 กลวง. (MASS TRANSFER OF COBALT IONS IN A HOLLOW-FIBER-SUPPORTED
 LIQUID MEMBRANE) อ.ที่ปรึกษา: รศ. ดร. อุรา ปานเจริญ, 108 หน้า. ISBN 974-17-3721-1

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนโคบอลต์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วย
 เส้นใยกลวงที่อิมมัวไปด้วย ได-(2-เอทิลเฮกซิล) ฟอสฟอริก แอซิด (D2EHPA) ที่ละลายอยู่ในเคโร
 ซีน โดยอัตราการถ่ายเทมวลถูกแสดงในรูปของค่าการซึมผ่าน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการ
 ถ่ายเทมวลที่ถูกเสนอขึ้นอธิบายกลไกในการถ่ายเทมวลว่าประกอบไปด้วยการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบาง
 ของสารละลายป้อน ชั้นฟิล์มบางของเยื่อแผ่นเหลว และชั้นฟิล์มบางของสารละลายสตริปค่าการซึม
 ผ่านถูกวัดโดยจะขึ้นกับตัวแปรคือ ความเร็วเฉลี่ยของสารละลายป้อน(100-500 มิลลิลิตรต่อนาที)
 ความเข้มข้นของสารสกัด(0.1-20 % โดยปริมาตร) ความเร็วเฉลี่ยของสารละลายป้อน (100-1,000
 มิลลิลิตรต่อนาที) และความเข้มข้นของสารละลายป้อน (100-1,000 ppm) โดยใช้สารละลายกรด
 ไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริปและกำหนดให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของ
 สารละลายป้อนเป็น 5 ค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทาง
 คณิตศาสตร์โดยสรุปได้ว่าขั้นตอนที่เป็นตัวกำหนดอัตราการถ่ายเทมวลของไอออนโคบอลต์คือ
 ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายของน้ำของทั้งสารละลายป้อนและสารละลายสตริป
 โดยที่ไม่เกิดความต้านทานของชั้นฟิล์มบางของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว จากการศึกษาพบว่า
 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายค่าการซึมผ่านไอออนโคบอลต์ได้เป็นอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือนิสิต.....เอกพิชญ์ ทรงคุณ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2548.....

4670615121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: COBALT / PERMEABILITY / HOLLOW FIBER / LIQUID MEMBRANE

EAKKAPIT SONGKUN : (MASS TRANSFER OF COBALT IONS IN A HOLLOW-FIBER-SUPPORTED LIQUID MEMBRANE). THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc., 108 pp. ISBN 974-17-3721-1.

The transport of Co(II) through hollow-fiber-supported liquid membrane containing di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid (D2EHPA) diluted in kerosene has been examined. The mass transfer rate, expressed as permeability P , focused on diffusion through the aqueous layer in the feed solution, organic layer and the aqueous layer in the stripping solution. Experiments were performed as a function of aqueous feed solution velocity (100-500 ml/min), carrier concentration (0.1-20 %v/v), aqueous stripping solution velocity (100-1,000 ml/min) and feed concentration (100-1,000 ppm) with 0.1 M HCl in the product phase and pH of the feed solution was 5. The measured permeabilities were compared to generally accepted mass transfer correlations. The validity of the prediction was evaluated with experimental data and found to tie in well with the theoretical values. The model is reported describing that the rate limiting step in the transport of the ion was the diffusion through both aqueous films, feed and stripping, whereas the organic resistance of the membrane was negligible. From this study, the model has good potentials for the prediction of permeability of Co(II).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ในที่สุดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็สำเร็จลุล่วงไปได้ ซึ่งความสำเร็จดังกล่าวจะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าหากไม่ได้รับความอนุเคราะห์จากผู้มีพระคุณของข้าพเจ้าทุกท่าน ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณอย่างมากจึงขอกล่าวขอบพระคุณมาใน ณ ที่นี้ ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ช่วยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ต่าง ๆ มากมาย ตลอดจนช่วยอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษาในที่สุด ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ที่ได้ช่วยให้แนวทางในการแก้ปัญหาหลาย ๆ อย่างที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ขอขอบคุณบุคคลสำคัญที่ขาดเสียมิได้สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ริมคูสิต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เรื่องเครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณ คุณวีรวัฒน์ ปัตทวิคองคา คุณประกร รามกุล และพี่ ๆ น้อง ๆ จากห้องวิจัย Mass Separation ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา ขอขอบคุณ นางสาวชลิดา ปราบไกรสิทธิ์ และนางสาวปิยรัตน์ ทรงคุณ พี่สาวที่ทำหน้าที่เป็นผู้สนับสนุนหลักอย่างเป็นทางการของข้าพเจ้าด้วยดีมาตลอด สุดท้ายนี้จากความสำเร็จของข้าพเจ้าที่เกิดขึ้นในทุกวันนี้จะเกิดมิได้ถ้าหากขาดความอนุเคราะห์จากบุคคลสองท่านนี้ ขอขอบคุณบิดามารดาของข้าพเจ้าที่ได้ให้ชีวิต และช่วยทำให้มีชีวิตที่ประสบความสำเร็จเช่นทุกวันนี้ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
สัญลักษณ์	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	5
1.3 วัตถุประสงค์	10
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	11
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
บทที่ 2 ทฤษฎี	12
2.1 เยื่อแผ่นเหลว	12
2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process)	13
2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)	15
2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat Sheet Supported Liquid Membrane; HFSLM)	15
2.1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วน (Spiral-type Supported Liquid Membrane)	16
2.1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane; HFSLM)	17

2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Pseudo - Liquid Membrane)	20
2.2 กลไกการถ่ายเทมวล	23
2.2.1 การถ่ายเทแบบสวนทาง (Counter-Transport)	23
2.2.2 การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (Co -Transport)	24
2.3 ชนิดของสารสกัด	26
2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)	26
2.3.2 สารสกัดชนิดด่าง (Basic Extractant)	27
2.3.3 สารสกัดชนิดขอลเวท (Solvating Extractant)	28
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออน	29
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	34
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	34
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	35
3.3 วิธีการทดลอง	37
3.3.1 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์	37
3.3.2 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายสตรีปที่มีต่อการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์	38
3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPAที่มีต่อการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์	38
3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	42
4.1 ผลที่ได้จากการทดลอง	43
4.1.1 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน	43
4.1.2 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตรีป	44

	หน้า
4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA	46
4.1.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อน	48
4.2 ผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	50
4.2.1 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน	50
4.2.2 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตรีป	52
4.2.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA	54
4.2.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อน	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองวิจารณ์ และข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	63
5.2.1 งานวิจัยของ Marchese และ Camderros	63
5.2.2 งานวิจัยของ Voorde และคณะ	65
5.2.3 งานวิจัย Bansal และคณะ	66
5.2.4 งานวิจัยของ Youn และคณะ	68
5.2.5 งานวิจัยของ Bukhari และคณะ	70
5.3 ข้อเสนอแนะ	71
รายการอ้างอิง	73
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก (ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ)	78
ภาคผนวก ข (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา)	87
ภาคผนวก ค (สมการการคำนวณการซึมผ่านที่ได้จากการทดลอง)	91
ภาคผนวก ง (ตัวอย่างการคำนวณ)	93
ภาคผนวก จ (ค่าคงที่สมดุล)	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ	22
3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	34
3.2 คุณสมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลางที่ใช้ในการทดลอง	36
4.1 ค่าการซึมผ่านของไอออน โคลบอลด์เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลาย ป้อน	51
4.2 ค่าการซึมผ่านของไอออน โคลบอลด์เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลาย สตรีป	53
4.3 ค่าการซึมผ่านของไอออน โคลบอลด์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที	55
4.4 ค่าการซึมผ่านของไอออน โคลบอลด์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออน โคลบอลด์ใน สารละลายป้อนที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที	58
5.1 การเปรียบเทียบค่าความหนาของเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากงานวิจัยต่างๆ	61
5.2 การเปรียบเทียบความหนาของชั้นฟิล์มต่าง ๆ ที่ได้จากงานวิจัยนี้	62
ก.1 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับ	79
ก.2 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายสตรีปต่อการสกัดและการนำกลับ ...	79
ก.3 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดและการนำกลับ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที	80
ก.4 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดและการนำกลับ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 300 มิลลิลิตรต่อนาที	80
ก.5 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดและการนำกลับ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 500 มิลลิลิตรต่อนาที	81
ก.6 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที	81
ก.7 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 300 มิลลิลิตรต่อนาที	82

ตารางที่	หน้า
ก.8 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 500 มิลลิลิตรต่อนาที	82
ก.9 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการซึมผ่าน	83
ก.10 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการไหลของสารละลายสตรีปต่อการซึมผ่าน	83
ก.11 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการซึมผ่าน	84
ก.12 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อการซึมผ่าน	84
ก.13 ข้อมูลความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อน	85
ก.14 ข้อมูลความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสตรีป	85
ก.15 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ความเข้มข้นของสาร สกัด D2EHPA ต่างๆ	86
ก.16 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นของสารละลาย ป้อนต่างๆ	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ (Shultz,1988)	13
2.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน	14
2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Komasawa et al., 1983)	16
2.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Teramoto et al., 1987)	17
2.5 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Izatt, 1989)	18
2.6 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารป้อนและสารละลายสตรีปเมื่อ พิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วย เส้นใยกลวง	19
2.7 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์	20
2.8 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัส	24
2.9 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัส	25
3.1 สูตรโครงสร้างของสารสกัด Di-2-ethylhexyl phosphoric acid	35
3.2 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel [®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง	35
3.3 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel [®] Contactor ที่ใช้ในการทดลอง	36
3.4 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (one through mode)	40
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนกับการซึมผ่าน ของไอออนโคบอลต์	44
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตรีปกับการซึมผ่าน ของไอออนโคบอลต์	45
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กับการซึมผ่านของ ไอออนโคบอลต์	46
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนกับการ ซึมผ่านของไอออนโคบอลต์	48

รูปที่	หน้า
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนกับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	50
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตรีปกับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	52
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	54
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนกับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	57
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของแคดเมียมไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัดD2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน	63
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัดD2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน	64
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของแคดเมียมไอออนกับความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสตรีป	64
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนที่กับอัตราการไหลของสารละลายสตรีป	65
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของนิกเกิลไอออนกับค่าสัดส่วนของความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I และ Cyanex 302	66
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของลิเทียมไอออนกับความเข้มข้นของลิเทียมไอออนในสารละลายป้อน	67
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนที่กับความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน	68
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด HEH(EHP)	68

รูปที่	หน้า
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน	69
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด triethanolamine	70
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน	71
จ.1 คงที่สมดุลของการสกัดโคบอลต์ด้วย D2EHPA.....	107

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A_m	พื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลเฉลี่ย
C_{HX}^o	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด
$[Co]$	ความเข้มข้นขาออกของไอออนโคบอลต์
D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกลวง
Gz	เกรตซ์นัมเบอร์ ($d^2 < v > / LD_{aq}$)
$[H^+]$	ความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน
K_{eq}	ค่าคงที่สมดุล
k	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
k_B	ค่าคงที่ของ Boltzmann
L	ความยาวของเส้นใยกลวง
l_{ef}	ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเชิงประสิทธิผล
N_{Co}	ฟลักซ์ของไอออนโคบอลต์ที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว
P	ค่าการซึมผ่าน (Permeability)
Q	อัตราการไหลของสารละลาย
R	ความต้านทานการถ่ายเทมวลในวัฏภาค
r	รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์ ($d < v > / \nu$)
r_f	รัศมีของภายในของเส้นใยกลวง
Sc	ชมิตต์นัมเบอร์ (ν / D_{aq})
Sh	เชอร์วูดนัมเบอร์ ($k_s d / D_{aq}$)
T	อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
$< v >$	ความเร็วเชิงเส้นของสารละลาย

อักษรกรีก

ε	ความพรุนของเส้นใยกลวง
η	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
τ	ความคดเคี้ยวของเส้นใยกลวง
π	ค่าคงที่ 3.1416

ตัวห้อย

aq	สารละลายของน้ำ
f	สารละลายปั่น
org	สารละลายเยื่อแผ่นเหลว
s	สารละลายสตรีป
1	ภายในเส้นใยกลวง
2	ภายนอกเส้นใยกลวง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

นับวันเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น จากภาวะความเป็นอยู่ที่เรียบง่ายกลับซับซ้อนจนทุกวันนี้ความต้องการเทคโนโลยีขั้นสูงได้ขยายตัวมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากอุปกรณ์อำนวยความสะดวกที่ใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อนมากมายในชีวิตประจำวัน เพื่อตอบสนองความต้องการที่ไม่มีที่สิ้นสุดของมนุษย์จึงมีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีใหม่อย่างไม่หยุดยั้ง โลหะวัสดุที่เป็นที่รู้จักกันดีจำพวก เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง ดีบุก เป็นทรัพยากรที่ถูกนำมาใช้เป็นเวลาช้านาน โดยการเปิดเหมืองแร่จากเปลือกโลก สิ้นแร่เหล่านี้ถูกนำมาใช้อย่างฟุ่มเฟือยโดยไม่คำนึงถึงความคุ้มค่าและประโยชน์สูงสุดที่จะได้รับอีกทั้งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะเปลี่ยนไป จึงทำให้สิ้นแร่โลหะเริ่มลดน้อยลงไปก่อปรกกับการออกกฎหมายที่เข้มงวดมากขึ้น การวิจัยและพัฒนาโลหะวัสดุตลอดจนกระบวนการผลิตจึงได้เข้ามามีบทบาทในการพัฒนาประเทศ เพื่อแสวงหาวัสดุและกรรมวิธีการผลิตที่มีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดผลคุ้มค่าและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

ในกระบวนการผลิตโลหะโดยใช้สารเคมี (hydrometallurgical process) หลังจากกระบวนการชะละลาย (leaching) สิ้นแร่แล้ว มักจะนำสารละลายที่ได้ไปผ่านกระบวนการแยกเพื่อดึงส่วนประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายผสม กระบวนการหนึ่งที่เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย คือการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นกระบวนการที่มีทฤษฎีพื้นฐานรองรับเป็นเวลานานแล้ว การถ่ายเทไอออนโลหะในกระบวนการนี้ขึ้นกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและผันกลับได้ การปรับปรุงกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยเน้นไปที่การผลิตสารสกัดชนิดใหม่ๆ ทำให้กระบวนการนี้ได้รับความสนใจมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังมีข้อจำกัดอีกหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพของการสกัดถูกจำกัดโดยค่าสัดส่วนระหว่างสารละลายป้อนกับตัวทำละลาย (feed to strip ratio) และค่าสัดส่วนการกระจายของตัวถูกละลายระหว่างวัฏภาคต่างๆ (distribution ratio) นอกจากนี้กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบพื้นฐานยังต้องใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก (อิศรา เกษมเศรษฐ, 2541; นิ ลิต สุไลมาน, 2544)

แนวทางเลือกที่น่าสนใจในการสกัดด้วยตัวทำละลาย คือกระบวนการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลว โดยเป็นกระบวนการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวเป็นกระบวนการสกัดสมัยใหม่ที่ได้รับการพัฒนามาจากการสกัดแบบเดิม เป็นกระบวนการที่มีการลงทุนต่ำ กระบวนการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวเป็นกระบวนการที่รวมทั้งกระบวนการสกัด (Extraction Process) และกระบวนการนำกลับ (Stripping Process) รวมไว้ในขั้นตอนเดียว โดยสามารถแบ่งกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวตามโครงสร้างได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1. เยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membranes) และ 2. เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membranes) และ 3. เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic pseudo – Liquid Membranes) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ เนื่องจากในส่วนของเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชันถึงแม้จะมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลสูง แต่ก็มีข้อเสียที่เกิดจากการต้องทำให้อิมัลชันมีความเสถียร จึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวทำให้กลไกการถ่ายเทมวลมีความซับซ้อนมากขึ้นทำให้อัตราการถ่ายเทมวลต่อพื้นที่สัมผัสมีค่าต่ำ และต้องแตกอิมัลชันออกเมื่อวัฏภาคภายในมีความเข้มข้นมากทำให้กระบวนการไม่ต่อเนื่องสำหรับเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีมากมาย เช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ไม่มีปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ยังมีข้อจำกัดหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทต่อปริมาตรไม่สูง วัฏภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำและใช้ได้กับกระบวนการที่เป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นต้น ในส่วนของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีข้อเสีย คือ มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำและเกิดการสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว แต่มีข้อดีมากมาย เช่น มีค่าการคัดเลือกสูง ไม่ต้องใส่สารลดแรงตึงผิว ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ ใช้พลังงานต่ำ อัตราการถ่ายเทมวลสูง เป็นต้น ในงานวิจัยได้เลือกใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ข้อดีของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้คือ เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพสูง หลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายเทมวลในการสกัด และมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นเหลวที่พองบนตัวรองรับชนิดอื่นที่มีขนาดเดียวกัน ซึ่งเป็นจุดเด่นของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้นั่นเอง

ประโยชน์ของโคบอลต์

แร่โคบอลต์เป็นแร่ที่พบน้อย ส่วนมากจะอยู่ร่วมกับทองแดงและนิกเกิล ที่สำคัญได้แก่ แร่ Cobalt bloom ($3 \text{ CoO} \cdot \text{As}_2\text{O}_3$) แร่ Cobaltite (CoAsS) และแร่ Smaltite (CoAs_2) โลหะโคบอลต์ที่ผลิตส่วนใหญ่จะเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่ นิกเกิลและทองแดง โคบอลต์ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าความเร็วสูง (High speed steel) ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งและทนความ

ร้อนได้สูงใช้ทำเครื่องมือตัดโลหะ นอกจากนี้โคบอลต์ยังมีบทบาทในการปรับปรุงคุณภาพเหล็กกล้าชนิดอื่นๆ อีกเช่น เหล็กกล้าพิเศษที่เรียกว่า Maraging ผสมโคบอลต์ประมาณ 8-9 % เป็นเหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติทั้งแข็งแรงได้ดีและมีความเหนียวสูง ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโลหะผสมโคบอลต์สำหรับใช้งานกรณีพิเศษเช่น ทำโลหะทนความร้อน (Refractory metal) ทำโลหะแม่เหล็กถาวรและโลหะทนการกัดกร่อนพิเศษ (มนัส สติรจินดา, 2541)

โลหะผสมโคบอลต์ที่นำมาใช้ในงานวิศวกรรมจะแบ่งลักษณะการใช้ที่สำคัญออกไปเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. คุณสมบัติทางด้านแม่เหล็กถาวร โลหะผสมโคบอลต์ที่สำคัญ ได้แก่ AlNiCo ประกอบด้วยโคบอลต์ 5-35 % ,นิกเกิล 12-25 % และอลูมิเนียม 5-11 % เป็นโลหะผสมที่ไม่สามารถขึ้นรูปและตัดได้ง่ายเพราะมีความแข็งสูง จะใช้การฟอร์จรูปทรงโดยการหล่อในลักษณะพรีซิชั่นให้ได้รูปร่างที่แน่นอน อีกชนิดหนึ่งคือ CuNiCo ซึ่งประกอบด้วยโคบอลต์-นิกเกิลและทองแดง (จากเอกสารอ้างอิงไม่ระบุส่วนผสม) เป็นโลหะผสมที่สามารถขึ้นรูปและตัดแต่งได้ง่ายกว่าประเภทแรก

2. โลหะผสมให้คุณสมบัติด้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิสูง ใช้สำหรับทำเครื่องมือตัดโลหะ ที่สำคัญจะอยู่ในกลุ่มที่เรียกว่า Stellite เป็นโลหะที่ประกอบด้วยโคบอลต์ 40-65 % โครเมียม 25-35 % คาร์บอนไม่เกิน 1 % นอกจากนี้ยังผสมทั้งสแตนเลสและโมลิบดีนัมระหว่าง 10-20 % เป็นโลหะผสมที่คงความแข็งไว้ได้ดีจนถึงอุณหภูมิประมาณ 1000 °C และเป็นโลหะที่มีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว นอกจากจะใช้ทำเครื่องมือตัดโลหะแล้ว Stellite ยังใช้งานบางอย่างที่ต้องการความแข็งที่อุณหภูมิสูง เช่น แม่พิมพ์งานร้อน ลิ้นไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล ละใบมีดตัด (Shear blade) กล้าวโดยสรุปแล้วโลหะผสม stellite มีคุณสมบัติเด่นอยู่สามประการคือ คุณสมบัติทนความร้อน (Refractory) คุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อน (Corosion Resistance) คุณสมบัติด้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance)

ในกรณีที่ใช้โคบอลต์เป็นโลหะทำเครื่องมือตัดโลหะ นอกจากใช้ในลักษณะโลหะผสมแล้ว โคบอลต์ยังมีบทบาทเป็นตัวประสานที่สำคัญในการทำวัสดุแข็งจากโลหะผงเช่น พวกคาร์ไบด์ (Carbide cutting tool) โดยยังใช้ผงทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ผสมกับผลโลหะโคบอลต์ประมาณ 6 % อัดด้วยความดันสูงให้เกิดรูปร่างตามต้องการแล้วนำไปอบความร้อน (Sintering) ที่อุณหภูมิประมาณ 1500 °C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน จะได้วัสดุทำเครื่องตัดที่มีความแข็งแรงและทนความร้อนสูงเช่นเดียวกับ Stellite แต่จะมีความเหนียวน้อยกว่าจะใช้ได้ดีโดยเฉพาะกรณีที่มีการตัดโลหะไม่มีการกระแทกที่รุนแรง ส่วนใหญ่จะใช้วิธีเชื่อมติดกับตัวด้ามของมีดตัด (inserting)

3. โลหะผสมโคบอลต์ที่จัดอยู่ในประเภท Superalloy โดยมีเหล็กผสมน้อยมาก แต่จะผสมโลหะที่จะรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์หรือรวมตัวกันให้สารประกอบเชิงโลหะ ได้แก่ โลหะ

โมลิบดีนัม, ทังสเตน, ไนโอเบียม และไทเทเนียม เป็นต้น โลหะผสมกลุ่ม Superalloy จะที่คุณสมบัติพิเศษคือ มีความแข็งแรงและความแข็งสูง แม้จะถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย (Non forgeable) ต้องใช้กรรมวิธีการหล่อแบบพรีซีชัน โลหะผสม Superalloy ส่วนใหญ่จะใช้ทำใบพัดเทอร์ไบน์ก๊าซที่ใช้ในเครื่องบินไอพ่น และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซเทอร์ไบน์

4. โลหะผสมโคบอลต์ใช้งานกรณีพิเศษมีหลายชั้นคุณภาพขึ้นอยู่กับการใช้งานดังตัวอย่าง เช่น โลหะผสมโคบอลต์ที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำมากได้แก่ Stainless Invar ประกอบด้วยโคบอลต์ 54 % เหล็ก 36 % และโครเมียม 10 %

Elgiloy หรือ Cobenium เป็น โลหะผสมโคบอลต์ประกอบด้วย โคบอลต์ 40% โครเมียม 20 % และนิกเกิล 15 % โมลิบดีนัม 7 % และแมงกานีส 2 % เป็นโลหะที่ไม่มีปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อของมนุษย์ ใช้สำหรับทำหมุดสำหรับตามกระดูกที่หักได้ผลดีทางการแพทย์ (ปัจจุบันใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเนื่องจากราคาถูกกว่า)

ยังมีโลหะผสมโคบอลต์อีกหลายชนิดที่อยู่ในกลุ่มนี้ โดยที่มีส่วนผสมแตกต่างออกไป และมีชื่อทางการค้าหลายชื่อดังเช่น UMCo 50 , Vitallium และ Co -Elinvar เป็นต้น (มนัส สติรจินดา, 2541)

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดโคบอลต์

Youn, Lee และ Lee (1995) ได้ศึกษาการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบแผ่นบาง โดยใช้ HEH(EHP) เป็นสารสกัด จะมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาถึงความต้านทานของการถ่ายเทมวล เพื่อที่จะอธิบายถึงค่าการซึมผ่านของโคบอลต์สำหรับระบบซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายป้อน แบบจำลองจะมีความเกี่ยวข้องกับสถานะของสารละลายสตรีป จะมีการเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองซึ่งพบที่มีความสอดคล้องกัน ผลการทดลองพบว่าค่าการซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโคบอลต์ในสารละลายป้อน หรือลดความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายป้อน ความต้านทานการถ่ายเทมวลที่เป็นตัวกำหนดค่าการซึมผ่านคือความต้านทานการถ่ายเทมวลของชั้นฟิล์มบาง ๆ ของสารละลายป้อนตรงผิวรอยต่อระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อนจะเพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเชิงซ้อนจะลดลงเนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวจะมีความหนืดมากขึ้น ค่าการซึมผ่านจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต

