การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายเจือจางมาก ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง

นายอิศรา เกษมเศรษฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-563-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18554736

EXTRACTION OF COPPER ION FROM AN EXTREMELY DILUTE SOLUTION WITH HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

Mr. Itsara Kasemsestha

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Acedemic Year 1998

ISBN 974-332-563-8

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

อิศรา เกษมเศรษฐ : การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายเจือจางมากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง (Extraction of Copper Ion from an Extremely Dilute Solution with Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. อุรา ปานเจริญ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช, 142 หน้า. ISBN 974-332-563-8

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายที่เจือจางมาก ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการสกัดนี้ อันได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 25 โดยปริมาตร ชนิดของสารสกัดซึ่งได้แก่ สารสกัด D2EHPA สารสกัด LIX84-I และสารสกัด LIX860-I ความเข้มข้นไอออนทองแดงในสารละลายป้อนช่วง 1 ส่วนในหนึ่งล้านส่วน ถึง 100 ส่วนในหนึ่งล้านส่วน รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวง การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ และการไหลเวียน (circulation) วัฏภาคสารละลายสตริป สารละลายอินทรีย์ที่ใช้ได้แก่เคโรซีน (kerosene) โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป

จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สารสกัดในกลุ่ม LIX สามารถถ่ายเทไอออนทองแดงได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อน รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อและไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อควบคุมความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ให้มีค่าเท่ากับ 5 การใช้วัฏภาคสารละลายสตริปปริมาณน้อยและให้มีการไหลเวียนยังคงทำให้การถ่ายเทไอออนทองแดงเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม ผลของการใช้วัฏภาคสารละลายสตริปที่มีปริมาณน้อยสามารถทำให้สารละลายสตริปมีความเข้มข้นของไอออนทองแดงสูง

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

#3972515421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: COPPER / EXTRACTION / HOLLOW FIBER / SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

ITSARA KASEMSESTHA : EXTRACTION OF COPPER ION FROM AN EXTREMELY DILUTE SOLUTION WITH HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sci. THESIS CO-ADVISOR : DR. DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D 142 pp. ISBN 974-332-563-8

This research studied the performance of extraction of copper ion from an extremely dilute solution with hollow fiber supported liquid membranes. Various factors affecting this extraction system were studied, viz. the concentrations of extractant in membrane phase in the range below 25 V/V%, the types of extractant between D2EHPA, LIX84-I and LIX 860-I, the concentrations of copper ion in feed solution in the range of 1 ppm to 100 ppm, flow patterns of feed solution in tube side and in shell side of hollow fiber supported liquid membranes, pH of feed solution controlled with buffer solution, and circulation of strip solution. Kerosene was used as an organic solution while 0.1 mol/l sulfuric acid was used as a strip solution.

From the experiments, the ability of copper ion transportation was increased when concentration of extractant was increased. LIX-type extractant showed better performance than D2EHPA. Copper ion transportation was increased as concentration of copper ion in feed solution was increased. Flow pattern of feed solution in tube side and in shell side of hollow fiber module had no influence in the performance of the system. Copper ion transportation was increased when pH of feed solution was kept at 5 by buffer solution. The copper ion transportation could be occurred appropriately by using small amount of strip solution in circulation mode.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2541	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายเจือจางมากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง
โดย	นายอิศรา เกษมเศรษฐ
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัตน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบ

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที)

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ เป็นอย่างดี รวมทั้งขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนังที ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์และอาจารย์ ดร. วรัญ แต้ไพสิฐพงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ได้ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณบริษัท เฮงเค็ลไทย จำกัด และบริษัท ไทยออยล์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสารเคมี

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร. วราภรณ์ ถิพิพัฒนไพบูลย์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีและศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา และขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญรูป ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สัญลักษณ์ ..... ท

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 8

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 8

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 9

2 เยื่อแผ่นเหลว 10

2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พยุงบนตัวรองรับ 12

2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด 12

2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกวน 13

2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดของ Boyadzhiev 14

2.1.4 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชั่น 15

2.1.5 เยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้า 17

2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงบนตัวรองรับ 19

2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน 19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยแผ่นม้วน 20
2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง 21
2.3 ชนิดของสารสกัด 22
2.3.1 สารสกัดชนิดกรด 22
2.3.2 สารสกัดชนิดด่าง 24
2.3.3 สารสกัดชนิดซอลเวท 25
3 กลไกการถ่ายเทมวล 26
3.1 กลไกการถ่ายเทมวล 26
3.1.1 การถ่ายเทมวลอย่างง่าย 27
3.1.2 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายที่มีปฏิกริยาเคมี 27
3.1.3 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายโดยอาศัยสารสกัด 28
3.1.4 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายโดยอาศัยสารสกัดที่มีปฏิกริยาเคมี 29
3.1.5 การถ่ายเทมวลแบบไปด้วยกัน 30
3.1.6 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง 31
3.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ 32
3.2.1 ทฤษฎี 36
3.3 งานวิจัยที่ผ่านมา 40
4 วิธีการทดลอง 47
4.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 47
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 48
4.3 วิธีการทดลอง 51
4.3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นสารสกัดและผลของชนิดสาร
สกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนทองแดง 51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 53
4.3.3 การศึกษาผลของรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 54
4.3.4 การศึกษาผลของการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ต่อการสกัดไอออนทองแดง 57
4.3.5 