Thamphitphit (1996) ทำการศึกษาความเป็นได้ของสารสกัดและการนำกลับโคบอลต์จากสารละลายของน้ำโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อระบบการสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนในช่วง 5,000 ถึง 10,000 ส่วนในล้านส่วน ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสารละลายป้อนในช่วงความเป็นกรดชนิดของสารละลายสตรีปซึ่งใช้สารละลายกรดออกซาลิกและกรดเกลือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรในช่วง 100 ถึง 1,000 มิลลิลิตรต่ออนาที สารละลายเยื่อแผ่นเหลว ประกอบด้วย D2EHPA เป็นสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์สองชนิด คือ โทลูอินและนอร์มอลโคเคเคน ความเข้มข้นร้อยละ 10 ถึง 25 โดยปริมาตร ผลการทดลองพบว่าสารละลายกรดออกซาลิกไม่สามารถใช้เป็นสารละลายสตรีปได้ในระบบนี้ อย่างไรก็ตาม ใช้กรดเกลือเป็นสารละลายสตรีปไอออนของโคบอลต์มากกว่าร้อยละ 50 ถูกสกัดและดึงกลับหลังจากการหมุนเวียนรอบที่สามของการดำเนินการลักษณะการไหลฝ่ายครั้งเดียว ในการเปรียบเทียบกับการทดลองแบบกะ โดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งการสกัดและการดึงกลับเกิดขึ้นแยกกัน แฟกเตอร์การสกัด (Extraction factor) และแฟกเตอร์การดึงกลับ (Recovery Factor) เพิ่มมากกว่าสี่เท่า

Leon และ Guzman (2004) ได้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการถ่ายเทมวลของ ไอออนโคบอลต์ Co(II) โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดบัลค์ ใช้ได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริกแอซิด (Di(2-ethylhexyl)phosphoric acid, D2EHPA) เป็นสารสกัดละลายในเคโรซีนและใช้สารละลาย กรดซัลฟูริกเป็นสารละลายสตริป ได้มีการศึกษาจลศาสตร์ของกลไกในการถ่ายเทมวลของ ไอออนโคบอลต์ โดยทำการศึกษาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการสกัดและกระบวนการ นำกลับของไอออนโคบอลต์ จากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ลดลง ของไอออนโคบอลต์กับเวลาในสารละลายป้อน เยื่อแผ่นเหลว และสารละลายสตริปสอดคล้องกับ ผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลอง นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ สารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว และความเข้มข้นของสารละลายสตริปทำให้การนำกลับของไอออน โคบอลต์เพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองในช่วงที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของ D2EHPA 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

Alguacil และ Alonso (2004) ศึกษาการแยกไอออนสังกะสี Zn(II) ออกจากสารละลาย โคบอลต์ซัลเฟต โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่มี DP-8R เป็นสารสกัด โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยก คือ ความเร็วในการปั่นกววนของวัฏภาคของสารละลายป้อน ความเร็วในการปั่นกววนและความเข้มข้น ของวัฏภาคของสารละลายสตริป ชนิดของตัวทำละลาย ความเข้มข้นของไอออนโลหะ ความเป็น กรด-ด่างของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด และช่วงอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว สภาวะที่เหมาะสมในช่วงที่ทำการทดลองคือ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน 3.0 อัตราส่วน ของความเข้มข้นเชิงโมลของไอออนโคบอลต์ต่อสังกะสีประมาณ 22 ความเข้มข้นของสารละลาย สตริป (สารละลายกรดซัลฟูริก) 0.5 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของ DP-8R 10 เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตรใน Exxsol D100

Marchese และ Camderros (2004) ทำการศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนแคดเมียมผ่าน เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้ D2EHPA เป็นสารสกัดซึ่งละลายอยู่ในเคโรซีน งาน วิจัยนี้ศึกษาถึงการซึมผ่าน ซึ่งถูกวัดโดยฟังก์ชันของความเร็วของสารละลายเฉลี่ยและความเข้มข้น ของสารสกัด มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะอธิบายกลไกในการถ่ายเทมวลซึ่ง ประกอบด้วยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายสตริป ค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทำนาย จากแบบจำลองสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งบ่งชี้ว่าขั้นตอนที่เป็นตัวกำหนดอัตราการ ซึมผ่านของไอออนแคดเมียมคือ ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายทั้งในสารละลายป้อน และสารละลายสตริป โดยไม่คิดความต้านของเยื่อแผ่นเหลว

Bukari, Chaudry และ Mazhar (2004) ทำการศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนโคบอลต์ผ่านเยื่อแผ่นเหลว ที่พุงด้วยชั้นฟิล์มบางที่มีรูพรุนขนาดไมโครเมตรซึ่งไม่ชอบน้ำทำจากโพลีโพรไพลีน โดยมีปัจจัยที่จะศึกษาคือ ความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของ TEA ในเยื่อแผ่นเหลว ผลการทดลองพบว่า ผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์เพิ่มขึ้นฟลักซ์ก็เพิ่มตามด้วย เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน (H^+) โดยการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (0.1-1 โมลต่อลิตร) แต่ฟลักซ์จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเกิน 1 โมลต่อลิตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TEA ในเยื่อแผ่นเหลวจะทำให้ฟลักซ์ของไอออนโคบอลต์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของ TEA มากกว่า 3.75 โมลต่อลิตร ฟลักซ์จะลดลงเนื่องจากความหนืดของเยื่อแผ่นเหลวเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้คือ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.1 โมลต่อลิตร TEA 3.75 โมลต่อลิตร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดสารละลายผสมของโลหะ

Liacono et al. (1986) ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงออกจากสารละลายผสมของไอออนทองแดงและสังกะสี ด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับที่มีรูปแบบแตกต่างกัน (แผ่นแบนและทรงกระบอกหรือเส้นใยกลวง) สารละลายป้อนที่ใช้คือ สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulphate) และซิงค์ซัลเฟต (Zinc Sulphate) เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ประกอบด้วยสารสกัด Lix 64N ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน ส่วนสารละลายสกัดเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก นอกจากนี้ได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสำหรับการซึมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากการทดลองพบว่าผลการทดลองที่ได้กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกรณีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีความสอดคล้องกันมาก และยังสรุปได้ว่าการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแสดงถึงความสำเร็จในการนำกลับโลหะมาใช้ใหม่ แม้กระทั่งเมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นสูง

Campderros, Acosta และ Marchese (1998) ศึกษาการถ่ายเทมวลและการแยกไอออนโลหะทองแดง Cu(II) นิกเกิล Ni(II) และสังกะสี Zn(II) ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งบรรจุด้วยสารสกัด Lix 864 ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน ศึกษาผลการอัตราการไหลของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว และความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านของไอออนทองแดง จากการศึกษพบว่าสามารถนำกลับไอออนทองแดงได้มากที่สุดเมื่อใช้สารสกัด Lix 864 ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเมื่อสารละลายป้อนมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 2 จะมีค่าการซึมผ่านของไอออนทองแดงลดลง แต่เมื่อเพิ่ม

ค่าความเป็นกรด-ด่างทำให้สกัดโคบอลต์ นิกเกิล และสังกะสีได้มากขึ้น โดยช่วงความเป็นกรด-ด่างที่ให้ค่าการสกัดสูงสุดสำหรับโคบอลต์คือ 3.5-6 สำหรับนิกเกิลคือ 5-6 และสำหรับสังกะสีคือมีความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 4.5 แต่ก็เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น ไอออนโลหะจะเกิดการตกตะกอนและขวางกั้นการสกัดได้ ความสามารถในการสกัดสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ ทองแดง > โคบอลต์ > นิกเกิล > สังกะสี

Breembroek, Straalen, Witkamp และ Rosmalen (1998) ได้ศึกษาการสกัด ไอออนของโลหะทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยสารสกัดที่ใช้สำหรับทองแดงใช้ Lix 84-I สำหรับแคดเมียมและตะกั่วจะใช้ Alamine 804-I งานวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาการถ่ายเทมวลในรูปของค่าการซึมผ่าน ซึ่งค่าการซึมผ่านจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลาย ค่าการซึมผ่านที่วัดได้มีค่า 6.9×10^{-6} เมตรต่อวินาที วัดที่อัตราการไหล 0.076 เมตรต่อวินาที ผ่านเส้นใยกลวง ค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองจะถูกเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับกรณีการไหลของสารละลายป้อนไหลในทางด้านท่อ ค่าการซึมผ่านที่ได้จากการคำนวณจะมีค่ามากกว่าค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองเป็นสามเท่า ในขณะที่กรณีสารละลายป้อนไหลในทางด้านเปลือก ค่าการซึมผ่านที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าน้อยกว่าค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองเป็นแปดเท่า อัตราการสกัดของแคดเมียมจากสารละลายคลอไรด์จะถูกจำกัดด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ของ Alamine 804-I ค่าการซึมผ่านที่วัดได้มีค่า 4.0×10^{-6} เมตรต่อวินาที อัตราการสกัดจะสูงขึ้นเมื่อแคดเมียมถูกสกัดมาจากสารละลายผสมของแคดเมียมคลอไรด์ที่มีกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟูริกผสมอยู่ อัตราการสกัดของตะกั่วจะมีค่าน้อยกว่าเป็นยี่สิบเท่าของแคดเมียมเนื่องมาจากสารสกัดมีค่าอффินิตีต่ำสำหรับตะกั่ว

Rovira และ Sastre (1998) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการซึมผ่านของพอลลาเคียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบแผ่นบาง โดยใช้สารสกัดที่เป็น D2EHPA ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายเคโรซีน มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะอธิบายจลศาสตร์ของการถ่ายเทมวล ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายป้อน ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว และการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นเร็วมาก ผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถอธิบายถึงอัตราการถ่ายเทมวล ค่าการซึมผ่านของ Pd(II) ต่อ Fe(II) Pt(IV) Rh(III) และ Zn(II) จะมีค่าสูง มีการศึกษาอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว

Alguacil, Coedo และ Dorado (2001) ศึกษาการซึมผ่านของทองผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบแผ่นบาง โดยใช้สารสกัดที่เป็น Cyanex 923 ที่ละลายอยู่ในนอร์มอลโอดิเคเคน มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะอธิบายจลศาสตร์ของการถ่ายเทมวล ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายป้อน ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเร็วมากที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว และการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถอธิบายถึงอัตราการถ่ายเทมวล ค่าการซึมผ่านของ Au(III) ต่อโลหะกลุ่มพลาตินัมจะมีค่าสูง

ขวัญตา นัคราเรือง (2003) งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกไอออนทองแดงและโครเมียมจากสารละลายโลหะผสม (ทองแดง โครเมียม และสังกะสี) โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 คอลัมน์ ซึ่งโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์แรกบรรจุด้วยสารสกัด LIX 84-I สำหรับการสกัดไอออนทองแดง ส่วนโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองบรรจุด้วยสารสกัดอะลิควอดสำหรับการสกัดไอออนโครเมียม ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายสตริป และจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง จากผลการทดลองพบว่า ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในสารละลายป้อนคือ 2.5 และเมื่อปฏิบัติการให้ผ่านโมดูลเส้นใยกลวง 1 รอบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม จะให้ค่าร้อยละการสกัดไอออนทองแดงและโครเมียมเป็น 72.83 และ 88.04 ตามลำดับ ส่วนค่าร้อยละการนำกลับมีค่า 46.74 และ 75 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงเป็น 3 รอบ จะทำให้ได้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับที่สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการทำปฏิริยา ซึ่งได้ค่าร้อยละการสกัดไอออนทองแดงและโครเมียมเป็น 77.17 และ 100 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการนำกลับมีค่า 50 และ 79.35 ตามลำดับ

วีรวัฒน์ ปัตทวิคองคา (1998) ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ของกรดอะซิติกกับโซเดียมที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เตรียมจาก D2EHPA ที่มีความเข้มข้นของสารสกัดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในตัวทำละลายเคโรซีนสารละลายป้อนเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสังกะสี 100 ในล้านส่วนและสารละลายสตริปเป็นสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ในกระบวนการโดยไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์จะให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงเมื่อความเข้มข้นเป็น 9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในกรณีที่ใส่สารละลายบัฟเฟอร์เข้าร่วมในกระบวนการเพื่อทำให้ได้ประสิทธิภาพเท่ากันจะใส่สารสกัดเข้มข้นเพียง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สัดส่วนของสารละลายบัฟเฟอร์ต่อสารละลายป้อนที่เหมาะสมเท่ากับ 1:50

และอัตราการไหลสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับลดลง จากการศึกษพบว่า อัตราการไหลที่เหมาะสมของระบบประมาณ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

อิสรา เกษมเศรษฐ์ (1998) ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายที่เจือจางมาก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ชนิดของสารสกัดซึ่งได้แก่ สารสกัด D2EHPA สารสกัด LIX 84-I ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายป้อนช่วง 1 ส่วนในล้านส่วน ถึง 100 ส่วนในล้านส่วน รูปแบบของการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลของเส้นใยกลวง การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคของสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์และการไหลเวียน (Circulation) วัฏภาคสารละลายสตริป สารละลายอินทรีย์ที่ใช้ได้แก่ เคโรซีน โดยสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สารสกัดในกลุ่ม LIX สามารถถ่ายเทไอออนทองแดงได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อน และความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 รูปแบบของการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลของเส้นใยกลวงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระบบการสกัดแยกและการนำกลับ โคบอลต์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ที่ใช้สารสกัด D2EHPA ที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน
2. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการซึมผ่านของโคบอลต์ โดยมีปัจจัยที่จะศึกษาดังนี้
 - 2.1 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน
 - 2.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตริป
 - 2.3 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA
 - 2.4 ความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน
3. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

4. เพื่อเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านของไอออน โคนบอลต์ที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาถึงความต้านทานของการถ่ายเทมวลกับค่าที่ได้จากการทดลอง

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการซึมผ่านของไอออน โคนบอลต์ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัด D2EHPA โดยใช้เคโรซีนเป็นตัวทำละลาย โดยจะศึกษาภายใต้สภาวะต่าง ๆ ดังนี้
 - 1.1 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนในช่วง 100-500 มิลลิลิตรต่อนาที
 - 1.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตรีปในช่วง 100-1,000 มิลลิลิตรต่อนาที
 - 1.3 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีนในช่วง 0.1-20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
 - 1.4 ความเข้มข้นของไอออน โคนบอลต์ในสารละลายป้อนในช่วง 100-1000 ส่วนในล้านส่วน
2. ทำการคำนวณหาค่าการซึมผ่านของไอออน โคนบอลต์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิจารณาถึงความต้านทานของการถ่ายเทมวล คือ ค่าความต้านทานของสารละลายป้อน ความต้านทานของสารละลายสตรีป และค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นเหลว ตามลำดับ
3. เปรียบเทียบค่าการซึมผ่านของไอออน โคนบอลต์ที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาถึงความต้านทานของการถ่ายเทมวลกับค่าที่ได้จากการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

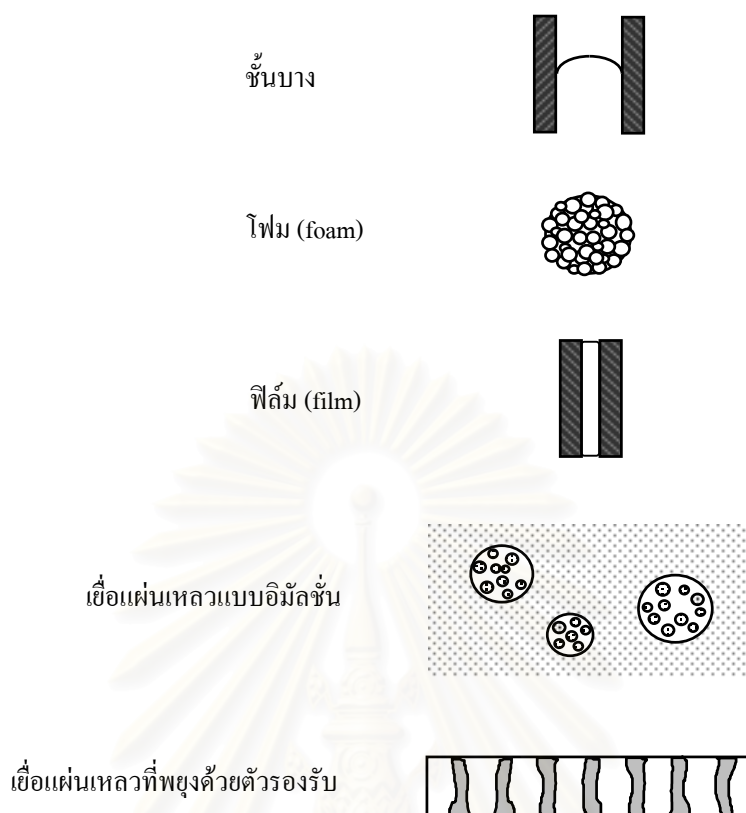
1. ทำให้ทราบถึงลักษณะการทำงานของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและ กลไกในการถ่ายเทมวลของไอออน โคนบอลต์ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
2. สามารถทำนายค่าการซึมผ่านของไอออน โคนบอลต์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาถึงความต้านทานของการถ่ายเทมวล
3. สามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เยื่อแผ่นเหลว

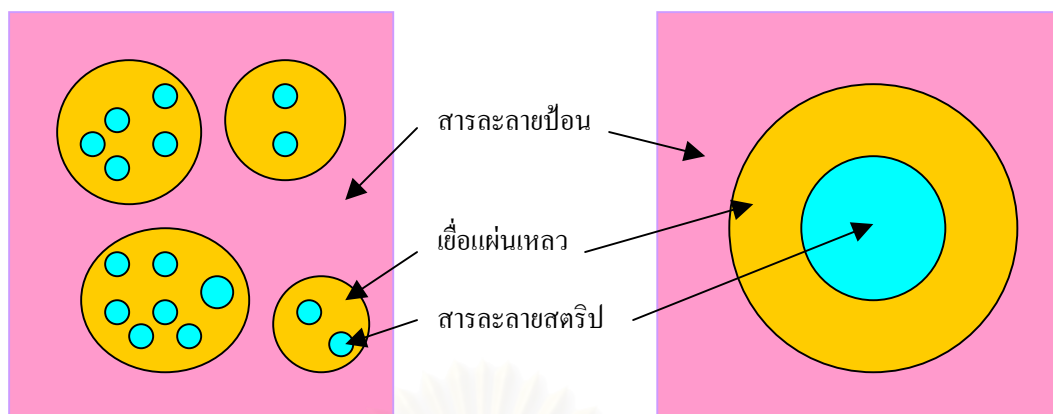
กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Process) นั้นประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1. ส่วนของสารละลายป้อน (Feed Phase) ซึ่งเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกละลายอยู่ซึ่งส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลาย 2. ส่วนเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Phase) ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยสารสกัด (Extractant) ละลายในตัวทำละลายส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายอินทรีย์ (Organic Phase) 3. ส่วนของสารละลายสตริป (Strip Phase) ซึ่งจะทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาจากสารละลายป้อนส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลายเช่นเดียวกับส่วนของสารละลายป้อน แนนอนส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายสตริป ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวในรูปที่ละลายได้ไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริปที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายสตริปและแยกตัวออกมาละลายอยู่ในสารละลายสตริป ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบของสารที่ต้องการจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายสตริปได้ โดยทั่วไปในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวต้องมีการสร้างเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปดังรูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ ทั้งนี้เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่ากรณีอื่น ๆ (Schultz, 1988)



รูปที่ 2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ (Shultz,1988)

2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน คือ การนำเอาระบบเยื่อแผ่นเหลวที่อธิบายในหัวข้อ 2.1 มาจัดเรียงให้อยู่ในรูปแบบหนึ่งซึ่งเราเรียกว่าแบบอิมัลชัน ในแบบนี้สารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์อยู่ภายในซึ่งเป็นลักษณะวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (Dispersion Phase) ดังรูป 2.2 และจะเกิดกระบวนการถ่ายเทองค์ประกอบดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.2 ส่วนสารละลายสตรีปนั้นจะอยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอีกที่ดังรูป 2.2 การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน สามารถเตรียมได้โดยนำสารละลายที่จะทำเป็นสารละลายสตรีปมาผสมกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะต้องไม่ละลายกัน แล้วนำมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงเพื่อให้วัฏภาคสารละลายสตรีปมีขนาดเป็นเม็ดเล็กๆ อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ได้จะมีความเสถียรต่ำจึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียร



รูปที่ 2.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน

เมื่อเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเสร็จแล้วจึงนำเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันใส่ลงในสารละลายป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ทำให้เกิดการการเรียงวัฏภาคใหม่เป็น 3 ชั้น เรียงจากด้านในไปด้านนอก คือ สารละลายสตริป สารละลายเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายป้อนตามลำดับ เรียกว่าอิมัลชันเชิงซ้อน(Double Emulsion) กระบวนการแยกจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการแยกที่อยู่ในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออน สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนี้จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริป ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนที่อยู่ในสารละลายสตริปเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายสตริป และได้สารสกัดกลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยาองค์ประกอบที่ต้องการแยกต่อไป เมื่อเกิดการแยกแล้วองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจะไปอยู่ในสารละลายสตริป แล้วจึงนำไปแยกสารละลายป้อน(ที่ถูกสกัดองค์ประกอบที่ต้องการออกไปแล้ว) ให้ออกจากเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน สุดท้ายจึงนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ผ่านการสกัดแล้วไปแยกวัฏภาคภายในออกได้เป็นสารละลายผลิตภัณฑ์ ส่วนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวสามารถนำกลับไปใช้ได้

ชนิดของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในอินทรีย์ (Water in Oil(W/O) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ

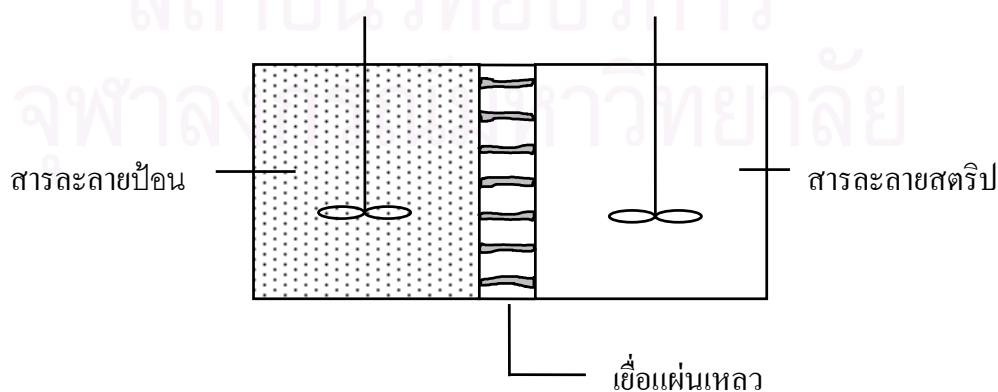
- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของอินทรีย์ในน้ำ (Oil in Water(O/W) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นอินทรีย์

2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ จะใช้ตัวรองรับที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนเป็นตัวรองรับ โดยเยื่อแผ่นเหลวจะถูกดึงไว้ในรูพรุนด้วยแรงคาปิลลารี (capillary force) (Marr และ Kopp, 1982; Schultz, 1988) ซึ่งตัวรองรับนั้นมีหลายแบบได้แก่ แบบแผ่นแบน (Flat Sheet) แบบแผ่นม้วน (Spiral - Wound) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวพองด้วยตัวรองรับคือ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและสารสกัดที่ใช้มีปริมาณน้อย แต่ก็มีข้อเสียอยู่บ้างคือมีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำและมีการการเสื่อมสภาพของเยื่อแผ่นเหลว (O'Hara, 1989; Shiau และ Chen, 1993)

2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat Sheet Supported Liquid Membrane)

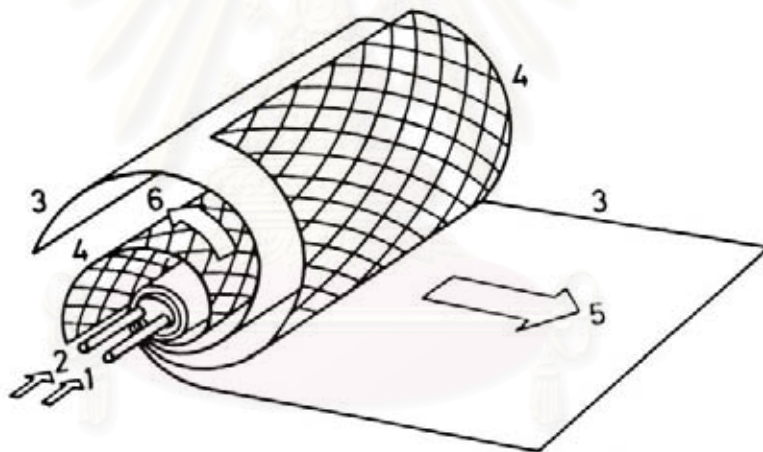
เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนมีรูปแบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เยื่อแผ่นเหลวแบบนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายเทมวลเนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อย



รูปที่ 2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Komasawa et al., 1983)

2.1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วน (Spiral-type Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วนแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 ตัวรองรับแบบแผ่นม้วนผลิตขึ้นโดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และแผ่นตาข่าย (Mesh Spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อนำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของโมดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี (Epoxy) ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว (Raffinate) และสารละลายสตริปที่ได้ออก (Strip) จะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของโมดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้คือ โมดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปไม่ซับซ้อน



รูปที่ 2.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Teramoto et al., 1987)

หมายเลขที่ 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน

หมายเลขที่ 2 ทางเข้าของสารละลายสตริป

หมายเลขที่ 3 เยื่อแผ่นเหลว

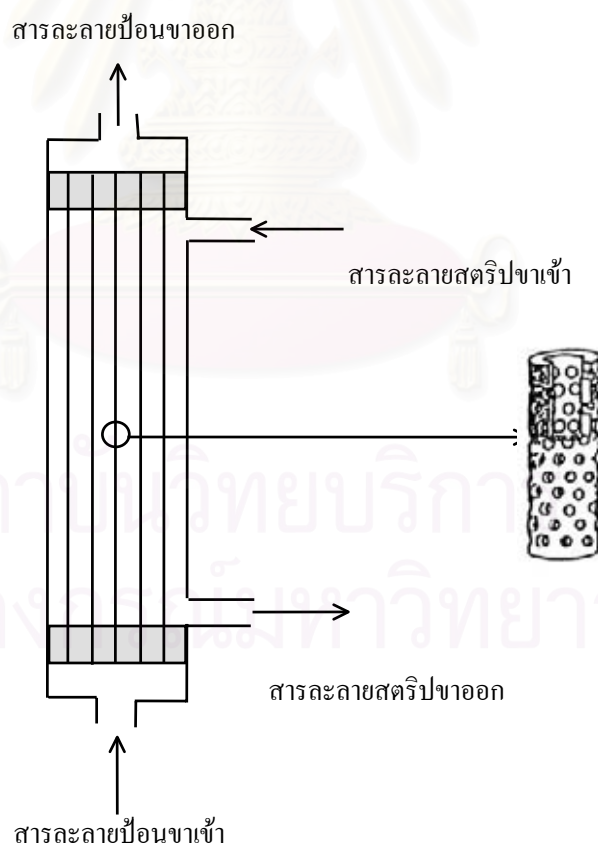
หมายเลขที่ 4 แผ่นกั้น

หมายเลขที่ 5 สารละลายป้อน

หมายเลขที่ 6 สารละลายสตริป

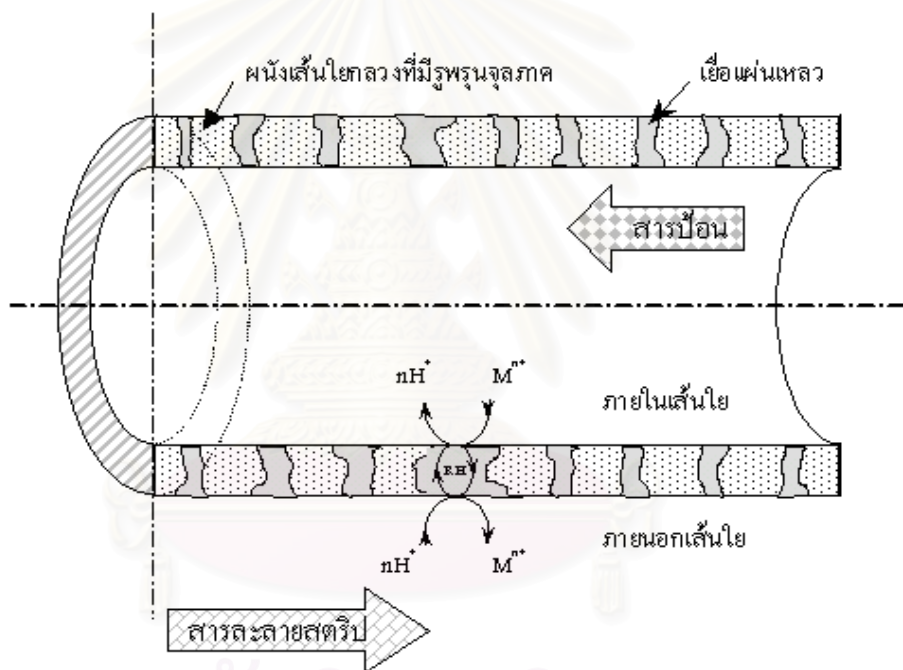
2.1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane; HFSLM)

ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงจะใช้วิธีนำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงในโมดูลรูปทรงกระบอกจากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของโมดูลด้วยเรซิน (Resin) ดังรูปที่ 2.5 ในการสกัดสารละลายป้อนและสารละลายสตริปจะไหลภายในเส้นใยกลวงที่เรียกว่าฝั่งท่อ (Tube Side) และฝั่งเปลือก (Shell Side) ซึ่งแล้วแต่ว่าผู้ใช้จะให้สายโคอยู่ฝั่งไหน และมีเยื่อแผ่นเหลวฝังอยู่ภายในเส้นใยกลวงซึ่งอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายสตริปฝั่งท่อและฝั่งเปลือก การไหลของสายป้อนและสายสตริปนั้นสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบไหลแบบทางเดียวกันและแบบสวนทางกันดังรูปที่ 2.6 แสดงถึงการไหลของสายป้อนและสายสตริปภายในท่อซึ่งเป็นลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน



รูปที่ 2.5 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Izatt, 1989)

การเตรียมกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับทำโดยนำเยื่อแผ่นเหลวมาเคลือบฝังไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลวพองด้วยตัวรองรับ เมื่อนำตัวรองรับนี้มากั้นระหว่างสารละลายสองชนิดที่ไม่ละลายกับเยื่อแผ่นเหลว ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทไอออนโลหะจากสารละลายชนิดแรกไปยังสารละลายอีกชนิดหนึ่ง ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังจะเป็นสารละลายอินทรีย์ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังต้องเป็นวัฏภาคสารละลายของน้ำ



รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารป้อนและสารละลายสตริปเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลางหนึ่งเส้นในจุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง
ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ

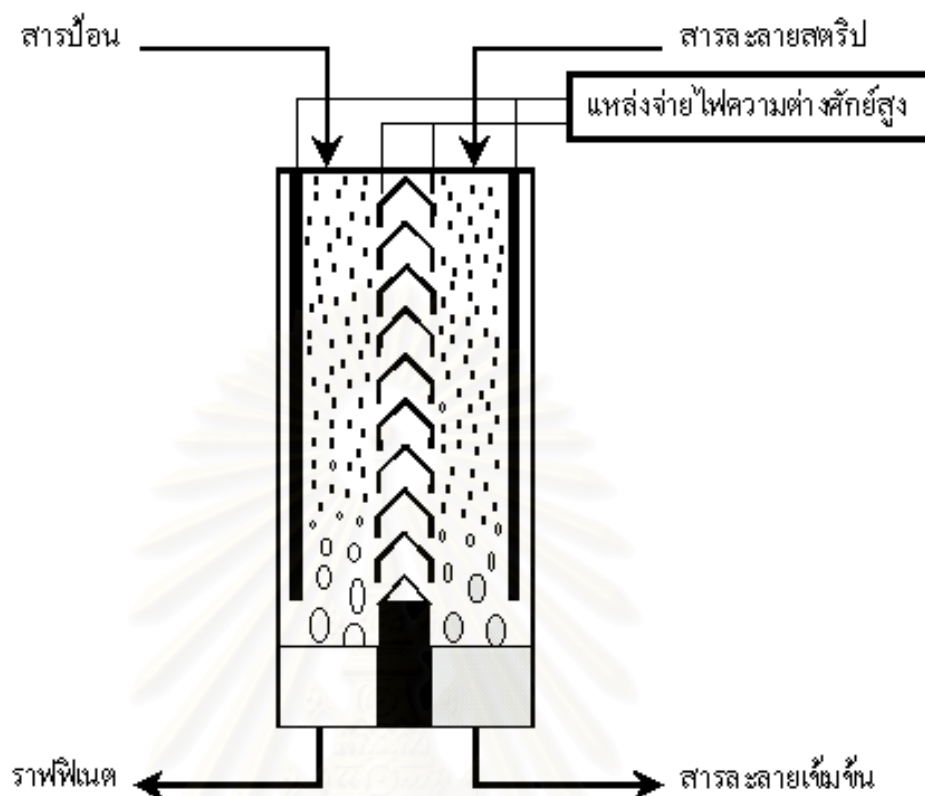
- มีค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูง
- มีค่าอัตราการถ่ายเทมวลที่สูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- มีค่าการคัดเลือกสูง
- สามารถเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์

- สามารถที่จะใช้แยกสารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้
- สามารถที่จะใช้ประโยชน์จากสารสกัดที่มีราคาแพงได้
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนและสารนำกลับมีค่าสูง
- สามารถใช้กับระบบที่มีของแข็งแขวนลอยได้
- มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ
- สามารถดัดแปลงได้
- สามารถที่จะขยายขนาดได้ง่าย

รูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง (Yang and Cussler, 1986; Dahuron and Cussler, 1988) และเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ (Danesi and Rickert, 1986; Nakano et al., 1987; Tanikaki et al., 1988) ซึ่ง เป็นรูปแบบของตัวรองรับที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้

2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Pseudo - Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์มีการพัฒนาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลลอยด์ (ชนิดหอสกัดแบบหยด), หลักไฟฟ้าสถิตย์ และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวรวมเข้าด้วยกันซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้ เช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย และระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน, ความเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น โดยลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 (ประกร รามกุล, 2544)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์

จากรูปที่ 2.7 ชุดอุปกรณ์เป็นถึงปฏิกรณ์ที่ทำขึ้นเป็นพิเศษ โดยถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์นำกลับ มีแผ่นกั้น (Baffle plate) เป็นโลหะตัวอักษรรูปตัว V ค้ำเรียงต่อกันเว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่ากัน โดยมีลวดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอาไว้ อีกทั้งยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะที่บสำหรับแบ่งกัน ภูมิภาคระหว่างสารละลายป้อนขาออก (raffinate) กับสารละลายสตริปขาออกในเซลล์สกัดและเซลล์การนำกลับ มีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มแช่อยู่ซึ่งต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ ขั้นตอนการทำงานเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นภูมิภาคของสารอินทรีย์ในถึงปฏิกรณ์จนได้ระดับของปริมาณที่ต้องการ โดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี่จะเป็นภูมิภาคต่อเนื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์จากนั้นป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของภูมิภาค เกิดการสกัดแยกและนำกลับออกตามกลไกการสกัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตย์ เป็นปัจจัยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพ

ในการสกัดสูงขึ้น ถึงปฏิกิริยาที่ใช้จะออกแบบเป็นพิเศษเพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อนผสมกันของภูมิภาคต่างๆ โดยหากมีหยดของสารปนหรือสารละลายนำกลับหลุดเข้าไปในช่องของแผ่นกั้นซึ่งกั้นภูมิภาคทั้งสอง หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดภูมิภาคของสารละลายมีรูปร่างยืดยาวออกเป็นรูปทรงรี เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของภูมิภาคสารละลาย ดังนั้นเมื่อมีหยดของภูมิภาคของสารละลาย ซึ่งอยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตย์จะรวมกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของภูมิภาคของสารละลายกับภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ที่จะส่งผลให้ภูมิภาคทั้งสองเคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ อีกทั้งยังมีแผ่นกั้นที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งจะช่วยให้หยดของภูมิภาคที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้นให้รวมตัวกันเองและตกกลับไปยังเซลล์ของมันตามเดิม (Gu, 1990)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (นิสิต สุไลมาน, 2544)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพวยง		เยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิตย์	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง	- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณสูง	- มีค่าการคัดเลือกสูง	- สัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ	- มีเสถียรภาพสูง	- กำลังการผลิตต่ำ
- มีกำลังการผลิตสูง	- ใช้พลังงานสูง	- ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	- เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ	- การปนเปื้อนต่ำ	- สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ
- กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน	- ปัญหาการปนเปื้อน	- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ	- การสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว	- ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	- สารอินทรีย์ต้องเป็นภูมิภาคต่อเนื่องเท่านั้น
	- ปัญหาในการใช้สารลดแรงตึงผิวและการบำบัด	- ใช้พลังงานต่ำ			- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก
		- ขยายขนาดง่าย			
		- อัตราการถ่ายเทมวลสูง			

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตย์จะมีข้อดีอยู่มากมาย เช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ ต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็น ขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรไม่สูง วัฏภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ และใช้กับกระบวนการที่วัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวัฏภาคต่างๆ ในขบวนการต่ำ อันเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในขบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นต้น [14] ดังนั้นเทคนิคการสกัดแยกด้วยเทคนิคต่างๆ ก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปตามลักษณะของการทำงานและพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไป ตารางที่ 2.1 เป็นการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่ารูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีข้อดีอยู่มากมายดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับในการศึกษาการถ่ายเทมวลของโคบอลต์ไอออน

2.2 กลไกการถ่ายเทมวล

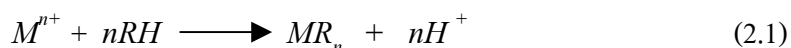
ในการถ่ายเทมวลที่จะใช้ในงานวิจัยนี้นั้นเป็นการถ่ายเทมวลที่เรียกว่า การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ การถ่ายเทมวลแบบควบคู่คือ กระบวนการถ่ายเทของไอออนสองชนิดพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายสตรีป ซึ่งแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลคือผลต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบอีกชนิดหนึ่ง (ไม่ใช่ขององค์ประกอบที่เราต้องการจะแยก) ดังนั้นเราจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่เราต้องการได้เรื่อยๆ แม้ว่าความเข้มข้นทางด้านของสารละลายสตรีปจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อน

การถ่ายเทแบบควบคู่สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารเชิงซ้อนกับสารซึมผ่าน

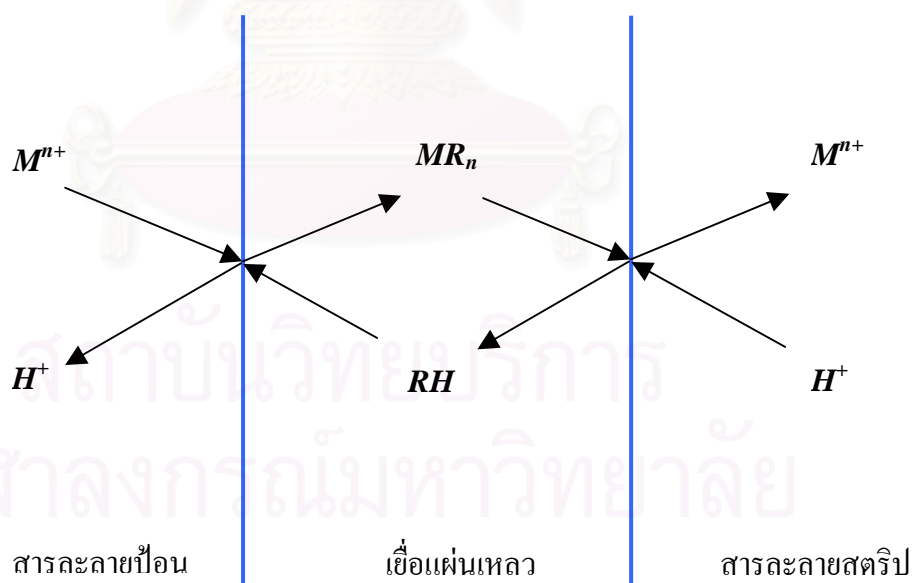
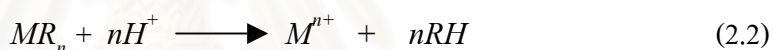
2.2.1 การถ่ายเทแบบสวนทาง (Counter-Transport)

การถ่ายเทแบบสวนทาง คือการถ่ายเทที่การซึมผ่านของไอออนทั้งสองเคลื่อนที่สวนทางกันผ่านเยื่อแผ่นเหลวการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้

ไอออนโลหะ (M^{n+}) ที่อยู่ในสารละลายป้อน ทำปฏิกิริยากับสารสกัดกรด (RH) ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) และไฮโดรเนียมไอออน (H^+) ดังสมการไฮโดรเนียมไอออน (H^+) นั้นอยู่ในสารละลายป้อน และสารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) อยู่เยื่อแผ่นเหลว



สารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) ที่เกิดขึ้นในจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริป ที่ผิวสัมผัสนี้ (MR_n) จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนที่อยู่ในสารละลายสตริปเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายสตริป และได้สารสกัด (RH) กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัส

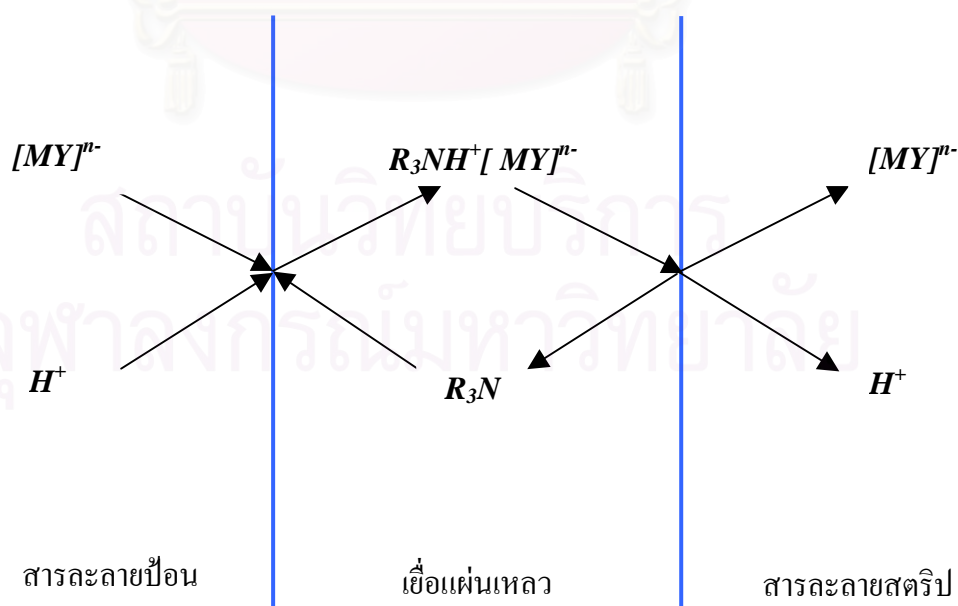
2.2.2 การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport)

การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน คือการถ่ายเทที่การซึมผ่านของไอออนทั้งสองเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันผ่านเยื่อแผ่นเหลวการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้

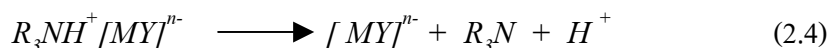
ไอออนโลหะในรูปประจุลบ $[MY]^{n-}$ ที่อยู่ในสารละลายป้อน ทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดที่เป็นเบส (R_3N) ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออน (H^+) ที่อยู่ในสารละลายป้อน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) ดังสมการ



สารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) ที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลวจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริป ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) จะเกิดปฏิกิริยาน่ากลับได้เป็นไฮโดรเนียมไอออนและไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายสตริป และได้สารสกัด (R_3N) กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไปดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัส



ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

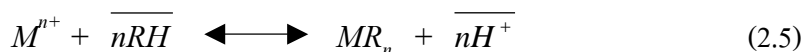
- การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
- การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
- การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ
- การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ
- การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ

2.3 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด (Tavlarides et al., 1987) ดังนี้

2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อยคือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant) และ สารสกัดชนิดคีเลต (Chelate Extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-COOH$, $=P(O)OH$, $-SO_3H$ ส่วนประเภทหลังสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ตั้งสมการ



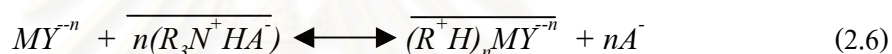
ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ นอกจากนี้ นั้นสมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความ เป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออน โลหะนั้น ๆ (Tavlarides et al., 1987)

สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Organic Derivatives of Phosphorous Acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic Acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะกรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric Acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acids ; D2EHPA)

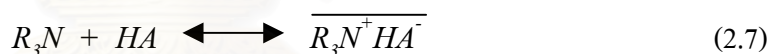
สารสกัดประเภทคีเลตได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วยคอนเนอร์กรุป (Donor Groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเตต (Bidentate Complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลตเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียงสองประเภทคือ (ก) ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมา โดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic Leach Liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline)

2.3.2 สารสกัดชนิดต่าง (Basic Extractant)

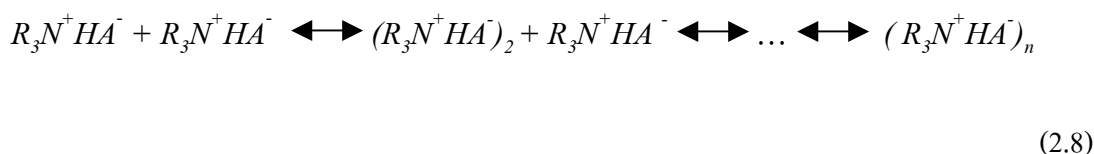
เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary Ammonium Halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary; RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (secondary; R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary; R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary; R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Anionic Species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



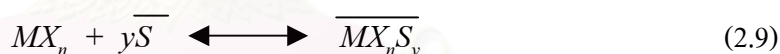
นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีชื่อว่า $\text{R}_3\text{N}^+\text{HA}^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ MY^{-n} จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุคังสมการ ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้เอมีนเป็นสารสกัดคือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ (Ammonium Cation และ Anion) การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการ



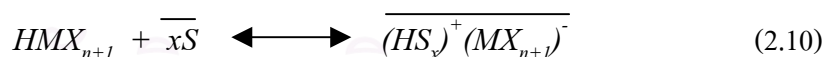
การเกิดวัฏภาคที่สามทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifiers) เช่นพวก long-chain aliphatic alcohol (Tavlarides et al., 1987)

2.3.3 สารสกัดชนิดซอลเวท (Solvating Extractant)

สารสกัดประเภทซอลเวท (Solvating) หรือสารสกัดประเภทกลาง (Neutral) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะคอนเนอร์กรุ๊ป จึงไม่สามารถแตกโปรตอนรอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (Central Metal Atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตรอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



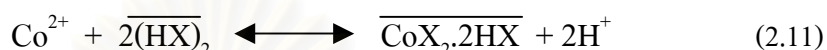
หรือ



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดซอลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดซอลเวทดังกล่าวที่ 2.9 และ 2.10

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออน

การถ่ายเทมวลของโคบอลต์ไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ที่ใช้ D2EHPA เป็นสารสกัดโดยละลายอยู่ในเคโรซีน ปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับสารสกัดจะเป็นปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (Marchese et al., 1993; Simonin et al., 2003; Alguacil and Alonso, 2004; Leon and Guzman, 2004)



ค่าคงที่สมดุล, K_{eq}

$$K_{eq} = \frac{[\overline{\text{CoX}_2 \cdot 2\text{HX}}][\text{H}^+]^2}{[\text{Co}^{2+}][(\overline{\text{HX}})_2]^2} \quad (2.12)$$

แบบจำลองนี้ได้จากศึกษาวิจัยของ Marchese และ Campderros โดยสมมติว่ากลไกในการถ่ายเทมวลของโคบอลต์จะพิจารณาขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการถ่ายเทมวล 3 ขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1: ไอออนโลหะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายป้อน
- ขั้นตอนที่ 2: สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะและสารสกัดแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว
- ขั้นตอนที่ 3: ไอออนโลหะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายสตริป

โดยสมมติว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวและเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายสตริปเกิดขึ้นเร็วมาก และไม่คิดความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการแพร่ของ H^+ ในชั้นฟิล์มของสารละลายทั้งสองและความเข้มข้นของโปรตอนในสารละลายป้อนจะน้อยกว่าความเข้มข้นของโปรตอนในสารละลายสตริปมาก ๆ ($[\text{H}^+]_1 \ll [\text{H}^+]_2$) และความเข้มข้นของสารสกัดมากกว่าความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนมาก ๆ ($\text{HX} \gg \text{CoX}_2$) (Marchese and Campderros, 2004)

ค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์รวม

$$P = \left[\frac{R_o}{([\text{H}^+]_f^{-2} + [\text{H}^+]_s^{-2}) K_{eq} C_{\text{HX}}^2} + R_f + R_s \right]^{-1} \quad (2.13)$$

เมื่อ

P คือ ค่าการซึมผ่าน , (m/s)

C_{HX}^o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด , (mol/l)

K_{eq} คือ ค่าคงที่สมดุล

R_0 คือ ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นเหลว , (s/m)

R_f คือ ค่าความต้านทานของสารละลายป้อน , (s/m)

R_s คือ ค่าความต้านทานของสารละลายสตรีป , (s/m)

ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นเหลว

$$R_0 = \frac{l_{ef}}{D'_{org}} \quad (2.14)$$

เมื่อ

R_0 คือ ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นเหลว , (s/m)

D'_{org} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของสารประกอบเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลว , (m²/s)

l_{ef} คือ ความหนาชั้นผลของเยื่อแผ่นเหลว , (m)

ค่าความต้านทานของสารละลายป้อน

$$R_f = \frac{1}{k_f} \quad (2.15)$$

เมื่อ

R_f คือ ค่าความต้านทานของสารละลายป้อน , (s/m)

k_f คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายป้อน , (m/s)

ค่าความต้านทานของสารละลายสตรีป

$$R_s = \frac{1}{k_s} \quad (2.16)$$

เมื่อ

R_s คือ ค่าความต้านทานของสารละลายสตรีป , (s/m)

k_s คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายสตรีป , (m/s)

เนื่องจากการทดลองนี้ความเข้มข้นของโปรตอนในสารละลายป้อนจะน้อยกว่าความเข้มข้นของโปรตอนในสารละลายสตรีปมาก ๆ ($[H^+]_f \ll [H^+]_s$) ดังนั้นค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์รวมจะแสดงได้ดังนี้ (Marchese and Campderros, 2004)

$$P = \left[B + \frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_s} \right]^{-1} \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$B = \left[\frac{l_{ef}}{D'_{org} K_{eq} C_{HX}^2 [H^+]_f^{-2}} \right] \quad (2.18)$$

การคำนวณหาค่าความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเชิงประสิทธิผล

เนื่องจากทราบขนาดและรูปทรงของเส้นใย แต่ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวจะต้องมีการปรับค่าเนื่องมาจากรูปทรงที่เป็นทรงกลมของเส้นใย โดยการหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกลางทั้งภายในและภายนอก ดังนี้

$$l_{ef} = r_f \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (2.19)$$

เมื่อ

l_{ef} คือ ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเชิงประสิทธิผล , (m)

r_f คือ รัศมีของเส้นใยบนด้านของสารละลายป้อน , (m)

d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใย , (m)

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใย , (m)

ชั้นฟิล์มของทางด้านสารละลายจะมีลักษณะเป็นทรงกลมด้วยแต่ได้รวมผลกระทบตรงส่วนนี้ไว้กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงประสิทธิผลในส่วนของเยื่อแผ่นเหลวจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเชิงซ้อนของแคดเมียมในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ สามารถคำนวณได้จากสมการของ Stokes และ Einstein รวมทั้งค่าความพูนและความคดเคี้ยวของตัวรองรับ ดังนี้

$$D'_{org} = \frac{D_{org} \varepsilon}{\tau} \quad (2.20)$$

เมื่อ

D'_{org} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงประสิทธิผลในส่วนของเยื่อแผ่นเหลว, (m^2/s)

D_{org} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในส่วนของเยื่อแผ่นเหลว, (m^2/s)

τ คือ ความคดเคี้ยวของตัวรองรับ

ε คือ ความพรุนของตัวรองรับ

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการถ่ายเทมวล

พารามิเตอร์ของการถ่ายเทมวลที่เราจะศึกษาในการคำนวณค่าการซึมผ่านในที่นี้คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป ในการศึกษาเราจะให้สารละลายป้อนไหลในทางด้านท่อและสารละลายสตรีปไหลในทางด้านเปลือก สารละลายที่ไหลในทางด้านท่อของเส้นใยกลวงลักษณะการไหลต้องเป็นแบบลามินาร์

ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในส่วนของสารละลายสตรีป (Marchese and Campderros, 2004)

$$\frac{k_s d_h}{D_s} = 4.57 \left(\frac{d_h^2 \langle v_2 \rangle}{LD_s} \right)^{0.33} \quad (2.21)$$

เมื่อ

k_s คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในส่วนของสารละลายสตรีป, (m/s)

d_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก, (m)

$\langle v_2 \rangle$ คือ ความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยของสารละลายสตรีปที่ไหลในฝั่งเปลือก, (m/s)

L คือ ความยาวของเส้นใย, (m)

D_{aq} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือของโลหะในสารละลายของน้ำ, (m^2/s)

ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในส่วนของสารละลายสตรีป (LeveAque, 1928; Gabelman and Hwang, 1999)

$$\frac{k_f d_1}{D_f} = 1.62 \left(\frac{d_1^2 \langle v_1 \rangle}{LD_f} \right)^{0.33} \quad (2.22)$$

เมื่อ

k_f คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในส่วนของสารละลายป้อน , (m/s)

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใย , (m)

$\langle v_1 \rangle$ คือ ความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยของสารละลายป้อนที่ไหลในฝั่งท่อ , (m/s)

L คือ ความยาวของเส้นใย , (m)

D_{aq} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของเกลือของโลหะในสารละลายของน้ำ , (m²/s)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการในการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ศึกษาการสกัดและนำกลับไอออนโลหะจากสารละลายของน้ำ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงที่ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายสตรีป

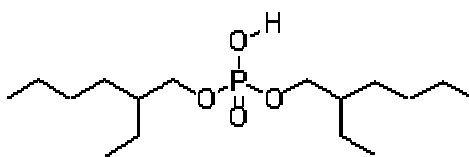
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองสามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 3.1 โดยตัวทำละลายเคโรซีนได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทยออยล์ ส่วนน้ำที่ใช้ตลอดการทดลองเป็นน้ำที่ผ่านกระบวนการกลั่น (Distillated water) สารเคมีที่ใช้อื่น ๆ มีคุณภาพระดับที่ใช้ในห้องทดลอง (Analytical reagent grade)

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	บริษัท
ไอออนโลหะ	Cobaltous chloride	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Farmitalia Carlo Erba
สารสกัด	Di-(2-ethylhexyl) phosphate	$\text{C}_{16}\text{H}_{35}\text{O}_4\text{P}$	Sigma Chemical
ตัวทำละลาย อินทรีย์	Kerosene	-	Thai Oil Ltd.
สารละลายสตรีป	Hydrochloric acid	HCl	Merck

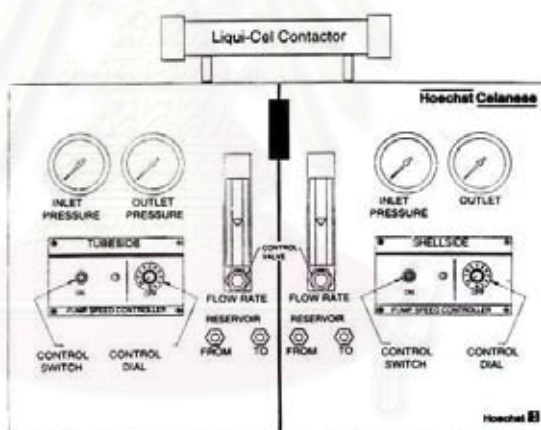
สารสกัด di-(2-ethylhexyl) phosphate ที่ใช้ในการทดลองมีสูตร โครงสร้างดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 3.1 สูตร โครงสร้างของสารสกัด Di-2-ethylhexyl phosphoric acid

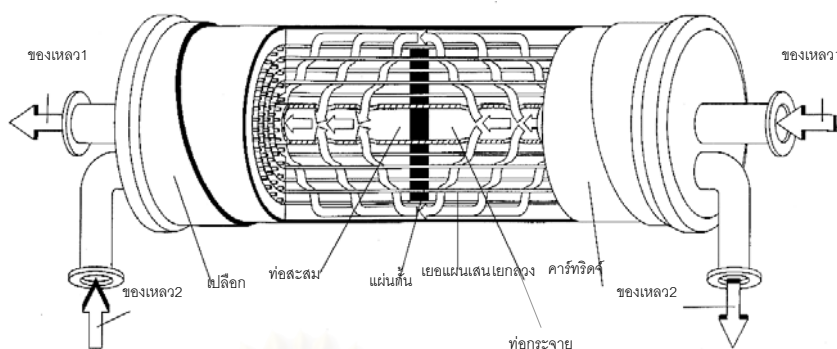
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat.#5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ประกอบด้วยเครื่องสูบลมสองชุดที่มีอัตราไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที ชุดควบคุมความเร็วสองชุด มาตรวัดอัตราการไหลสองชุด และมาตรวัดความดันสองชุด และรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.2 ดังนี้



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel[®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวรองรับ ได้แก่ เส้นใยกลวงโพลีโพรไพลีน (Polypropylene) ชนิดมีรูพรุน Celgard[®] X-30 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นโมดูลของเส้นใยกลวงแสดงดังรูปที่ 3.3 และมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel[®] Contactor ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะ	มิติ
วัสดุเส้นใยกลวง	โพลีโพรไพลีน (Polypropylene)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลวง	30 %
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m ² (15.2 ft ²)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 cm ² /cm ³ (74.4 m ² /m ³)
ขนาดของโมดูล (เส้นผ่านศูนย์กลาง x ยาว)	6.3x20.3 cm (2.5x8 inch)
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 Kg/cm ²
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการ	1-60 °C

2. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง รุ่น HI 8417 Microprocessor Bench pH/ °C Meter

ของบริษัท Hanna Instrument

3. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รุ่น Model IL551 AA/AE

Spectrophotometer ของบริษัท Instrumentation Laboratory Inc.

4. เครื่องมือ Diffusion of a liquid apparatus ของ Armfield

5. เครื่องมือวัดความหนืด Brookfield Viscometer model LV-DVII+

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนโคบอลต์ความเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 และเก็บตัวอย่างอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายสตริปซึ่งเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 1 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปที่ใช้เริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใยกลวงดังนี้
 สารละลายผสมของสารสกัด D2EHPA ในเคโรซีน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงโดยการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในทางด้านที่ต่อกับทางด้านเปลือกโดยจะหยุดป้อนสารเมื่อสังเกตเห็นว่าระดับของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในภาชนะเริ่มคงที่
- (4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของสารละลายสตริปเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายสตริปขาออกสุดท้าย เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ใช้ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองเป็น 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
- (6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.3.2 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายสไตริปที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนโคบอลต์ความเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายสไตริปซึ่งเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 1 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสไตริปที่ใช้เริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใยกลวงดังนี้
สารละลายผสมของสารสกัด D2EHPA ในเคโรซีน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ชีตครึ่งในรูปพุนจุลภาคของเส้นใยกลวงโดยการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในทางด้านท่อกับทางด้านเปลือกโดยจะหยุดป้อนสารเมื่อสังเกตเห็นว่าระดับของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในภาชนะเริ่มคงที่
- (4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสไตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของสารละลายสไตริปเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายสไตริปขาออกสุดท้าย เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ใช้ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองเป็น 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
- (6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายอินทรีย์ที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

- (1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนโคบอลต์ความเข้มข้น 1,000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- (2) เตรียมสารละลายสไตริปซึ่งเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 1 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสไตริปที่ใช้เริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์

(3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใยดังนี้

สารละลายผสมของสารสกัด D2EHPA ในเคโรซีน ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณ 800 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูปอนุภาคของเส้นใยกลวงโดยการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในทางด้านท่อกับทางด้านเปลือกโดยจะหยุดป้อนสารเมื่อสังเกตเห็นว่าระดับของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในภาชนะเริ่มคงที่

(4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลของสารละลายสตริปเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายสตริปขาออกสุดท้าย เพื่อนำไปวิเคราะห์

(5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในเคโรซีนที่ใช้ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งเป็น 0.5 1 5 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ

(6) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (5) โดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนเป็น 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

(7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออน โคบอลต์ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

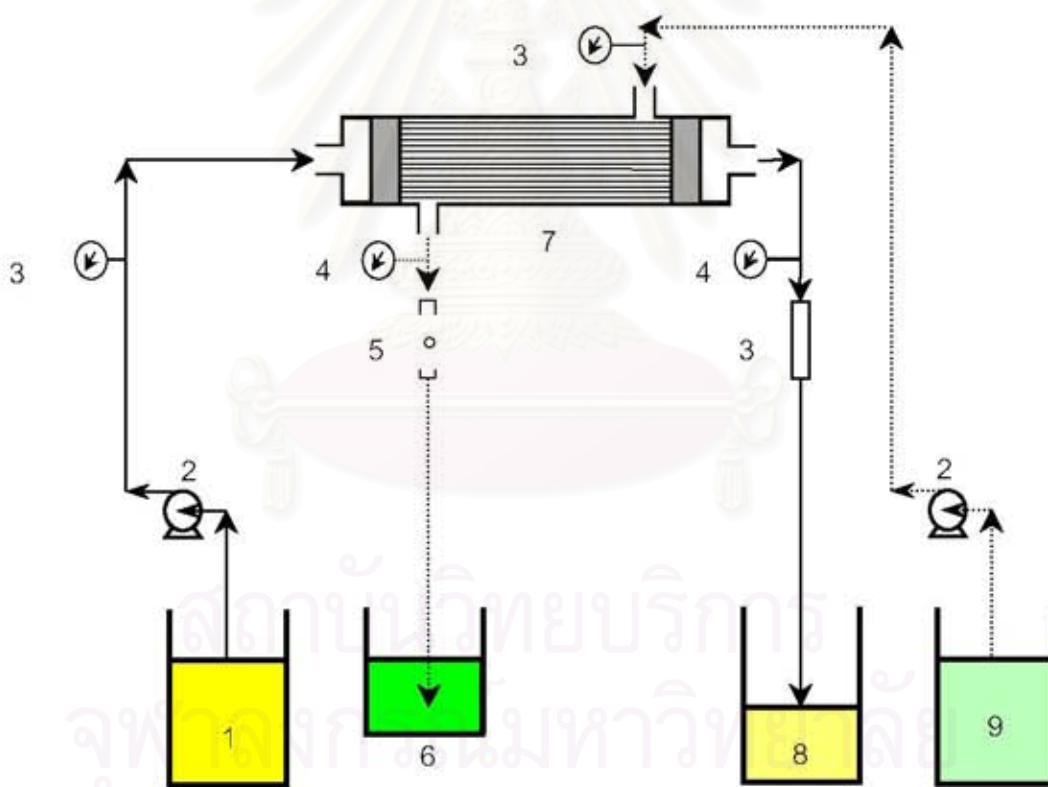
(1) เตรียมสารละลายป้อนที่มีไอออนโคบอลต์ ความเข้มข้นอย่างละ 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ปริมาตร 5 ลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์

(2) เตรียมสารละลายสตริปซึ่งเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 1 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายสตริปที่ใช้เริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์

(3) เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใยกลวงดังนี้

สารละลายผสมของสารสกัด D2EHPA ในเคโรซีน ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณ 800 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูปอนุภาคของเส้นใยกลวงโดยการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในทางด้านท่อกับทางด้านเปลือกโดยจะหยุดป้อนสารเมื่อสังเกตเห็นว่าระดับของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในภาชนะเริ่มคงที่

- (4) ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสตริปเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลเส้นใยกลาง โดยมี อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตริปเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.5 เมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายสตริปขาออกสุดท้าย เพื่อนำไปวิเคราะห์
- (5) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของ ไอออน โคบอลต์เป็น 300 500 800 และ 1,000 ตามลำดับ
- (6) ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (5) โดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนเป็น 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
- (7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลอง ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ ไอออน โคบอลต์ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer



รูปที่ 3.4 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (one through mode)

ซึ่งของไหลในกระบวนการมีทิศทางการไหลสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง โดยที่ 1 คือ ถังของสารป้อนขาเข้า 2 คือ ปุ่มสูบ 3 คือ เกจวัดความดันขาเข้า 4 คือ เกจวัดความดันขาออก 5 คือ มาตรวัดอัตราการไหล 6 คือ ถังของสารละลายนำกลับขาออก 7 คือ ชุดอุปกรณ์เส้นใยกลวง 8 คือ ถังของสารป้อนขาออก 9 คือถังของสารละลายนำกลับขาเข้า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

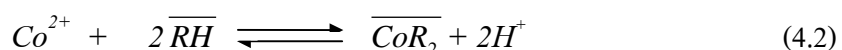
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยมีปัจจัยที่จะศึกษาได้แก่ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตรีป ความเข้มข้นของสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด โดยมีการเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลียนแบบมาจากงานวิจัยของ Marchese และ Camderros ซึ่งได้ทำการศึกษาการซึมผ่านของไอออนแคลเซียมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัด D2EHPA ละลายในตัวทำละลายเอทโรซีน ปฏิกิริยาระหว่างไอออนโลหะทั้งสองชนิดกับสารสกัด D2EHPA เกิดขึ้นในแบบเดียวกัน โดยปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับของไอออนโคบอลต์ (Marchese et al., 1993; Simonin et al., 2003; Alguacil and Alonso, 2004; Leon and Guzman, 2004) แสดงดังสมการ (4.1)



โดย \overline{RH} คือ สารสกัด D2EHPA ซึ่งการถ่ายเทมวลของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายสตรีปจะเคลื่อนที่สวนทางกันในวัฏภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

จากทฤษฎีของสารสกัดในบทที่ 2 เนื่องจากสารสกัด D2EHPA ที่ใช้เป็นสารสกัดชนิดกรดจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา คือ $=P(O)OH$ ไอออนโคบอลต์สามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลางและสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ (4.2)



ในงานวิจัยนี้เราได้เลือกใช้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนโคบอลต์กับสารสกัด D2EHPA เป็นไปตามสมการ (4.1) เนื่องจากได้มีการยืนยันจากงานวิจัยต่างๆ มากมายว่าปฏิกิริยา

ระหว่างไอออนของโลหะกับสารสกัดชนิดกรดจะเกิดปฏิกิริยาดังเช่นสมการ (4.1) จากสมการนี้ทำให้ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยามีความสัมพันธ์ดังนี้

$$K_{ex} = \frac{[CoR_2 \cdot 2RH][H^+]^2}{[Co^{2+}][RH]_2^2} \quad (4.3)$$

4.1 ผลที่ได้จากการทดลอง

4.1.1 ผลของอัตราการใช้เหล็กปริมาณของสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์

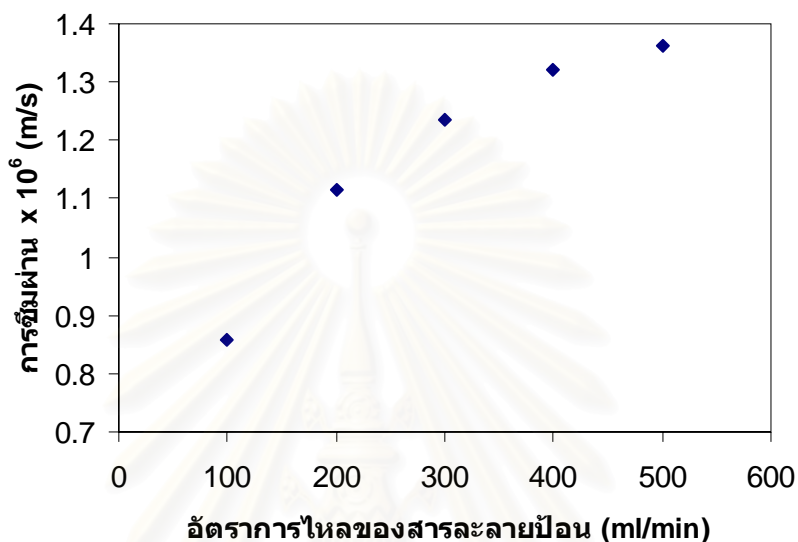
การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการใช้เหล็กปริมาณของสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการใช้เหล็กของสารละลายป้อนเป็น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่น ๆ มีค่าคงที่ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อน 1,000 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน ประมาณ 5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เป็นสารละลายสตรีปมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 อัตราการใช้เหล็กของสารละลายสตรีปมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการใช้เหล็กเป็นแบบสวนทางกัน และใช้เหล็กผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการใช้เหล็กของสารละลายป้อนเป็น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ค่าการซึมผ่านมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอัตราการใช้เหล็กของสารละลายป้อนส่งผลให้ค่าความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มในสารละลายป้อนลดลง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานในชั้นฟิล์มของสารละลายป้อนลดลงและทำให้ค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นในที่สุด (Breembroek et al. 1998; Gabelman and Hwang, 1999) โดยสามารถอธิบายได้จากสมการ (4.4) และ (4.5)

$$k_{aq} = \frac{D_{aq}}{\delta_{aq}} \quad (4.4)$$

$$R_{aq} = \frac{1}{k_{aq}} \quad (4.5)$$

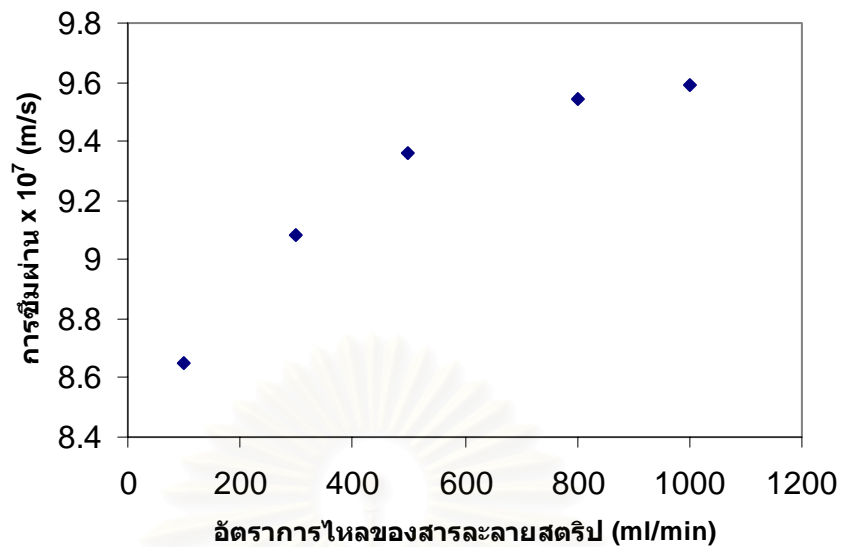
เมื่อ k_{aq} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคสารละลายของน้ำ, D_{aq} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำ, δ_{aq} คือ ความหนาของชั้นฟิล์มในวัฏภาคสารละลายของน้ำ และ R_{aq} คือ ความต้านทานของชั้นฟิล์มในวัฏภาคสารละลายของน้ำ ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนกับการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์ เมื่อ $[Co^{2+}]_f = 1,000$ ppm, $[D2EHPA] = 20$ (%v/v), $pH_f = 5$, $pH_s = 1$, $Q_s = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว

4.1.2 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตริปที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์

การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตริปที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายสตริปเป็น 100 300 500 800 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นๆมีค่าคงที่ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อน 1,000 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนประมาณ 5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เป็นสารละลายสตริปมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 อัตราการไหลของสารละลายป้อนมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2

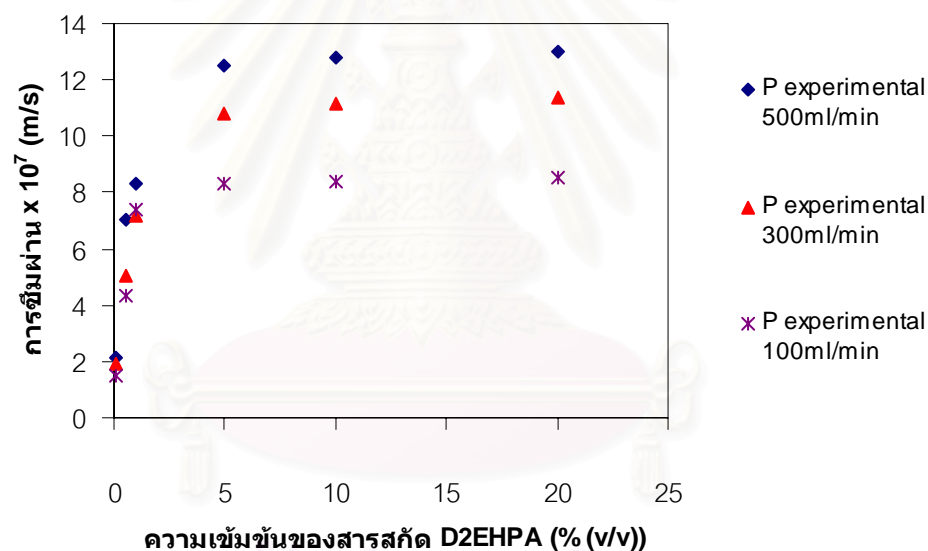


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสไตริปกับการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์ เมื่อ $[Co^{2+}]_f = 1,000$ ppm, $[D2EHPA] = 20$ (%v/v), $pH_f = 5$, $pH_s = 1$, $Q_f = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว

จากรูปที่ 4.2 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายสไตริปเป็น 100 300 500 800 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ค่าการซึมผ่านมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยจะคล้ายคลึงกับการศึกษาผลของอัตราการไหลอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์ซึ่งอาศัยหลักการเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายสไตริปส่งผลให้ค่าความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสไตริปเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสไตริปที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มในสารละลายสไตริปลดลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายสไตริปเพิ่มขึ้น เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายสไตริปเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความต้านทานในชั้นฟิล์มของสารละลายสไตริปลดลงและทำให้ค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นในที่สุด

4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์

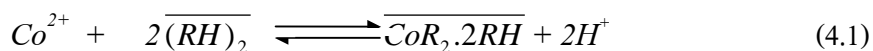
การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ โดยได้ทดลองเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 0.1 0.5 1.0 5.0 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน โดยกำหนดปัจจัยอื่นให้คงที่ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลายป้อน 1,000 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนประมาณ 5 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เป็นสารละลายสตรีปมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 อัตราการไหลของสารละลายสตรีปมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารละลายป้อนมีค่า 100 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ เมื่อ $[Co^{2+}]_f = 1,000$ ppm, $pH_f = 5$, $pH_s = 1$, $Q_s = Q_f = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 0.1 0.5 1.0 5.0 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าค่าการซึมผ่านมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA จาก 0.1 จนถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และหลังจากนั้นค่าการซึมผ่านจะมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด

มากกว่า 5 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาของกระบวนการสกัดและนำกลับของไอออนโคบอลต์ดังแสดงในสมการ (4.1)



ในช่วงที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีค่า 0.1 จนถึง 5 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าค่าการซึมผ่านมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด (\overline{RH}) เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้นตามทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ ไอออนโคบอลต์ถูกสกัดมากขึ้นเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโคบอลต์มากขึ้นทำให้เกิดการนำกลับเพิ่มขึ้นเช่นกัน ที่สุดแล้วจะส่งผลให้ค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีค่ามากกว่า 5 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์จะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้นมาก (Luccio et al., 2000) ทำให้สารเชิงซ้อนแพร่ได้ช้าลง หรือก็คือส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) ของสารเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะที่ละลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้มีค่าน้อยลง ดังสมการของ Stokes และ Einstein ดังนี้

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} \quad (4.6)$$

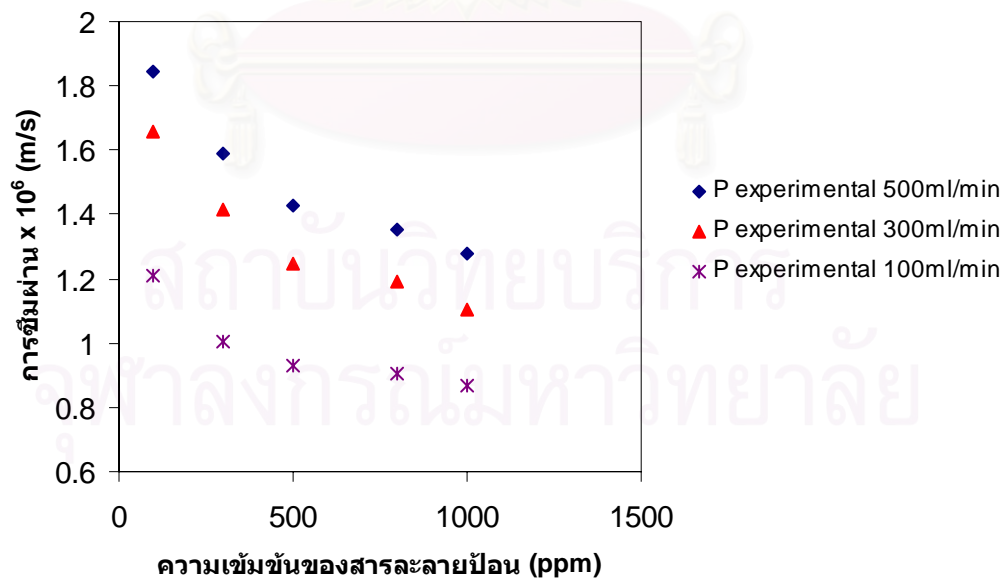
เมื่อ k_B คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann T คือ อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว π คือ ค่าคงที่ 3.1416 η คือ ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว r คือ รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน เมื่อสารเชิงซ้อนแพร่ได้ช้าลงจึงมีสารเชิงซ้อนบางส่วนที่ยังเกาะอยู่ที่ผิวสัมผัสทำให้ไอออนโคบอลต์ทำปฏิกิริยากับสารสกัดตรงจุดนั้นไม่ได้ ทำให้ไอออนโคบอลต์ที่ถูกทำปฏิกิริยามีจำนวนเท่าเดิมถึงแม้จะเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ทำให้ค่าการซึมผ่านมีค่าคงที่

เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อนเป็น 100 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อ นาที พร้อมกับทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 0.1 0.5 1 5 10 และ 20 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าค่าการซึมผ่านมีแนวโน้มคล้ายคลึงกันที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนทั้งสามค่า กล่าวคือการซึมผ่านมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA จาก 0.1 จนถึง 5 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และหลังจากนั้นค่าการซึมผ่านจะมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมากกว่า 5 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ค่าความเข้มข้นของสารสกัดที่เท่ากัน

ค่าการซึมผ่านที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 500 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีค่ามากกว่าที่อัตราการไหล 300 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อนส่งผลให้ค่าความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวฏภาคของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการซึมผ่านเพิ่มในที่สุดดังที่ได้อธิบายไว้ในตอนต้น

4.1.4 ผลของความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อน โดยทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนเป็น 100 300 500 800 และ 1,000 ส่วนในล้านส่วน ส่วนปัจจัยอื่นๆจะคงที่ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนประมาณ 5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เป็นสารละลายสตริปมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 อัตราการไหลของสารละลายสตริปมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารละลายป้อนมีค่า 100 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนกับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ เมื่อ $[D2EHPA] = 20$ (%v/v), $pH_f = 5$, $pH_s = 1$, $Q_f = Q_s = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว

จากรูปที่ 4.4 พบว่าที่ทุกๆ อัตราการไหลของสารละลายป้อนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์จะมีค่าลดลง โดยค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์จะมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน 100 ส่วนในล้านส่วน ตามด้วยที่ความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน 300 500 800 และ 1000 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนใดๆ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายป้อนกับค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์จะออกมาคล้ายคลึงกัน โดยที่ค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อน 500 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ค่าการซึมผ่านจะมีค่าสูงกว่าที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 300 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ที่ทุกช่วงของความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่ทำการทดลอง

จากผลการทดลองกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนมีผลกระทบต่อค่าการซึมผ่านในทุกช่วงอัตราการไหลของสารละลายป้อน เมื่อความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนโคบอลต์ในสารละลายของน้ำลดลงเนื่องมาจากจำนวนไอออนโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางกระบวนการแพร่ในวัฏภาคของสารละลายป้อน (Robinson and Stokes, 1970; Harned and Owen, 1958) เมื่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนโคบอลต์ในสารละลายลดลงทำให้ค่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคสารละลายป้อนลดลง ดังที่แสดงในสมการ (4.4) โดยที่ค่าความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าคงที่ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนที่เท่ากัน (Breembroek et al., 1998)

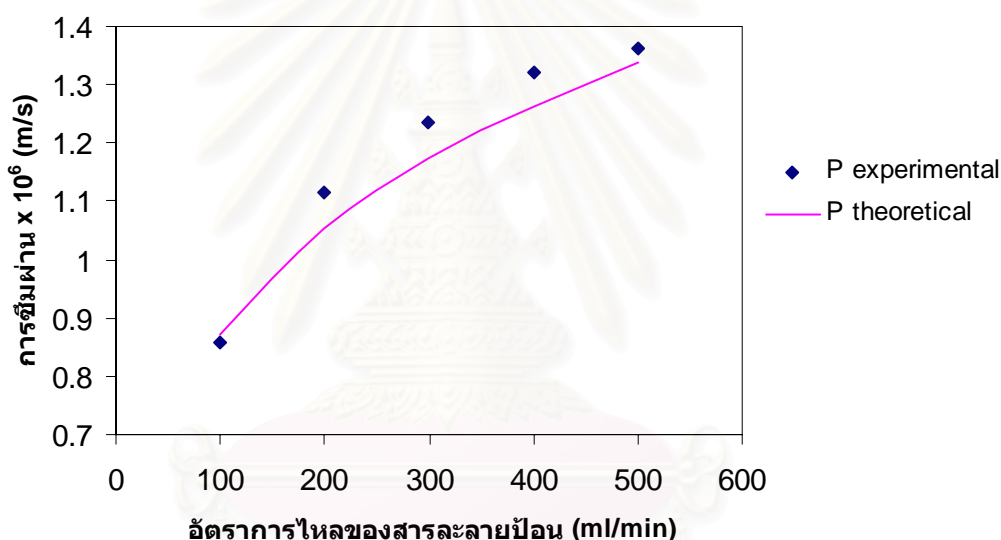
$$k_{aq} = \frac{D_{aq}}{\delta_{aq}} \quad (4.4)$$

เมื่อ k_{aq} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคสารละลายของน้ำ, D_{aq} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำ และ δ_{aq} คือ ความหนาของชั้นฟิล์มในวัฏภาคสารละลายของน้ำ ตามลำดับ เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายป้อนลดลงส่งผลให้ค่าการซึมผ่านลดลงในที่สุด ที่ความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์เท่ากันที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนสูงจะมีค่าการซึมผ่านมากกว่าที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนต่ำเนื่องจากความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของสารละลายป้อนมากขึ้นค่าการซึมผ่านก็สูงขึ้นด้วย

4.2 ผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2.1 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มีการศึกษาผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อนเป็น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่น ๆ มีค่าคงที่ดังที่กำหนดในการทดลอง โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนกับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่น ๆ คงที่ดังนี้ $[Co^{2+}]_f = 1,000$ ppm, $[D2EHPA] = 20$ (%v/v), $pH_f = 5$, $pH_s = 1$, $Q_s = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านครั้งเดียว

จากรูปที่ 4.5 จากการศึกษาผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ พบว่าผลที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มเหมือนกันกับผลที่ได้จากการทดลองและค่าการซึมผ่านที่ได้จากวิธีการทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อนเป็น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.1 ค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน

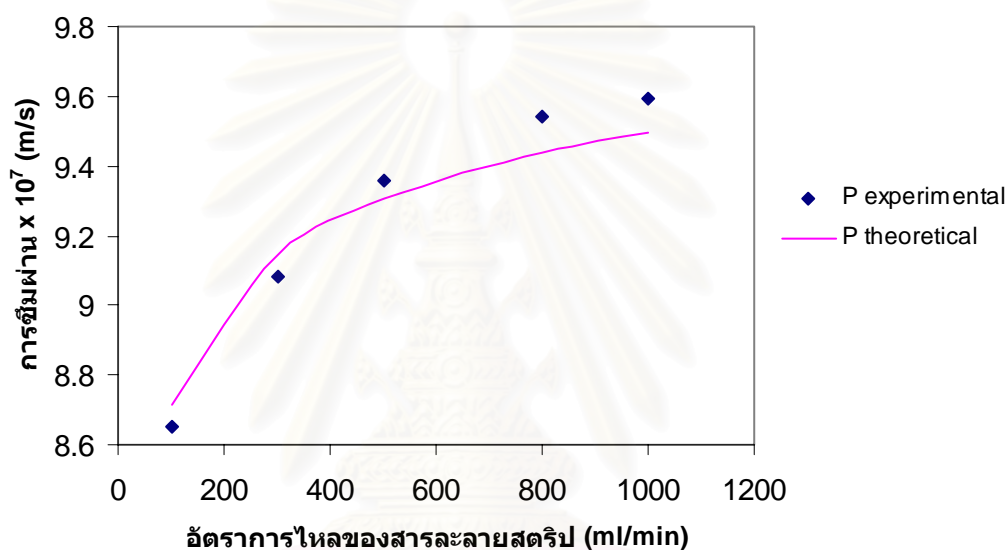
Q_f (ml/min)	v_f (m/s)	k_f (m/s)	P_{exp} (m/s)	P_{the} (m/s)
100	0.00361	1.032×10^{-6}	8.650×10^{-7}	8.715×10^{-7}
200	0.00722	1.297×10^{-6}	1.100×10^{-6}	1.053×10^{-6}
300	0.01083	1.483×10^{-6}	1.149×10^{-6}	1.173×10^{-6}
400	0.01444	1.630×10^{-6}	1.228×10^{-6}	1.263×10^{-6}
500	0.01805	1.755×10^{-6}	1.324×10^{-6}	1.337×10^{-6}

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อนเป็น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.00361 0.00722 0.01083 0.0144 และ 0.01805 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของภูมิภาคของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีค่า 1.032×10^{-6} 1.297×10^{-6} 1.483×10^{-6} 1.630×10^{-6} และ 1.755×10^{-6} เมตรต่อวินาที ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของภูมิภาคของสารละลายป้อนสามารถคำนวณหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการ (2.22) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของภูมิภาคของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นในที่สุดคือมีค่า 8.650×10^{-7} 1.100×10^{-6} 1.149×10^{-6} 1.228×10^{-6} และ 1.324×10^{-6} เมตรต่อวินาที สำหรับผลที่ได้จากการทดลองส่วนผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าดังนี้ 8.715×10^{-7} 1.053×10^{-6} 1.173×10^{-6} 1.263×10^{-6} และ 1.337×10^{-6} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากวิธีทั้งสองมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันและมีค่าใกล้เคียงกัน

$$\left(\frac{k_f d_e}{D_{aq}}\right) = 1.62 \left(\frac{d_e^2 \langle v \rangle}{LD_{aq}}\right)^{0.33} \quad (2.22)$$

4.2.2 ผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสไตริปที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มีการศึกษาผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสไตริปที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายสไตริปเป็น 100 300 500 800 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่น ๆ มีค่าคงที่ดังที่กำหนดในการทดลอง โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสไตริปกับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่น ๆ คงที่ดังนี้ $[Co^{2+}]_f = 1,000$ ppm, $[D2EHPA] = 20$ (%v/v), $pH_f = 5$, $pH_s = 1$, $Q_f = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้ง

จากรูปที่ 4.6 จากการศึกษาผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสไตริปที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายสไตริปเป็น 100 300 500 800 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ค่าการซึมผ่านมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยแนวโน้มของผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองจะมีความคล้ายคลึงกันและค่าการซึมผ่านที่ได้จากวิธีการทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันดังที่แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตรีป

Q_s (ml/min)	v_s (m/s)	k_s (m/s)	P_{exp} (m/s)	P_{the} (m/s)
100	0.00070	5.621×10^{-6}	8.650×10^{-7}	8.714×10^{-7}
300	0.00209	8.077×10^{-6}	9.281×10^{-7}	9.145×10^{-7}
500	0.00348	9.560×10^{-6}	9.445×10^{-7}	9.309×10^{-7}
800	0.00556	1.116×10^{-5}	9.647×10^{-7}	9.441×10^{-7}
1,000	0.00695	1.202×10^{-5}	9.823×10^{-7}	9.498×10^{-7}

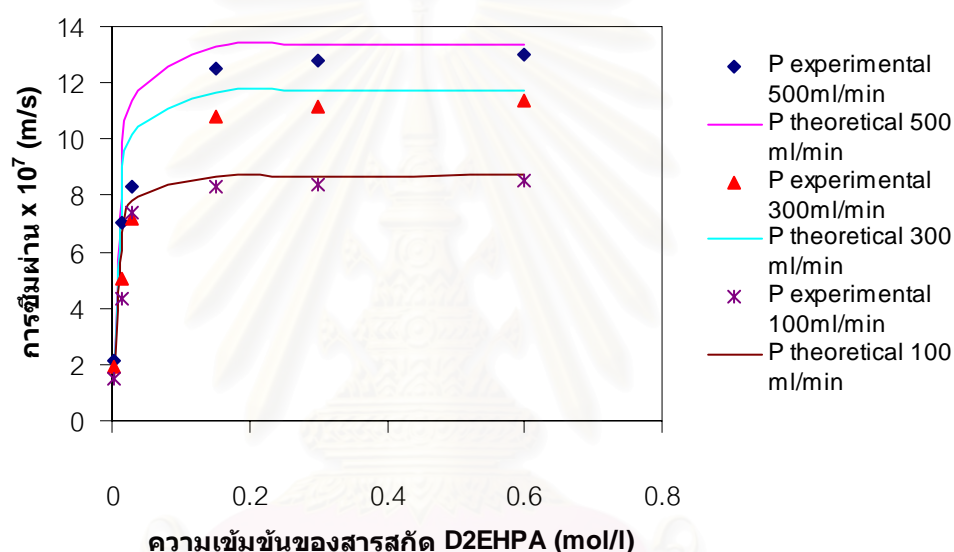
จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารละลายสตรีปเป็น 100 300 500 800 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสตรีปมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.00070 0.00209 0.00348 0.00556 และ 0.00695 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสตรีปที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายสตรีปเพิ่มขึ้นด้วยโดยมีค่า 5.621×10^{-6} 8.077×10^{-6} 9.560×10^{-6} 1.116×10^{-5} และ 1.202×10^{-5} เมตรต่อวินาที ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายสตรีปสามารถคำนวณหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการ (2.21)

$$\left(\frac{k_s d_e}{D_{aq}}\right) = 4.57 \left(\frac{d_e^2 \langle v \rangle}{LD_{aq}}\right)^{0.33} \quad (2.21)$$

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายสตรีปเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าการซึมผ่านเพิ่มขึ้นในที่สุดคือมีค่า 8.650×10^{-7} 9.281×10^{-7} 9.445×10^{-7} 9.647×10^{-7} และ 9.823×10^{-7} เมตรต่อวินาที สำหรับผลที่ได้จากการทดลอง ส่วนผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าดังนี้ 8.714×10^{-7} 9.145×10^{-7} 9.309×10^{-7} 9.441×10^{-7} และ 9.498×10^{-7} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากวิธีทั้งสองมีความสอดคล้องกันและมีค่าใกล้เคียงกัน

4.2.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์

จากการศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดเป็น 0.1 0.5 1 5 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และปรับอัตราการไหลของสารละลายป้อนให้มีค่า 100 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ มีค่าคงที่ โดยมีการเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ (4.7)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นๆ ดังนี้ $[Co^{2+}]_f = 1,000$ ppm, $pH_f = 5$, $pH_s = 1$, $Q_f = 100$ 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที, $Q_s = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว

จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจาก 0.1 จนถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แนวโน้มของค่าการซึมผ่านจะสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์จะเริ่มคงที่ ซึ่งผลจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกันกับผลที่ได้จากการทดลองและค่าการซึมผ่านที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจาก 0.1 จนถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แนวโน้มของค่าการซึมผ่านจะสูงขึ้น เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มความ

เข้มข้นของสารสกัด (\overline{RH}) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้นตามทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ ซึ่งไอออน โคบอลต์จะเกิดการสกัดและการนำกลับมากขึ้นทำให้เกิดการซึมผ่านมากขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA สูงกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์จะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น (Luccio et al., 2000) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) ของสารเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออน โลหะที่ละลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้มีย่าน้อยลงทำให้การแพร่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวช้าลงทำให้ค่าการซึมผ่านมีค่าคงที่ ดังแสดงในตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที

[D2EHPA] (% v/v)	Viscosity (kg/(s.m))	Diffusion Coefficient in organic phase (m^2/s)	$P_{\text{experimental}}$ (m/s)	$P_{\text{theoretical}}$ (m/s)
0.1	0.0235	3.574×10^{-12}	1.519×10^{-7}	1.435×10^{-7}
0.5	0.0237	3.544×10^{-12}	4.321×10^{-7}	6.008×10^{-7}
1.0	0.0246	3.414×10^{-12}	7.404×10^{-7}	7.805×10^{-7}
5.0	0.0253	3.320×10^{-12}	8.299×10^{-7}	8.676×10^{-7}
10.0	0.0337	2.116×10^{-12}	8.395×10^{-7}	8.702×10^{-7}
20.0	0.0415	2.024×10^{-12}	8.516×10^{-7}	8.714×10^{-7}

จากตาราง 4.3 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ให้มีค่า 0.1 0.5 1.0 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเป็น 0.0235 0.0237 0.0246 และ 0.0253 kg/(s.m) ตามลำดับความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ของสารเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออน โลหะมีค่าลดลงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 3.0×10^{-12} ตารางเมตรต่อวินาที แต่ในช่วงนี้ค่าการซึมผ่านกลับมีค่า 1.519×10^{-7} 4.321×10^{-7} 7.404×10^{-7} และ 8.299×10^{-7} เมตรต่อวินาที สำหรับค่าที่ได้จากการทดลองส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่า 1.435×10^{-7} 6.008×10^{-7} 7.805×10^{-7} และ 8.676×10^{-7} เมตรต่อวินาที ซึ่งเห็นได้ว่าค่าการซึมผ่านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์

แต่ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากคือมีค่า 0.0337 0.0415 kg/(s.m) ตามลำดับ

ความหนืดที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ของสารเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อสารเชิงซ้อนแพร่ได้ช้าลงจึงมีสารเชิงซ้อนบางส่วนที่ยังเกาะอยู่ที่ผิวสัมผัสทำให้ไอออนโคบอลต์ทำปฏิกิริยากับไม่ได้ ทำให้ไอออนโคบอลต์ที่ถูกทำปฏิกิริยามีจำนวนเท่าเดิมสารสกัดที่ตรงจุดนี้ถึงแม้จะเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ทำให้ค่าการซึมผ่านมีค่าคงที่ โดยค่าการซึมผ่านที่ได้จากผลการทดลองในช่วงความเข้มข้นของสารสกัด 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรมีค่า 8.395×10^{-7} และ 8.516×10^{-7} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ส่วนค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่า 8.702×10^{-7} และ 8.714×10^{-7} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการซึมผ่านทั้งหมดที่ได้จากวิธีทั้งสองมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันและมีค่าใกล้เคียงกัน

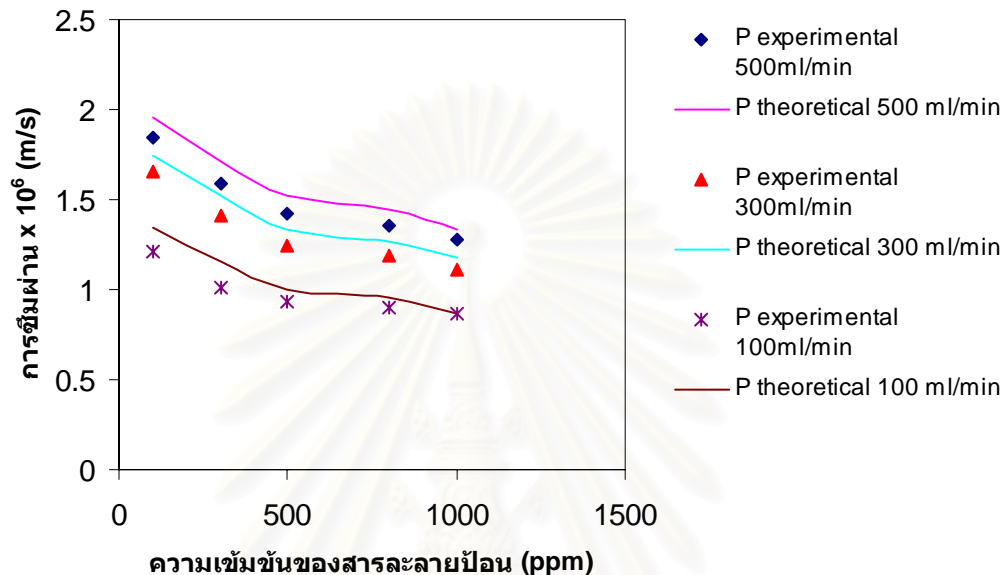
จากรูป (4.7) พบว่าค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 500 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีค่ามากกว่าที่อัตราการไหล 300 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ใดๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อนส่งผลให้ค่าความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการ(4.4) และ (4.5) ในข้างต้น ซึ่งส่งผลให้ค่าการซึมผ่านมากขึ้นในที่สุด

4.2.4 ผลของความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์

จากการศึกษาผลของเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น 100 300 500 800 และ 1000 ส่วนในล้านส่วน และปรับอัตราการไหลของสารละลายป้อนให้มีค่า 100 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ มีค่าคงที่ โดยมีการเปรียบเทียบที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ (4.8)

จากรูปที่ (4.8) จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์เป็น 100 300 500 800 และ 1000 ส่วนในล้านส่วน ค่าการซึมผ่านของ

ไอออนโคบอลต์จะมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มของค่าการซึมผ่านจะเป็นไปในแบบเดียวกันที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนทั้ง 100 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองและค่าการซึมผ่านที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนกับการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์โดยมีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้ค่าตัวแปรอื่นๆที่ดังนี้ $[D2EHPA] = 20$ (%v/v), $pH_f = 5$, $pH_s = 1$, $Q_f = 100$ 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที, $Q_s = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว

จากตาราง 4.4 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อนเป็น 100 300 500 800 และ 1000 ส่วนในล้านส่วน ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนโคบอลต์ในสารละลายของน้ำลดลงคือมีค่า 1.072×10^{-10} 8.006×10^{-11} 7.621×10^{-11} 6.902×10^{-11} และ 5.917×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที มีผลกระทบทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาคของสารละลายป้อนลดลงด้วยโดยมีค่า 1.764×10^{-6} 1.451×10^{-6} 1.222×10^{-6} 1.144×10^{-6} และ 1.032×10^{-6} เมตรต่อวินาที จึงส่งผลให้ค่าการซึมผ่านลดลงในที่สุดคือมีค่า 1.210×10^{-6} 9.624×10^{-7} 9.292×10^{-7} 9.029×10^{-7} และ 8.687×10^{-7} เมตรต่อวินาที สำหรับผลที่ได้จากการทดลอง ส่วนผลที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าดังนี้ 1.342×10^{-6} 1.153×10^{-6} 1.003×10^{-6} 9.502×10^{-7} และ 8.715×10^{-7} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สำหรับที่อัตราไหลของสารละลายป้อน 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าการ

ซึมผ่านจะมีแนวโน้มเหมือนกันกับที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที คือมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น โดยค่าที่ได้จากผลการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.4 ค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที

[Co ²⁺] (ppm)	Diffusion Coefficient (m ² /s)	k_f (m/s)	P _{experimental} (m/s)	P _{theoretical} (m/s)
100	1.072 x 10 ⁻¹⁰	1.764 x 10 ⁻⁶	1.210 x 10 ⁻⁶	1.342 x 10 ⁻⁶
300	8.006 x 10 ⁻¹¹	1.451 x 10 ⁻⁶	9.624 x 10 ⁻⁷	1.153 x 10 ⁻⁶
500	7.621 x 10 ⁻¹¹	1.222 x 10 ⁻⁶	9.292 x 10 ⁻⁷	1.003 x 10 ⁻⁶
800	6.902 x 10 ⁻¹¹	1.144 x 10 ⁻⁶	9.029 x 10 ⁻⁷	9.502 x 10 ⁻⁷
1,000	5.917 x 10 ⁻¹¹	1.032 x 10 ⁻⁶	8.687 x 10 ⁻⁷	8.715 x 10 ⁻⁷

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง วิจารณ์ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ได้ศึกษาค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์ที่ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยมีปัจจัยที่จะศึกษาได้แก่ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายสตรีป ความเข้มข้นของไอออน โคบอลต์ในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัด โดยได้ทำการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ คือ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนเป็น 100 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารละลายสตรีปเป็น 100 300 500 800 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์เป็น 100 300 500 800 และ 1000 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 0.1 0.5 1.0 5.0 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน โดยกำหนดปัจจัยอื่นให้คงที่ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนประมาณ 5 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เป็นสารละลายสตรีปมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว โดยมีการเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์ที่ได้จากผลการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เมื่อทำการปรับอัตราการไหลของสารละลายป้อนให้มีค่า 100 200 300 400 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อกำหนดให้สภาวะทดลองอื่นๆ มีค่าคงที่ พบว่าค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนสูงขึ้น ที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีค่าการซึมผ่านสูงสุด ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2. เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของสารละลายสตรีปให้เป็น 100 300 500 800 และ 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที โดยกำหนดให้ค่าปัจจัยอื่นๆ ค่าคงที่ สามารถสรุปได้ในทำนองเดียวกันกับการทดลองปรับอัตราการไหลของสารละลายป้อน กล่าวคือเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายสตรีปทำให้ค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์มากขึ้น ที่อัตราการไหลของสารละลายสตรีป 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีค่าการซึมผ่านสูงสุด โดยค่าการซึมผ่านที่ได้จากทั้งสองวิธีจะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกันและมีค่าใกล้เคียงกัน

3. จากการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 0.1 0.5 1.0 5.0 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรละลายในตัวทำละลายโครซีน เมื่อค่าตัวแปรอื่นๆ มีค่าคงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจาก 0.1 จนถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แนวโน้มของการซึมผ่านจะสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์จะเริ่มคงที่ ที่ความเข้มข้นของสารสกัด 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าการซึมผ่านจะมีค่าสูงสุดโดยจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในสภาวะการทดลองนี้คือที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งผลจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกันกับผลที่ได้จากการทดลองและค่าการซึมผ่านที่ได้จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน
4. ผลของการทดลองของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์เป็น 100 300 500 800 และ 1000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อกำหนดให้สภาวะทดลองอื่นๆ มีค่าคงที่ พบว่าค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์จะมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้น โดยค่าการซึมผ่านของไอออน โคบอลต์จะมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน 100 ส่วนในล้านส่วน โดยผลที่ได้จากทั้งสองวิธี จะมีความสอดคล้องกันและมีค่าใกล้เคียงกัน
5. จากการศึกษาค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ที่ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเมื่อกำหนดให้สารละลายโคบอลต์เป็นสารละลายป้อน สารสกัดคือ D2EHPA ละลายในตัวทำละลายโครซีน นี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนประมาณ 5 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เป็นสารละลายสตรีปมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 และรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว สภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราการไหลของสารละลายป้อน 500 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารละลายสตรีป 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของสารสกัด 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน 100 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งพบว่าผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้ทำนายค่าการซึมผ่านของของไอออนโคบอลต์ที่ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

จุดเด่นของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนโคบอลต์ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยได้ทำการศึกษาค่าการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ผ่านเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งค่าการซึมผ่านที่ศึกษาเป็นค่าส่วนกลับของค่าความต้านทานรวมในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวนั่นเอง ในการศึกษาได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการอธิบายกลไกในการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นด้วย โดยได้ทำการเปรียบเทียบค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทำการทดลองกับค่าการซึมผ่านที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนโคบอลต์โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ แต่มีน้อยมากที่ศึกษาโดยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง แต่ไม่มีใครศึกษาถึงกลไกในการถ่ายเทมวลของไอออนโคบอลต์ผ่านเยื่อแผ่นเหลว และยังไม่มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำนายกลไกในการถ่ายเทมวลของไอออนโคบอลต์ได้อย่างถูกต้อง

จากงานวิจัยที่ศึกษาค่าความต้านทานในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลองนี้พบว่าค่าความต้านทานในส่วนของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานในส่วนของชั้นฟิล์มสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากความหนาของเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าความหนาของเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากงานวิจัยต่างๆ

งานวิจัย	ความหนาของเยื่อแผ่นเหลว (m)
งานวิจัยนี้	2.68×10^{-5}
Breembroek et al.	8.11×10^{-5}
Dole et al.	12.5×10^{-5}
Kubota	6.13×10^{-4}
Rathore et al.	20.0×10^{-5}
Sastre et al.	5.0×10^{-5}
Wang et al.	7.29×10^{-5}

เนื่องจากความหนาของเยื่อแผ่นเหลวที่บางมากทำให้การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเกิดขึ้นได้เร็วส่งผลให้ค่าความต้านทานในส่วนของเยื่อแผ่นเหลวนี้น้อย และเมื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้นฟิล์มต่างๆ ดังตารางที่ 5.2 พบว่าความหนาของเยื่อแผ่นเหลวนี้น้อยกว่าความหนาของชั้นฟิล์มในสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป ทำให้ค่าความต้านทานในส่วนของเยื่อแผ่นเหลวนี้น้อยที่สุด

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบความหนาของชั้นฟิล์มต่าง ๆ ที่ได้จากงานวิจัยนี้

ชนิดชั้นฟิล์ม ต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้	ความหนาของชั้นฟิล์ม (m)
เยื่อแผ่นเหลว	2.68×10^{-5}
สารละลายป้อน	$3.37 \times 10^{-4} \sim 5.734 \times 10^{-4}$
สารละลายสตรีป	$5.33 \times 10^{-4} \sim 9.07 \times 10^{-4}$

โดยความหนาของเยื่อแผ่นเหลวได้มาจากค่าลักษณะต่างๆ ที่ระบุมาที่ตัวรองรับของเยื่อแผ่นเหลว ส่วนค่าความหนาของชั้นฟิล์มของสารละลายทั้งสองได้มาจากการคำนวณ โดยใช้สมการ (4.4)

$$k_{aq} = \frac{D_{aq}}{\delta_{aq}} \quad (4.4)$$

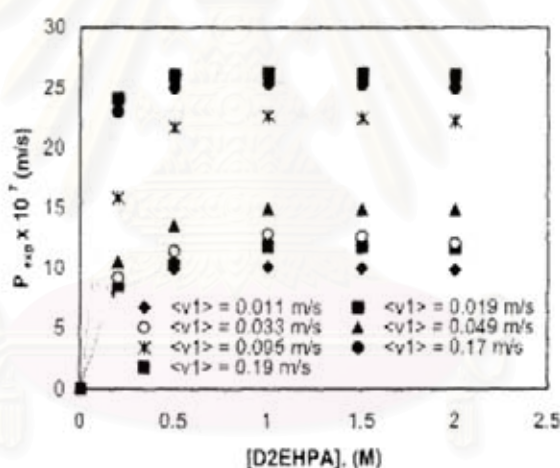
จากสภาวะอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปที่กำหนดในการทดลอง ทำให้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปค่อนข้างสูงเนื่องมาจากความเร็วเชิงเส้นที่เกิดขึ้นไม่สูงมาก แต่ถ้ากำหนดให้อัตราการไหลของสารละลายสูงขึ้นกว่านี้จะทำให้เกิดการสูญเสียเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากแรงดันที่เพิ่มมากขึ้นจะไปดันให้เยื่อแผ่นเหลวหลุดออกมาจากเส้นใยกลวง และนอกจากนี้ถ้าเพิ่มอัตราการไหลให้มากขึ้นอาจทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มน้อยลงแต่จะทำให้ไอออน โคบอลต์มีเวลาทำปฏิกิริยากับสารสกัดน้อยเกินไปจนทำให้ค่าการซึมผ่านลดลงได้ ดังนั้นค่าอัตราการไหลที่เลือกใช้เหมาะสมที่สุดกับการทดลองนี้แล้วซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานในส่วนของเยื่อแผ่นเหลวนี้น้อยที่สุด

5.2 วิจัยผลการทดลอง

5.2.1 การเปรียบเทียบผลของค่าการซึมผ่านที่ได้จากงานวิจัยนี้กับค่าการซึมผ่านที่ได้จากงานวิจัยอื่นที่ศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะโดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

5.2.1.1 งานวิจัยของ Marchese และ Camderros (Marchese and Camderros, 2004)

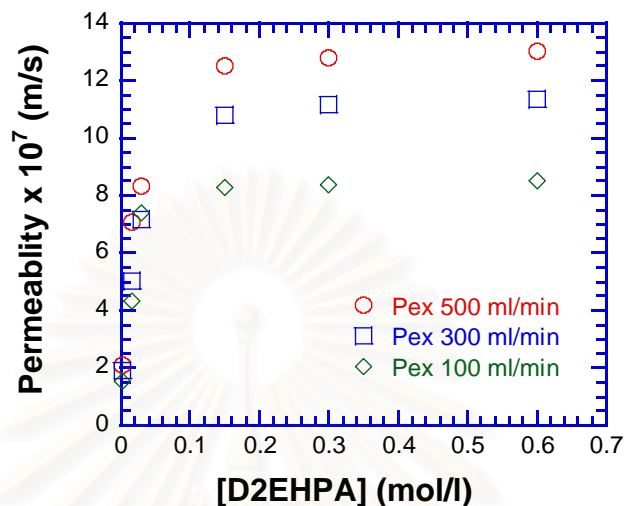
จากงานวิจัยของ Marchese และ Camderros ที่ได้ศึกษาการถ่ายเทมวลของแคดเมียมไอออน (Cd(II)) ผ่านกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัดเป็น D2EHPA ละลายในตัวทำละลายเอโรซิน พบว่าค่าการซึมผ่านที่ได้มีค่าดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของแคดเมียมไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน (Marchese and Camderros, 2004)

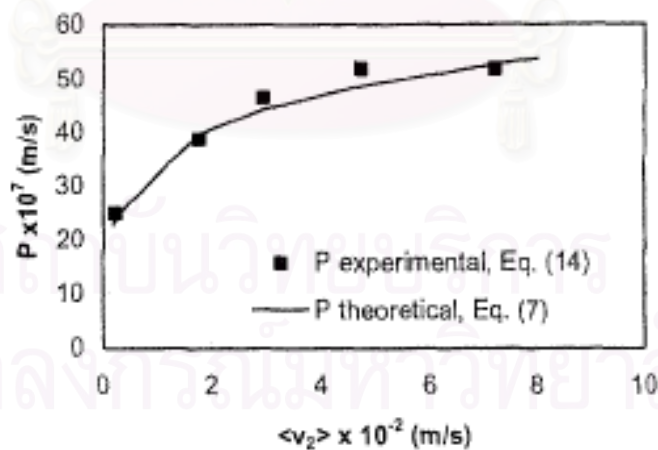
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5.2 โดยที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 300 และ 500 ml/min มีค่าความเร็วเชิงเส้น 0.00361 0.01083 และ 0.01805 m/s ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าการซึมผ่านของแคดเมียมไอออนของงานวิจัยของ Marchese และ Camderros มีค่าอยู่ในช่วง $5 - 30 \times 10^{-7}$ m/s จะมามีค่ามากกว่าค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $2 - 14 \times 10^{-7}$ m/s เหตุผลที่ค่าการซึมผ่านที่ได้จาก

งานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าก็เพราะค่าความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อนในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่า และสารสกัด D2EHPA ชอบที่จะทำปฏิกิริยากับแคดเมียมมากกว่าโคบอลต์ (Marchese et al., 1993)



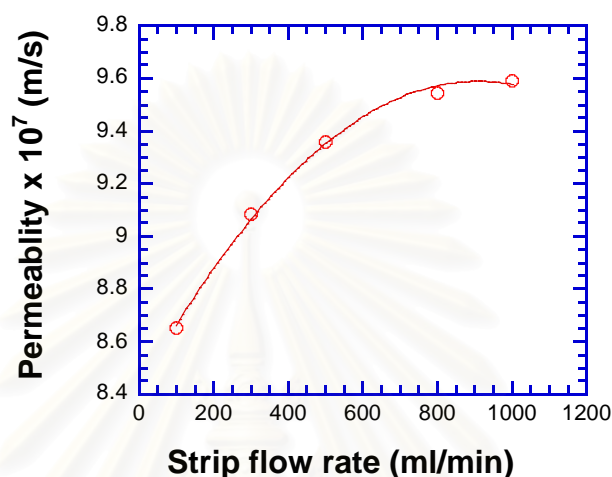
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของไอออนแคดเมียมกับอัตราการไหลของสารละลายสตริปของงานวิจัยของงานวิจัยของ Marchese และ Camderros แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของแคดเมียมไอออนกับความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสตริป (Marchese and Camderros, 2004)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนกับอัตราการไหลของสารละลายสไตริปแสดงดังรูปที่ 5.4 เมื่ออัตราการไหลของสารละลายสไตริปที่ 100 300 500 800 และ 1,000 ml/min มีค่าความเร็วเชิงเส้น 0.000695 0.002086 0.00348 0.00556 และ 0.00695 m/s ตามลำดับ

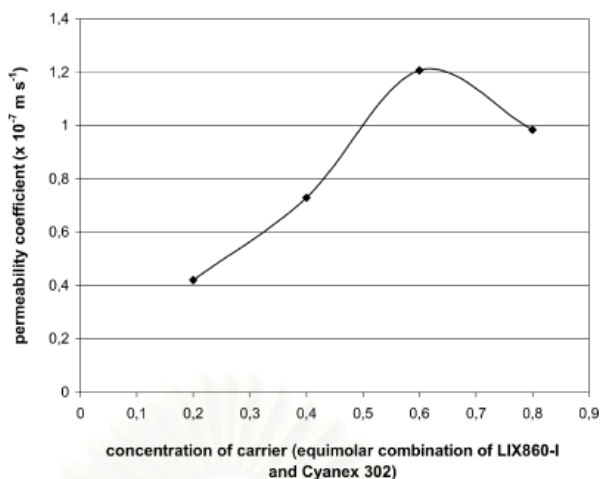


รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนที่กับอัตราการไหลของสารละลายสไตริป

จะเห็นได้ว่าค่าการซึมผ่านของแคดเมียมไอออนของงานวิจัยของ Marchese และ Camderros มีค่าอยู่ในช่วง $2 - 5 \times 10^{-6}$ m/s จะมีค่ามากกว่าค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $8 - 9 \times 10^{-7}$ m/s เหตุผลที่ค่าการซึมผ่านที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าก็เพราะค่าความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสไตริปในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Marchese และ Camderros

5.2.1.2 งานวิจัยของ Voorde และคณะ (Voorde et al., 2004)

จากงานวิจัยของ Voorde และคณะที่ได้ศึกษาการนำกลับของนิกเกิลไอออน (Ni(II)) โดยใช้กระบวนการเชื่อมแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัด LIX 860-I และ Cyanex 302 ผสมกัน และใช้สารละลายกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.5 mol/l เป็นสารละลายสไตริป ค่าการซึมผ่านที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.5



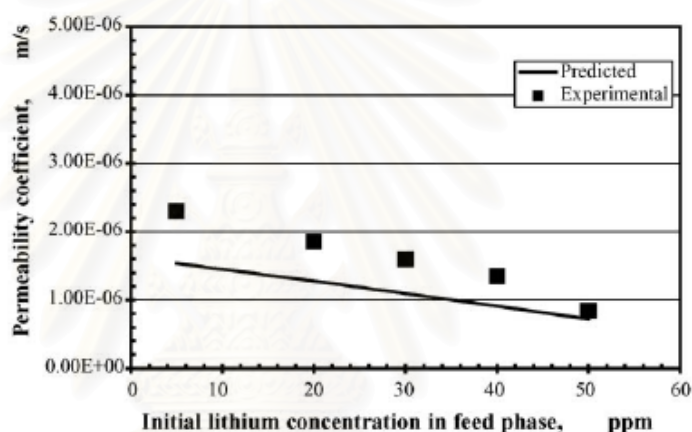
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของนิกเกิลไอออนกับค่าสัดส่วนของความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I และ Cyanex 302 (Voorde et al., 2004)

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5.2 โดยที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 300 และ 500 ml/min มีค่าความเร็วเชิงเส้น 0.00361 0.01083 และ 0.01805 m/s ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าการซึมผ่านของนิกเกิลไอออนของงานวิจัยของ Voorde และคณะ มีค่าอยู่ในช่วง $4 - 12 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ จะมีค่าน้อยกว่าค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $2 - 14 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ เหตุผลที่ค่าการซึมผ่านที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าก็เพราะในงานวิจัยของ Voorde และคณะ เลือกใช้สารสกัดที่นำมาทำปฏิกิริยากับนิกเกิลไอออนไม่เหมาะสม ทำให้มีนิกเกิลไอออนที่ทำปฏิกิริยากับสารสกัดน้อยค่าการซึมผ่านก็เลยมีค่าน้อยตามไปด้วย ควรจะเลือกใช้สารสกัด D2EHPA มากกว่าเพราะ D2EHPA จะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะทรานซิชันที่ประจุ $2+$ ได้ดี

5.2.2 การเปรียบเทียบผลของค่าการซึมผ่านที่ได้จากงานวิจัยนี้กับค่าการซึมผ่านที่ได้จากงานวิจัยอื่นที่ศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะโดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดอื่น

5.2.2.1 งานวิจัย Bansal และคณะ (Bansal et al. , 2005)

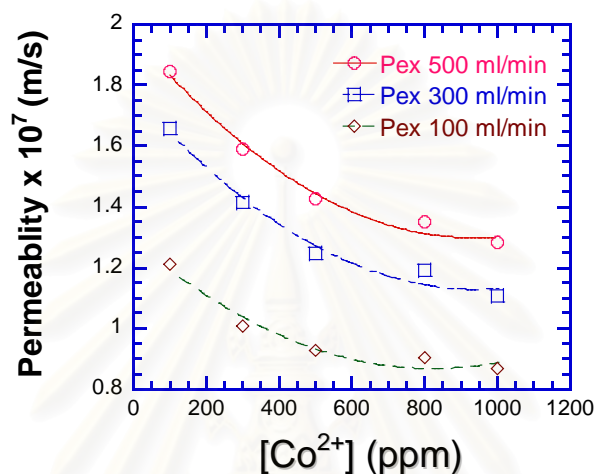
จากงานวิจัยของ Bansal และคณะที่ได้ศึกษาการนำกลับของลิเทียมไอออน (Li(I)) โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ตัวพองแบบแผ่นบาง โดยใช้สารสกัด LIX 54 และ TOPO ละลายในตัวละลายเคโรซีน และใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเป็นสารละลายสตริป ค่าการซึมผ่านที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของลิเทียมไอออนกับความเข้มข้นของลิเทียมไอออนในสารละลายป้อน (Bansal et al., 2005)

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5.7 โดยที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 300 และ 500 ml/min มีค่าความเร็วเชิงเส้น 0.00361 0.01083 และ 0.01805 m/s ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าการซึมผ่านของลิเทียมไอออนของงานวิจัยของ Bansal และคณะ มีค่าอยู่ในช่วง $1 - 2 \times 10^{-6}$ m/s จะมีความมากกว่าค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $1 - 2 \times 10^{-7}$ m/s ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนในงานวิจัย Bansal และคณะ มีค่าอยู่ในช่วง 10 - 50 ppm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนในงานวิจัยนี้ซึ่งมีค่า 100-1,000 ppm ที่เป็นเช่นนี้เพราะความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนยิ่งมากขึ้นส่งผลให้ค่าการซึมผ่านมีค่าลดลง (เมื่อความเข้มข้นความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า

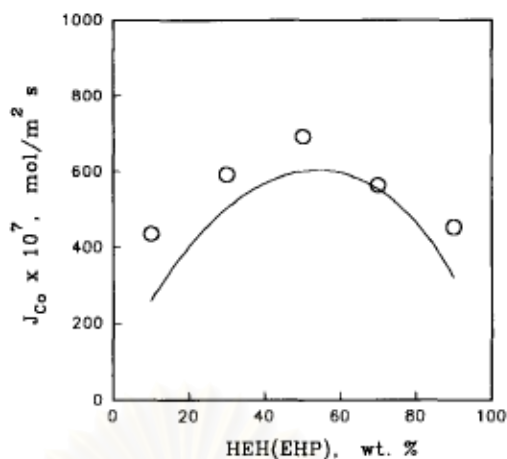
สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนโลหะในสารละลายของน้ำลดลงเนื่องมาจากจำนวนไอออนโลหะที่เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางกระบวนการแพร่ในภูมิภาคของสารละลายป้อน (Robinson and Stokes, 1970; Harned and Owen, 1958) เมื่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนโลหะในสารละลายลดลงทำให้ค่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของภูมิภาคของสารละลายป้อนลดลง เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของภูมิภาคของสารละลายป้อนลดลงส่งผลให้ค่าการซึมผ่านลดลงในที่สุด)



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านของโคบอลต์ไอออนที่กับความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน

5.2.2.2 งานวิจัยของ Youn และคณะ (Youn et al., 1995)

จากงานวิจัยของ Youn และคณะที่ได้ศึกษาการนำกลับของโคบอลต์ไอออน (Co(II)) โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ตัวพุงแบบแผ่นบาง โดยใช้สารสกัด diluting 2-ethylhexyl hydrogen 2-ethylhexyl phosphonate (HEH(EHP)) ละลายในตัวละลายเคโรซีน และใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเป็นสารละลายสตริป ค่าพลักซ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.8

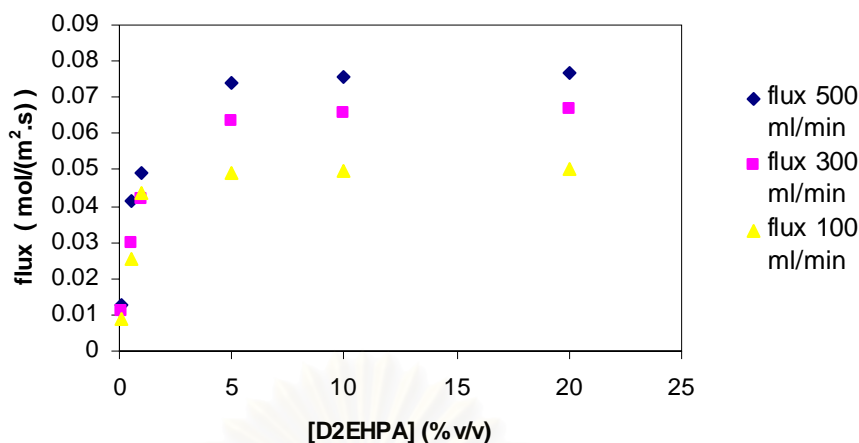


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด HEH(EHP) (Youn et al., 1995)

เนื่องจากผลที่ได้จากงานวิจัยของ Youn และคณะแสดงอยู่ในรูปของค่าของฟลักซ์ ดังนั้นจึงต้องแปลงค่าการซึมผ่านที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้อยู่ในรูปของค่าของฟลักซ์เช่นกัน โดยค่าฟลักซ์สัมพันธ์กับค่าการซึมผ่านดังนี้

$$N = P/[M^{n+}]_o$$

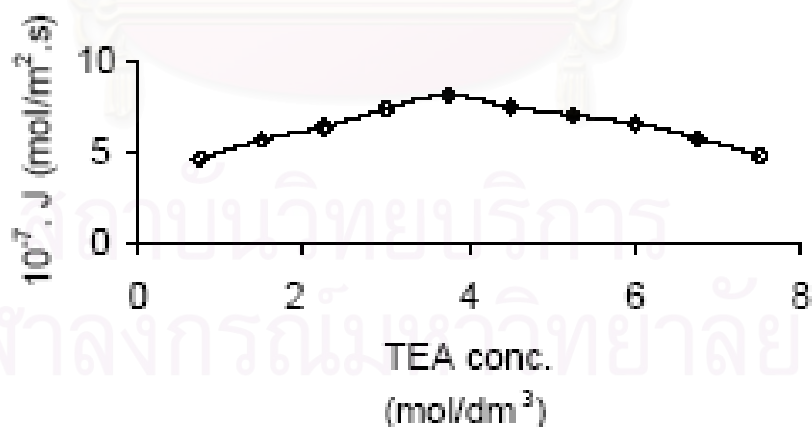
เมื่อ N คือ ฟลักซ์ของไอออนโลหะ, P คือ ค่าการซึมผ่านของไอออนโลหะ และ $[M^{n+}]_o$ คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้นในสารละลายป้อน ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5.9 โดยที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 300 และ 500 ml/min มีค่าความเร็วเชิงเส้น 0.00361 0.01083 และ 0.01805 m/s ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนของงานวิจัยของ Youn และคณะ มีค่าอยู่ในช่วง $4 - 7 \times 10^{-5} \text{ mol/(m}^2 \cdot \text{s)}$ จะมีย่านน้อยกว่าค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $1 - 8 \times 10^{-2} \text{ mol/(m}^2 \cdot \text{s)}$ เหตุผลที่ค่าฟลักซ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าก็เพราะในงานวิจัยของ Youn และคณะ เลือกใช้สารสกัดที่นำมาทำปฏิกิริยากับโคบอลต์ไอออนไม่เหมาะสม ทำให้มีโคบอลต์ไอออนที่ทำปฏิกิริยากับสารสกัดน้อยค่าฟลักซ์ก็เลยมีค่าน้อยตามไปด้วย ควรจะเลือกใช้สารสกัด D2EHPA มากกว่าเพราะ D2EHPA จะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะทรานซิชันที่ประจุ $2+$ ได้ดี (Marchese et al., 1993; Simonin et al., 2003; Alguacil and Alonso, 2004; Leon and Guzman, 2004)



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน

5.2.2.3 งานวิจัยของ Bukhari และคณะ (Bukhari et al., 2004)

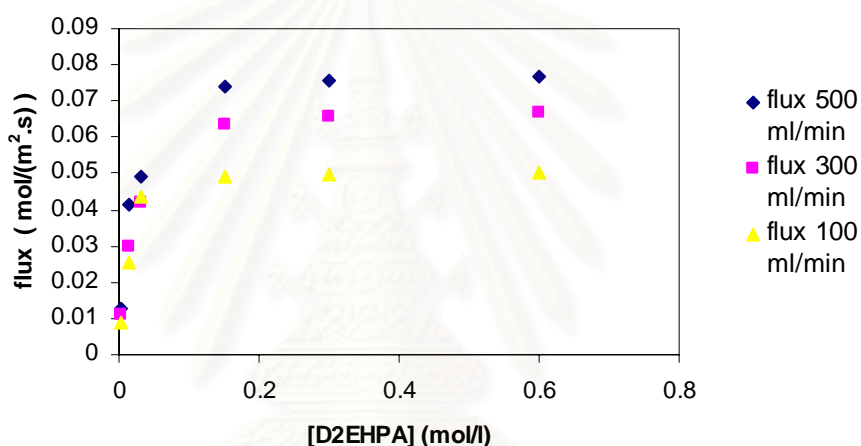
จากงานวิจัยของ Bukhari และคณะที่ได้ศึกษาการนำกลับของโคบอลต์ไอออน (Co(II)) โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ตัวพองแบบแผ่นบาง โดยใช้สารสกัด triethanolamine ละลายในตัวละลาย cyclohexanone และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายสตริป ค่าฟลักซ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด triethanolamine (Bukhari et al., 2004)

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5.11 โดยที่อัตรา

การไหลของสารละลายป้อน 100 300 และ 500 ml/min มีค่าความเร็วเชิงเส้น 0.00361 0.01083 และ 0.01805 m/s ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนของงานวิจัยของ Bukhari และคณะ มีค่าอยู่ในช่วง $5 - 8 \times 10^{-7} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ จะมีค่าน้อยกว่าค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $1 - 8 \times 10^{-2} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ เหตุผลที่ค่าฟลักซ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าก็เพราะในงานวิจัยของ Bukhari และคณะ เลือกใช้สารสกัดที่นำมาทำปฏิกิริยากับโคบอลต์ไอออนไม่เหมาะสม ควรจะเลือกใช้สารสกัด D2EHPA มากกว่าเพราะ D2EHPA จะทำปฏิกิริยากับโคบอลต์ไอออนได้ดี (Marchese et al., 1993; Simonin et al., 2003; Alguacil and Alonso, 2004; Leon and Guzman, 2004) และนอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพมากกว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นบาง ทำให้ค่าฟลักซ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยของ Bukhari



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของโคบอลต์ไอออนกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปที่มีต่อการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์ ค่าอัตราการไหลที่ใช้ในนั้นถูกจำกัดด้วยขีดจำกัดของอัตราการไหลที่สามารถใช้ได้กับปั๊มที่ถูกติดตั้งกับอุปกรณ์เส้นใยกลวงคือจะใช้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปได้ไม่เกินกว่า 1,000 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งเมื่อเทียบเป็นความเร็วเชิงเส้นแล้วจะมีค่าค่อนข้างต่ำดังนั้น จึงควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของอัตราการไหลต่อการซึมผ่านโดยศึกษาที่อัตราการไหลที่สูงกว่านี้

2. จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้นี้ได้โครซีนเป็นตัวทำลายสารสกัด D2EHPA น่าจะลองเปลี่ยนชนิดของตัวทำลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นชนิดอื่นๆ นอกจากนี้น่าจะทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารละลายสไตรีนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออน โคลบอลด์ แล้วดูว่าผลจากการคำนวณยังให้ค่าการซึมผ่านที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองหรือไม่
3. ในการทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสไตรีนที่มีต่อการซึมผ่านของไอออน โคลบอลด์ อัตราการไหลสูงสุดที่ใช้คือ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ถ้าทำการทดลองที่อัตราการไหลสูงกว่านี้จะทำให้เยื่อแผ่นเหลวหลุดออกมาจากเส้นใยกลวง จึงน่าจะศึกษาเกี่ยวกับ เสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวเพื่อที่จะสามารถทำการทดลองที่สภาวะอัตราการไหลสูงๆ ได้โดยที่ประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดและนำกลับยังเหมือนเดิม
4. จากผลการทดลองที่ได้ก็น่าจะไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม จึงต้องมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มขนาดของกระบวนการนำกลับและการสกัดเพื่อจะสามารถนำมาใช้กับสารละลายป้อนที่มีปริมาณมากๆ ที่มีการใช้อยู่ในอุตสาหกรรมจริงๆ ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ขวัญตา นัคราเรือง. 2546. การสกัดแยกและการนำกลับไอออนทองแดง โครเมียม และสังกะสี จากสารละลายผสมของไอออน โดยใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิ สิต สุไลมาน. 2544. การสกัดนิกเกิลด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกร รามกุล. 2544. การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดีเมียม โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนัส สติระจินดา. 2541. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีรวัฒน์ ปัตทวิคองคา. 2541. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติกกับโซเดียมอะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อิสรา เกษมเศรษฐ. 2541. การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายที่เจือจางมากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Robinson, R.A., and Stokes, R.H., 1970. Electrolyte Solutions. 2nd edition. :513-515.
- Harned, H.S., and Owen, B.B., 1958. The physical chemistry of electrolytic solutions. 3rd edition. : 243-245.
- Alguacil, F.J., and Alonso, M., 2004. Separation of zinc(II) from cobalt(II) solutions using supported liquid membrane with DP-8R (di(2-ethylhexyl)phosphoric acid) as a carrier. Separation and Purification Technology. 256:135-143.

- Alguacil, F.J., Coedo, A.G., Dorado, M.T., Padilla, I. Phosphine oxide mediate transport: modeling of thiophosphoric acid. Chemical Engineering Science. 56 : 3115-3122.
- Bansal, B., Chen, X.D., and H, Md. M., 2005. Transport of lithium through a supported liquid membrane of LIX54 and TOPO in kerosene. Chemical Engineering and Processing. 44: 1327-1336.
- Breembroek, G.R.M., Straalen, A. V., Witkamp, G.J., and Rosmalen, G.M., 1998. Extraction of cadmium and copper using hollow fiber supported liquid membranes. Journal of Membrane Science. 146: 185-195.
- Bukhari, N., Chaudry, M.A., and Mazhar, M., 2004. Cobalt(II) transport through triethanolamine-cyclohexanone supported liquid membranes. Journal of Membrane Science. 146: 185-195.
- Campderros, M.E., Acosta, A., and Marchese, J. 1998. Selective separation of copper with LIX 864 in a hollow fiber module. Talanta 47: 19-24.
- Danesi, P.R., Rickert, P.G., 1986. Some Observaton on the Performance of Hollow-Fiber Supported Liquid Membranes for Co-Ni Separations. Solvent Extraction and Ion Exchange. 4(1): 149-164.
- Dolezal, J., Moreno, C., Hrdlicka, A., and Valiente, M., 2000. Selective transport of lanthanides through supported liquid membranes cotaining non-selective extractant, di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid, as a carrier. Journal of Membrane Science. 168: 175-181.
- Gabelman, A., and Hwang, S-T., 1999. Hollow fiber membrane contractors. Journal of Membrane Science. 159: 61-106.
- Gu, Z.,1990. A new liquid membrane technology-electrostatic pseudo liquid membrane. Journal of Membrane Science. 52 : 77-88.
- Izatt, R.M., Lamb, J.D., and Bruening, R.L. 1988. Comparision of Bulk, Emulsion, Thin Sheet Supported , and Hollow Fiber Supported Liquid Membranes in Macrocycle-Mediated Cation Separations. Science and Technology. 23(12&13): 1645-1658.
- Komasawa, I., Otake, T., and Yamashita, T. 1983. Mechanism kinetics of copper Permeation through a supported liquid membrane containing a hydroxime as a mobile carrier. Industrial Engineering and Chemical Foundamental. 22: 127-131

- Kubota, F., Kakoi, T., Goto, Masahiro., Furusaki, S., Nakashio, F., and Hano, T., 2000. Permeation behavior of rare earth metals with a calyx[4]arene carboxyl derivative in a hollow-fiber membrane. Journal of Membrane Science. 165: 149-158.
- Leon, G., and Guzman, M.A., 2004. Facilitated transport of cobalt through bulk liquid Membranes containing diethylhexyl phosphoric acid. Desalination. 162: 211-215
- Leveque, X., Les lois de la transmission de chaleur par conduction, Ann. Mines 13 (1928) 201.
- Liacono, O., Drioli, E., and Molinari, R. 1986. Metal ion separation and concentration with supported liquid membranes. Journal of Membrane Science. 28: 123-138.
- Luccio, M.D., Smith, B.D., Kida, T., Borges, C.P., and Alves, T.L.M. 2000. Separation of fructose from a mixture of sugars using supported liquid membranes. Journal of Membrane Science. 174: 217-224.
- Marchese, J., Camderros, M.E., and Acosta, A., 1993. Mechanistic study of cobalt nickel and copper transfer across a supported liquid membrane. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 57: 37-42.
- Marchese, J., and Camderros, M.E., 2004. Mass transfer of cadmium ions in a hollow-fiber module by pertraction. Desalination. 164: 141-149.
- Marr, R., and Kopp, A. 1982. Liquid membrane technology-a survey of phenomena, mechanisms, and models. American Institute of Chemical Engineering, 44-60
- Nakano, Makoto, Takahashi, Katsuroku and Takeuchi, Hiroshi. 1987. A Method for Continuous Operation of Supported Liquid Membranes. Journal of Chemical Engineering of Japan. 20: 326-328
- O' Hara, P.A., and Bohrer, M.P. 1989. Supported Liquid Membrane for Copper Transport. Journal of Membrane Science. 44: 273-287.
- Rovira, M., and Sastre, A.M., 1998. Modelling of mass transfer in facilitated supported Liquid-membrane transport of palladium(II) using di-(2-ethylhexyl) thiophosphoric acid. Journal of Membrane Science. 139: 57-65.
- Sastre, A., Madi, A., Cortina, J.L., and Miralles, N., 1998. Modelling of mass transfer in facilitated supported liquid membrane transport of gold(III) using phospholene derivatives as carriers. . Journal of Membrane Science. 149: 241-250.
- Schulz, G. 1988. Separation techniques with supported liquid membranes. Desalination 68: 191-202.

- Shiau, Ching-Yeh, and Chen, Pai-Zoh. 1993. Theoretical Analysis of Copper-Ion Extraction through Hollow Fiber Supported Liquid Membranes. Separation Science and Technology. 34(8):1689-1701.
- Simonin, J.-P., Hendrawan, H., Dardoize, F. and Clodic, G. 2003. Study of salt effects on the kinetics of extraction of cobalt(II) and zinc(II) at trace level by D2EHPA in n-dodecane. Hydrometallurgy. 69: 23-38.
- Tanikaki, Ueda, M., and M., Shiode, T., Eguchi, W. 1988. Facilitated Transport of Zinc Chloride Through Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Part I. Transport Mechanisms. Separation Science and Technology 22(10&11): 1145-1159.
- Tavlarides, L.L., Bae, J.H., and Lee, C.K. 1987. Solvent Extraction, Membranes, and Ion Exchange in Hydrometallurgical Dilute Metals Separation. Separation Science and Technology 22(2&3): 581-617.
- Teramoto, M., Masuyama, H., Takaya, H., and Asano, S. 1987. Development of Spiral-Type Supported Liquid Membrane Module for Separation and Concentration Metal Ions. Separation Science and Technology 22(11): 2175-2201.
- Thamphiphit, N. 1996. Batch extraction of cobalt ions in hydrochloric acid solution with a hollow fiber supported liquid membrane in a single column. Master's Thesis. Department of Chemical Engineering, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Voorde, I. Van de., Pinoy, L., and Ketelaere, R.F., 2004. Recovery of nickel ions by supported liquid membrane (SLM) extraction. Journal of Membrane Science. 234 : 11-21.
- Wang, Y.J., Wang, Y., Chen, F., Luo, G.S., and Dai, Y.Y., 2003. Mass transfer characteristics of cadmium(II) extraction in hollow fiber modules. Chemical Engineering Science. 58: 3223-3231.
- Yang, Ming-Chien, and Cussler, E.L. 1986. Designing Hollow Fiber Contractor. AIChE Journal. 32(11): 1910-1916.
- Youn, I.J., Lee, Y., and Lee, W.H. 1995. Analysis of permeation rate of cobalt ions across a supported liquid membrane containing HEH(EHP). Journal of Membrane Science. 100 : 69-75.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลผลการศึกษাত্রาการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับ

Feed Flow rate (ml/min)	[Co ²⁺] (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
100	1003	488	0	510
200	1003	628	1	371
300	1003	710	1	288
400	1003	760	0	235
500	1003	798	0	200

สภาวะที่ทำการทดลอง : [Co²⁺]_f = 100 ppm, pH_f = 5, [D2EHPA] = 20 %v/v, pH_{HCl} = 1, และ Q_s = 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลผลการศึกษাত্রาการไหลของสารละลายสตริปต่อการสกัดและการนำกลับ

Strip Flow rate (ml/min)	[Co ²⁺] (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สตริปเข้า	สตริปออก
100	1003	485	1	515
300	1003	610	1	390
500	1003	740	1	260
800	1003	801	1	190
1,000	1003	862	1	135

สภาวะที่ทำการทดลอง : [Co²⁺]_f = 100 ppm, pH_f = 5, [D2EHPA] = 20 %v/v, pH_{HCl} = 1, และ Q_r = 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลผลการศึกษาคความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดและการนำกลับที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที

[D2EHPA] % v/v	[Co ²⁺] (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	ศตริปเข้า	ศตริปออก
0.1	1002	882	0	115
0.5	1002	697	0	300
1.0	1002	538	0	460
5.0	1002	499	1	490
10.0	1002	495	2	495
20.0	1002	490	2	507

สภาวะที่ทำการทดลอง : [Co²⁺]_f = 100 ppm, pH_f = 5, pH_{HCl} = 1, และ Q_f = Q_s = 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลผลการศึกษาคความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดและการนำกลับที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 300 มิลลิลิตรต่อนาที

[D2EHPA] % v/v	[Co ²⁺] (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	ศตริปเข้า	ศตริปออก
0.1	1002	950	1	55
0.5	1002	870	2	128
1.0	1002	820	0	180
5.0	1002	741	0	260
10.0	1002	733	0	262
20.0	1002	729	1	260

สภาวะที่ทำการทดลอง : [Co²⁺]_f = 100 ppm, pH_f = 5, pH_{HCl} = 1, Q_f = 300 มิลลิลิตร, Q_s = 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดและการนำกลับที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 500 มิลลิลิตรต่อนาที

[D2EHPA] % v/v	[Co ²⁺] (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	ศตริปเข้า	ศตริปออก
0.1	1002	967	2	30
0.5	1002	890	2	102
1.0	1002	871	2	124
5.0	1002	812	2	175
10.0	1002	808	2	180
20.0	1002	805	1	185

สภาวะที่ทำการทดลอง : [Co²⁺]_f = 100 ppm, pH_f = 5, pH_{HCl} = 1, Q_f = 100 มิลลิลิตร, Q_s = 500 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที

[Co ²⁺] _f (ppm)	[Co ²⁺] (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	ศตริปเข้า	ศตริปออก
100	103	38	2	55
300	303	130	1	170
500	502	230	1	265
800	807	378	2	423
1,000	1002	483	2	513

สภาวะที่ทำการทดลอง : pH_f = 5, [D2EHPA] = 20 %v/v, pH_{HCl} = 1, และ Q_f = Q_s = 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 300 มิลลิลิตรต่อนาที

[Co ²⁺] _f (ppm)	[Co ²⁺] (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สกัดป้อนเข้า	สกัดป้อนออก
100	105	66	0	32
300	303	204	1	94
500	502	354	1	145
800	807	578	0	210
1,000	1002	735	2	261

สภาวะที่ทำการทดลอง : pH_f = 5, [D2EHPA] = 20 %v/v, pH_{HCl} = 1, และ Q_f = Q_s = 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 500 มิลลิลิตรต่อนาที

[Co ²⁺] _f (ppm)	[Co ²⁺] (ppm)			
	ป้อนเข้า	ป้อนออก	สกัดป้อนเข้า	สกัดป้อนออก
100	105	77	0	23
300	303	232	1	66
500	502	395	1	101
800	807	643	0	157
1,000	1002	808	2	188

สภาวะที่ทำการทดลอง : pH_f = 5, [D2EHPA] = 20 %v/v, pH_{HCl} = 1, และ Q_f = Q_s = 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลผลการศึกษาค่าการไหลของสารละลายป้อนต่อการซึมผ่าน

Feed Flow rate (ml/min)	การซึมผ่าน (m/s)	
	$P_{\text{experimental}}$	$P_{\text{theoretical}}$
100	8.650×10^{-7}	8.715×10^{-7}
200	1.100×10^{-6}	1.053×10^{-6}
300	1.149×10^{-6}	1.173×10^{-6}
400	1.228×10^{-6}	1.263×10^{-6}
500	1.324×10^{-6}	1.337×10^{-6}

สภาวะที่ทำการทดลอง : $[\text{Co}^{2+}]_f = 100$ ppm, $\text{pH}_f = 5$, $[\text{D2EHPA}] = 20$ %v/v, $\text{pH}_{\text{HCl}} = 1$, และ $Q_f = 100$ มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลผลการศึกษาค่าการไหลของสารละลายสตริปต่อการซึมผ่าน

Strip Flow rate (ml/min)	การซึมผ่าน (m/s)	
	$P_{\text{experimental}}$	$P_{\text{theoretical}}$
100	8.650×10^{-7}	8.714×10^{-7}
300	9.281×10^{-7}	9.145×10^{-7}
500	9.823×10^{-7}	9.498×10^{-7}
800	9.498×10^{-7}	9.441×10^{-7}
1,000	9.445×10^{-7}	9.309×10^{-7}

สภาวะที่ทำการทดลอง : $[\text{Co}^{2+}]_f = 100$ ppm, $\text{pH}_f = 5$, $[\text{D2EHPA}] = 20$ %v/v, $\text{pH}_{\text{HCl}} = 1$, และ $Q_f = 100$ มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการซึมผ่าน

[D2EHPA] % v/v	การซึมผ่าน (m/s)					
	Feed Flow rate 100ml/min		Feed Flow rate 300ml/min		Feed Flow rate 500ml/min	
	$P_{experimental}$	$P_{theoretical}$	$P_{experimental}$	$P_{theoretical}$	$P_{experimental}$	$P_{theoretical}$
0.1	1.519×10^{-7}	1.435×10^{-7}	1.903×10^{-7}	1.498×10^{-7}	2.116×10^{-7}	1.522×10^{-7}
0.5	4.321×10^{-7}	6.008×10^{-7}	5.045×10^{-7}	7.300×10^{-7}	7.055×10^{-7}	7.904×10^{-7}
1.0	7.404×10^{-7}	7.805×10^{-7}	7.159×10^{-7}	1.014×10^{-6}	8.400×10^{-7}	1.134×10^{-6}
5.0	8.516×10^{-7}	8.714×10^{-7}	1.078×10^{-6}	1.166×10^{-6}	1.252×10^{-6}	1.328×10^{-6}
10.0	8.395×10^{-7}	8.702×10^{-7}	1.116×10^{-6}	1.170×10^{-6}	1.281×10^{-6}	1.333×10^{-6}
20.0	8.299×10^{-7}	8.676×10^{-7}	1.136×10^{-6}	1.172×10^{-6}	1.303×10^{-6}	1.336×10^{-6}

สภาวะที่ทำการทดลอง : $[Co^{2+}]_f = 100$ ppm, $pH_f = 5$, $pH_{HCl} = 1$, $Q_s = 100$ มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่อการซึมผ่าน

[Co ²⁺] _f (ppm)	การซึมผ่าน (m/s)					
	Feed Flow rate 100ml/min		Feed Flow rate 300ml/min		Feed Flow rate 500ml/min	
	$P_{experimental}$	$P_{theoretical}$	$P_{experimental}$	$P_{theoretical}$	$P_{experimental}$	$P_{theoretical}$
100	1.210×10^{-6}	1.342×10^{-7}	1.658×10^{-6}	1.746×10^{-6}	1.846×10^{-6}	1.955×10^{-6}
300	9.624×10^{-7}	1.153×10^{-7}	1.413×10^{-6}	1.520×10^{-6}	1.589×10^{-6}	1.714×10^{-6}
500	9.292×10^{-7}	1.003×10^{-7}	1.248×10^{-6}	1.338×10^{-6}	1.427×10^{-6}	1.517×10^{-6}
800	8.687×10^{-7}	8.715×10^{-7}	1.192×10^{-6}	1.271×10^{-6}	1.352×10^{-6}	1.444×10^{-6}
1,000	9.029×10^{-7}	9.502×10^{-7}	1.107×10^{-6}	1.173×10^{-6}	1.281×10^{-6}	1.337×10^{-6}

สภาวะที่ทำการทดลอง : $pH_f = 5$, [D2EHPA] = 20 %v/v, $pH_{HCl} = 1$, และ $Q_s = 100$ มิลลิลิตร

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อน

อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ml/min)	ความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อน (m/s)
100	0.00361
200	0.00722
300	0.01083
400	0.01444
500	0.01805

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสคริป

อัตราการไหลของสารละลายสคริป (ml/min)	ความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสคริป (m/s)
100	0.000695
300	0.002086
500	0.003476
800	0.005562
1,000	0.006952

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่างๆ

[D2EHPA] (% v/v)	Viscosity (kg/(s.m))	Organic Phase Diffusivity (m ² /s)	Effective Organic Phase Diffusivity (m ² /s)
0.1	0.0235	3.098 x 10 ⁻¹¹	3.574 x 10 ⁻¹²
0.5	0.0237	3.071 x 10 ⁻¹¹	3.544 x 10 ⁻¹¹
1.0	0.0246	2.959 x 10 ⁻¹¹	3.414 x 10 ⁻¹¹
5.0	0.0253	2.877 x 10 ⁻¹¹	3.320 x 10 ⁻¹¹
10.0	0.0337	1.833 x 10 ⁻¹¹	2.116 x 10 ⁻¹¹
20.0	0.0415	1.754 x 10 ⁻¹¹	2.024 x 10 ⁻¹¹

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายป้อนที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อนต่างๆ

[Co ²⁺] _f (ppm)	Aqueous Phase Diffusivity (m ² /s)
100	1.072 x 10 ⁻¹⁰
300	8.055 x 10 ⁻¹¹
500	7.621 x 10 ⁻¹¹
800	6.902 x 10 ⁻¹¹
1,000	5.917 x 10 ⁻¹¹

ภาคผนวก ข

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา

ค่าการซึมผ่าน (P) (Marchese and Campderros, 2004)

$$P = \left[\left(\frac{R_o}{K_{eq} C_{HX}^{o2} [H^+]_f^{-2}} \right) + R_f + R_s \right]^{-1} \quad (\text{ข.1})$$

ค่าความต้านทานในวัฏภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (R_o)

$$R_o = l_{ef} / D'_{org} \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ

R_o คือ ความต้านทานในวัฏภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

l_{ef} คือ ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเชิงประสิทธิผล

D'_{org} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงประสิทธิผลในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

กำหนดให้

$$P = [B + R_f + R_s]^{-1} \quad (\text{ข.3})$$

การคำนวณหาค่า B

$$B = \left[\frac{l_{ef}}{D'_{org} K_{eq} C_{HX}^{o2} [H^+]_f^{-2}} \right] \quad (\text{ข.4})$$

เมื่อ

l_{ef} คือ ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเชิงประสิทธิผล

D'_{org} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงประสิทธิผลในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

K_{eq} คือ ค่าคงที่สมดุล

C_{HX}^o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA

$[H^+]_f$ คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายป้อน

ค่าความต้านทานในวิภูภาคของสารละลายป้อน (R_f)

$$R_f = 1/k_f \quad (\text{ข.5})$$

เมื่อ

R_f คือ ความต้านทานในวิภูภาคของสารละลายป้อน

k_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวิภูภาคของสารละลายป้อน

ค่าความต้านทานในวิภูภาคของสารละลายสตรีป (R_s)

$$R_s = 1/k_s \quad (\text{ข.6})$$

เมื่อ

R_s คือ ความต้านทานในวิภูภาคของสารละลายสตรีป

k_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวิภูภาคของสารละลายสตรีป

ค่าความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเชิงประสิทธิผล (l_{ef})

$$l_{ef} = r_f \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (\text{ข.7})$$

เมื่อ

l_{ef} คือ ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเชิงประสิทธิผล

r_f คือ รัศมีของภายในของเส้นใย

d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (D_{org})

จากสมการของ Stokes และ Einstein ดังนี้

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} \quad (\text{ข.8})$$

เมื่อ

k_B คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann

T คือ อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

π คือ ค่าคงที่ 3.1416

η คือ ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

r คือ รัศมีของ โมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน

ค่าสัมประสิทธิ์เชิงประสิทธิผลการแพร่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (D'_{org})

$$D'_{org} = \frac{D_{org} \varepsilon}{\tau} \quad (\text{ข.9})$$

เมื่อ

D'_{org} คือ สัมประสิทธิ์เชิงประสิทธิผลการแพร่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

D_{org} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ε คือ ความพรุนของเส้นใยกลวง

τ คือ ความคดเคี้ยวของเส้นใยกลวง

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของสารละลายป้อน (k_f)

$$\frac{k_f d_1}{D_f} = 1.62 \left(\frac{d_1^2 \langle v_1 \rangle}{LD_f} \right)^{0.33} \quad (\text{ข.10})$$

$$k_f = 1.62 \left(\frac{D_f}{d_1} \right) \cdot \left(\frac{d_1^2 \langle v_1 \rangle}{LD_f} \right)^{0.33} \quad (\text{ข.11})$$

เมื่อ

k_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของสารละลายป้อน

D_f คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคของสารละลายป้อน

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง

$\langle v_1 \rangle$ คือ ความเร็วเชิงเส้นภายในเส้นใยกลวง

L คือ ความยาวของเส้นใยกลวง

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของสารละลายสตรีป (k_s)

$$\frac{k_s d_h}{D_s} = 4.57 \left(\frac{d_h^2 \langle v_2 \rangle}{LD_s} \right)^{0.33} \quad (\text{ข.12})$$

$$k_s = 4.57 \left(\frac{D_s}{d_h} \right) \cdot \left(\frac{d_h^2 \langle v_2 \rangle}{LD_s} \right)^{0.33} \quad (\text{ข.13})$$

เมื่อ

k_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของสารละลายสตรีป

D_s คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคของสารละลายสตรีป

d_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮดรอลิก

$\langle v_2 \rangle$ คือ ความเร็วเชิงเส้นภายนอกเส้นไฮดรอลิก

L คือ ความยาวของเส้นไฮดรอลิก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การซึมผ่านที่ได้จากการทดลอง

การซึมผ่าน (P) (Marchese and Campderros, 2004)

$$P_{ex} = \frac{N_{Co}}{[Co]_{m,f}} = \frac{Fv_s [Co]_{e,s}}{A_m [Co]_{m,f}} \quad (ก.1)$$

เมื่อ

N_{Co} คือ ฟลักซ์ของไอออนโคบอลต์ที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

$[Co]_{m,f}$ คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน

Fv_s คือ อัตราการไหลของสารละลายสตรีป

$[Co]_{e,s}$ คือ ความเข้มข้นขาออกของไอออนโคบอลต์ในสารละลายสตรีป

A_m คือ พื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลเฉลี่ย

จากสมการสมดุลมวลที่กำหนดให้ไม่มีการสะสมไอออนโคบอลต์ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวและความเข้มข้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายสตรีปเป็นศูนย์

$$Fv_f ([Co]_0 - [Co]_{e,f}) = Fv_s [Co]_{e,s} \quad (ก.2)$$

เมื่อ

Fv_f คือ อัตราการไหลของสารละลายป้อน

$[Co]_0$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน

$[Co]_{e,f}$ คือ ความเข้มข้นขาออกของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน

Fv_s คือ อัตราการไหลของสารละลายสตรีป

$[Co]_{e,s}$ คือ ความเข้มข้นขาออกของไอออนโคบอลต์ในสารละลายสตรีป

จากสมการ (ก.1) และ (ก.2) จะได้

$$P_{ex} = \frac{N_{Co}}{[Co]_{m,f}} = \frac{Fv_f ([Co]_0 - [Co]_{e,f})}{A_m [Co]_{m,f}} \quad (ก.3)$$

$$[Co]_{m,f} = \frac{([Co]_0 - [Co]_{e,f})}{\ln([Co]_0/[Co]_{e,f})} \quad (ก.4)$$

จากสมการ (ก.3) และ (ก.4) จะได้

$$P_{ex} = \frac{Fv_f \ln([Co]_0/[Co]_{e,f})}{A_m} \quad (ก.5)$$

เมื่อ

Fv_f คือ อัตราการไหลของสารละลายป้อน

$[Co]_0$ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน

$[Co]_{e,f}$ คือ ความเข้มข้นขาออกของไอออนโคบอลต์ในสารละลายป้อน

A_m คือ พื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลเฉลี่ย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

ง.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าการซึมผ่านที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1. จากข้อมูลจากภาคผนวก ตาราง พิจารณาข้อมูลที่ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อน โดยเลือกพิจารณาที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถคำนวณค่าการซึมผ่านโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA	20	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
	0.6	โมลต่อลิตร
อัตราการไหลของสารละลายป้อน	100	มิลลิลิตรต่อนาที
ความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อน	0.00361	เมตรต่อวินาที
อัตราการไหลของสารละลายสตรีป	100	มิลลิลิตรต่อนาที
ความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสตรีป	0.00069	เมตรต่อวินาที
ค่าคงที่สมดุล	0.000009	
ความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายป้อน	0.00001	โมลต่อลิตร
ความหนาของเยื่อแผ่นเหลว	2.678×10^{-5}	เมตร
สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว	2.024×10^{-12}	ตารางเมตรต่อวินาที
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของสารละลายป้อน	1.032×10^{-6}	เมตรต่อวินาที
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของสารละลายสตรีป	5.621×10^{-6}	เมตรต่อวินาที

จากสมการ (ข.3)

$$P = [B + R_f + R_s]^{-1}$$

การคำนวณหาค่า B

จากสมการ (ข.4)

$$B = \left[\frac{l_{ef}}{D_{org} K_{eq} C_{HX}^2 [H^+]_f^{-2}} \right]$$

โดย

l_{ef} คือ ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเชิงประสิทธิผล

D'_{org} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

K_{eq} คือ ค่าคงที่สมดุล

C_{HX}^o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA

$[H^+]_f$ คือ ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน

การคำนวณความหนาของเยื่อแผ่นเหลว (l_{ef})

เมื่อ

รัศมีของภายในของเส้นใย 0.00012 เมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง 0.0003 เมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง 0.00024 เมตร

จากสมการ(ข.7)

$$l_{ef} = r_f \ln \frac{d_2}{d_1}$$

โดย

$$r_f = 0.00012 \text{ m}$$

$$d_2 = 0.0003 \text{ m}$$

$$d_1 = 0.00024 \text{ m}$$

$$l_{ef} = (0.00012) \cdot \ln\left(\frac{0.0003}{0.00024}\right)$$

$$l_{ef} = 2.678 \times 10^{-5} \text{ m}$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (D'_{org})

เมื่อ

ค่าคงที่ของ Boltzmann 1.3806×10^{-23}

อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว 298.15 K

ค่าคงที่ 3.1416

ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ 20 %(v/v) D2EHPA 0.0415 kg/(s.m)

รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน $3.0 \times 10^{-10} \text{ m}$

จากสมการ (ข.8)

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r}$$

โดย

$$k_B = 1.3806 \times 10^{-23}$$

$$T = 298.15 \text{ เคลวิน}$$

$$\pi = 3.1416$$

$$\eta = 0.0415 \text{ กิโลกรัม/(วินาที.เมตร)}$$

$$r = 3.0 \times 10^{-10} \text{ เมตร}$$

$$D_{org} = \frac{1.3806 \times 10^{-23} \cdot 298.15}{6 \cdot 3.1416 \cdot 0.0415 \cdot 3.0 \times 10^{-10}}$$

$$D_{org} = 1.754 \times 10^{-11} \text{ ตารางเมตรต่อวินาที}$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงประสิทธิผลในวัฏภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (D'_{org})

เมื่อ

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว 1.754×10^{-11} เมตร

ความคดเคี้ยวของเส้นใยกลวง 2.6

ความพรุนของเส้นใยกลวง 0.3

จากสมการ (ข.9)

$$D'_{org} = \frac{D_{org} \varepsilon}{\tau}$$

โดย

$$D_{org} = 1.754 \times 10^{-11} \text{ เมตร}$$

$$\varepsilon = 0.3$$

$$\tau = 2.6$$

$$D'_{org} = \frac{(1.754 \times 10^{-11}) \cdot (0.3)}{2.6}$$

$$D'_{org} = 2.024 \times 10^{-12} \text{ ตารางเมตรต่อวินาที}$$

$$K_{eq} = 0.000009$$

$$C_{HX}^{o2} = 0.6 \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$[H^+]_f^{-2} = 0.00001 \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$B = \frac{(2.678 \times 10^{-5})}{(2.024 \times 10^{-12}) \cdot (9 \times 10^{-6}) \cdot (0.6)^2 \cdot (1 \times 10^{-5})^{-2}}$$

$$B = 566.37 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

การคำนวณหาค่าความต้านทานในวัฏภาคของสารละลายป้อน (R_f)

จากสมการ (ข.5)

$$R_f = 1/k_f$$

เมื่อ

k_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของสารละลายป้อน

โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงประสิทธิผลในวัฏภาคของสารละลายป้อน (k_p)

เมื่อ

สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคของสารละลายป้อน 5.917×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที

ความยาวของเส้นใยกลาง 0.198 เมตร

ความเร็วเชิงเส้นภายในเส้นใยกลาง 0.00361 เมตรต่อวินาที

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง 0.00024 เมตร

จากสมการ (ข.11)

$$k_f = 1.62 \left(\frac{D_f}{d_1} \right) \cdot \left(\frac{d_1^2 \langle v_1 \rangle}{LD_f} \right)^{0.33}$$

โดย

$$D_f = 5.917 \times 10^{-11} \text{ ตารางเมตรต่อวินาที}$$

$$d_1 = 0.00024 \text{ เมตร}$$

$$\langle v \rangle = 0.00361 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$L = 0.198 \text{ เมตร}$$

$$k_f = 1.62 \cdot \left(\frac{5.917 \times 10^{-11}}{0.0024} \right) \cdot \left[\frac{(0.00024^2) \cdot 0.00361}{0.198 \cdot (5.917 \times 10^{-11})} \right]^{0.33}$$

$$k_f = 1.032 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$R_f = \frac{1}{1.032 \times 10^{-6}}$$

$$R_f = 969105.38 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

การคำนวณหาค่าความต้านทานในวัฏภาคของสารละลายป้อน (R_f)

จากสมการ (ข.6)

$$R_s = 1/k_s$$

เมื่อ

k_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของสารละลายสตริป

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงประสิทธิผลในวัฏภาคของสารละลายสตริป (k_s)

เมื่อ

สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคของสารละลายสตริป 5.10×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที

ความยาวของเส้นใยกลาง 0.198 เมตร

ความเร็วเชิงเส้นภายนอกเส้นใยกลาง 0.000695 เมตรต่อวินาที

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮดรอลิก 0.000488 เมตร

จากสมการ (ข.13)

$$k_s = 4.57 \left(\frac{D_s}{d_2} \right) \cdot \left(\frac{d_h^2 \langle v_2 \rangle}{LD_s} \right)^{0.33}$$

โดย

$$D_s = 5.10 \times 10^{-11} \text{ ตารางเมตรต่อวินาที}$$

$$d_h = 0.000488 \text{ เมตร}$$

$$\langle v_2 \rangle = 0.000695 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$L = 0.198 \text{ เมตร}$$

$$k_s = 4.57 \cdot \left(\frac{5.10 \times 10^{-10}}{0.000488} \right) \cdot \left[\frac{(0.000488^2) \cdot 0.000695}{0.198 \cdot (5.10 \times 10^{-10})} \right]^{0.33}$$

$$k_s = 5.621 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$R_s = \frac{1}{5.621 \times 10^{-6}}$$

$$R_s = 177914.01 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

การคำนวณหาค่าการซึมผ่าน (P)

$$P = [B + R_f + R_s]^{-1}$$

โดย

$$B = 566.37 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

$$R_f = 969105.38 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

$$R_s = 177914.01 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

$$P = \frac{1}{[566.37 + 969105.38 + 177914.01]^{-1}}$$

$$P = 8.715 \times 10^{-7} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

2. จากข้อมูลจากภาคผนวก ตาราง พิจารณาข้อมูลที่ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อน โดยเลือกพิจารณาที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถคำนวณค่าการซึมผ่านโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA	20	เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
	0.7	โมลต่อลิตร
อัตราการไหลของสารละลายป้อน	200	มิลลิลิตรต่อนาที
ความเร็วเชิงเส้นของสารละลายป้อน	0.00722	เมตรต่อวินาที
อัตราการไหลของสารละลายสตรีป	100	มิลลิลิตรต่อนาที
ความเร็วเชิงเส้นของสารละลายสตรีป	0.00069	เมตรต่อวินาที
ค่าคงที่สมดุล	0.000009	

ความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายป้อน 0.00001 โมลต่อลิตร
 ความหนาของเยื่อแผ่นเหลว 2.678×10^{-5} เมตร
 สัมประสิทธิ์การแพร่ในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว 2.024×10^{-12} ตารางเมตรต่อวินาที
 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในภูมิภาคของสารละลายป้อน 1.297×10^{-6} เมตรต่อวินาที
 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในภูมิภาคของสารละลายสตริป 5.621×10^{-6} เมตรต่อวินาที

จากสมการ (ข.3)

$$P = [B + R_f + R_s]^{-1}$$

การคำนวณหาค่า B

จากสมการ (ข.4)

$$B = \left[\frac{l_{ef}}{D'_{org} K_{eq} C_{HX}^o [H^+]_f^{-2}} \right]$$

โดย

l_{ef} คือ ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเชิงประสิทธิผล

D'_{org} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

K_{eq} คือ ค่าคงที่สมดุล

C_{HX}^o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA

$[H^+]_f$ คือ ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน

การคำนวณความหนาของเยื่อแผ่นเหลว (l_{ef})

เมื่อ

รัศมีของภายในของเส้นใย 0.00012 เมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง 0.0003 เมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง 0.00024 เมตร

จากสมการ(ข.7)

$$l_{ef} = r_f \ln \frac{d_2}{d_1}$$

โดย

$$r_f = 0.00012 \text{ m}$$

$$d_2 = 0.0003 \text{ m}$$

$$d_1 = 0.00024 \text{ m}$$

$$l_{ef} = (0.00012) \cdot \ln\left(\frac{0.0003}{0.00024}\right)$$

$$l_{ef} = 2.678 \times 10^{-5} \text{ m}$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ในวิภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (D_{org})

เมื่อ

ค่าคงที่ของ Boltzmann 1.3806×10^{-23}

อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว 298.15 K

ค่าคงที่ 3.1416

ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ 20 \% (v/v) D2EHPA 0.0415 kg/(s.m)

รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน $3.0 \times 10^{-10} \text{ m}$

จากสมการ (ข.8)

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r}$$

เมื่อ

$$k_B = 1.3806 \times 10^{-23}$$

$$T = 298.15 \text{ เคลวิน}$$

$$\pi = 3.1416$$

$$\eta = 0.0415 \text{ กิโลกรัม/(วินาที.เมตร)}$$

$$r = 3.0 \times 10^{-10} \text{ เมตร}$$

$$D_{org} = \frac{1.3806 \times 10^{-23} \cdot 298.15}{6 \cdot 3.1416 \cdot 0.0415 \cdot 3.0 \times 10^{-10}}$$

$$D_{org} = 1.754 \times 10^{-11} \text{ ตารางเมตรต่อวินาที}$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงประสิทธิผลในวัฏภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (D'_{caX2})

เมื่อ

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว 1.754×10^{-11} เมตร

ความคดเคี้ยวของเส้นใยกลวง 2.6

ความพรุนของเส้นใยกลวง 0.3

จากสมการ (ข.8)

$$D'_{org} = \frac{D_{org} \varepsilon}{\tau}$$

โดย

$$D_{org} = 1.754 \times 10^{-11} \text{ เมตร}$$

$$\varepsilon = 0.3$$

$$\tau = 2.6$$

$$D'_{org} = \frac{(1.754 \times 10^{-11}) \cdot (0.3)}{2.6}$$

$$D'_{org} = 2.024 \times 10^{-12} \text{ ตารางเมตรต่อวินาที}$$

$$K_{eq} = 0.000009$$

$$C_{HX}^{o2} = 0.6 \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$[H^+]_f^{-2} = 0.00001 \text{ โมลต่อลิตร}$$

$$B = \frac{(2.678 \times 10^{-5})}{(2.024 \times 10^{-12}) \cdot (9 \times 10^{-6}) \cdot (0.6)^2 \cdot (1 \times 10^{-5})^{-2}}$$

$$B = 566.37 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

การคำนวณหาค่าความต้านทานในวิฤภาคของสารละลายป้อน (R_f)

จากสมการ (ข.5)

$$R_f = 1/k_f$$

เมื่อ

k_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวิฤภาคของสารละลายป้อน

โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงประสิทธิผลในวิฤภาคของสารละลายป้อน (k_p)

เมื่อ

สัมประสิทธิ์การแพร่ในวิฤภาคของสารละลายป้อน 5.917×10^{-11} ตารางเมตรต่อวินาที

ความยาวของเส้นใยกลวง 0.198 เมตร

ความเร็วเชิงเส้นภายในเส้นใยกลวง 0.00361 เมตรต่อวินาที

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง 0.00024 เมตร

จากสมการ (ข.11)

$$k_f = 1.62 \left(\frac{D_f}{d_1} \right) \cdot \left(\frac{d_1^2 \langle v \rangle}{LD_f} \right)^{0.33}$$

โดย

$$D_f = 5.917 \times 10^{-11} \text{ ตารางเมตรต่อวินาที}$$

$$d_1 = 0.00024 \text{ เมตร}$$

$$\langle v \rangle = 0.00722 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$L = 0.198 \text{ เมตร}$$

$$k_f = 1.62 \cdot \left(\frac{5.917 \times 10^{-11}}{0.00024} \right) \cdot \left[\frac{(0.00024^2) \cdot 0.00722}{0.198 \cdot (5.917 \times 10^{-11})} \right]^{0.33}$$

$$k_f = 1.297 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$R_f = \frac{1}{1.297 \times 10^{-6}}$$

$$R_f = 770958.69 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

การคำนวณหาค่าความต้านทานในภูมิภาคของสารละลายป้อน (R_s)

จากสมการ (ข.6)

$$R_s = 1/k_s$$

เมื่อ

k_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในภูมิภาคของสารละลายสตรีป

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงประสิทธิผลในภูมิภาคของสารละลายสตรีป (k_s)

เมื่อ

สัมประสิทธิ์การแพร่ในภูมิภาคของสารละลายสตรีป 5.10×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที

ความยาวของเส้นใยกลาง 0.198 เมตร

ความเร็วเชิงเส้นภายนอกเส้นใยกลาง 0.000695 เมตรต่อวินาที

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮดรอลิก 0.000488 เมตร

จากสมการ (ข.13)

$$k_s = 4.57 \left(\frac{D_s}{d_h} \right) \cdot \left(\frac{d_h^2 \langle v_2 \rangle}{LD_s} \right)^{0.33}$$

โดย

$$D_s = 5.10 \times 10^{-11} \text{ ตารางเมตรต่อวินาที}$$

$$d_h = 0.000488 \text{ เมตร}$$

$$\langle v_2 \rangle = 0.000695 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$L = 0.198 \text{ เมตร}$$

$$k_s = 4.57 \cdot \left(\frac{5.10 \times 10^{-11}}{0.000488} \right) \cdot \left[\frac{(0.000488^2) \cdot 0.000695}{0.198 \cdot (5.10 \times 10^{-10})} \right]^{0.33}$$

$$k_s = 5.621 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$R_s = \frac{1}{5.621 \times 10^{-6}}$$

$$R_s = 177914.01 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

การคำนวณหาค่าการซึมผ่าน (P)

$$P = [B + R_f + R_s]^{-1}$$

โดย

$$B = 566.37 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

$$R_f = 770958.69 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

$$R_s = 177914.01 \text{ (เมตรต่อวินาที)}^{-1}$$

$$P = \frac{1}{[566.37 + 770958.69 + 177914.01]^{-1}}$$

$$P = 1.10 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลอง

1. จากข้อมูลจากภาคผนวก ตาราง พิจารณาข้อมูลที่ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อน โดยเลือกพิจารณาที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถคำนวณค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองได้ดังนี้

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออน โคบอลต์ในสารละลายป้อน 1003 ppm
 ความเข้มข้นขาออกของไอออน โคบอลต์ในสารละลายป้อน 488 ppm
 อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตรต่อนาที
 พื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลเฉลี่ย 1.4 ตารางเมตร

จากสมการ (ค.5)

$$P_{ex} = \frac{Fv_f \ln ([Co]_0/[Co]_{e,f})}{A_m}$$

$$P_{ex} = \frac{100 \times 10^{-6} \cdot [\ln(1003/488)]}{60 \cdot 1.4}$$

$$P_{ex} = 8.577 \times 10^{-7} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

2. จากข้อมูลจากภาคผนวก ตาราง พิจารณาข้อมูลที่ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อน โดยเลือกพิจารณาที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถคำนวณค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองได้ดังนี้

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออน โคบอลต์ในสารละลายป้อน 1003 ppm
 ความเข้มข้นขาออกของไอออน โคบอลต์ในสารละลายป้อน 628 ppm
 อัตราการไหลของสารละลายป้อน 200 มิลลิลิตรต่อนาที
 พื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลเฉลี่ย 1.4 ตารางเมตร

จากสมการ (ค.5)

$$P_{ex} = \frac{Fv_f \ln ([Co]_0/[Co]_{e,f})}{A_m}$$

$$P_{ex} = \frac{200 \times 10^{-6} \cdot [\ln(1003/628)]}{60 \cdot 1.4}$$

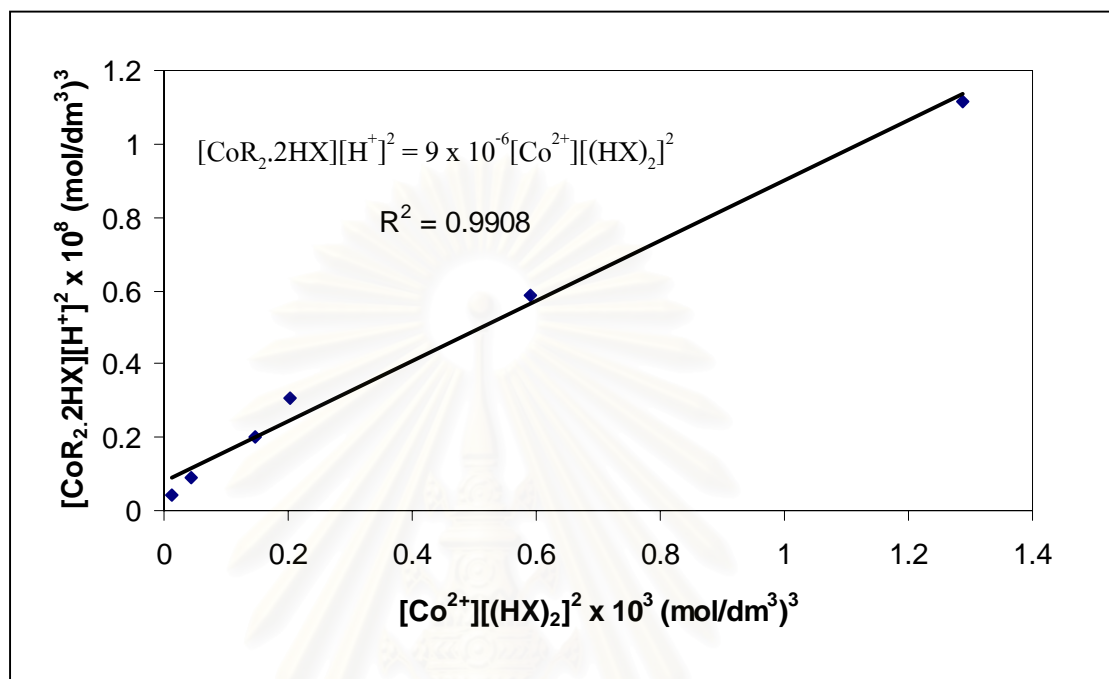
$$P_{ex} = 1.115 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ค่าคงที่สมดุล



รูปที่ จ.1 คงที่สมดุลของการสกัดโคบอลต์ด้วย D2EHPA

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกพิชญ์ ทรงคุณ เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2524 ที่อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต เป็นบุตรคนที่สามในจำนวนสามคนของนายเกียรติณรงค์ และนางละอ อ ทรงคุณ สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลภูเก็ต จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อชั้นมัธยมตอนต้นและชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนภูเก็ตวิทยาลัย ได้สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมตอนปลายในปี 2543 และได้เข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีเดียวกัน โดยสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมีในปี 2546 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย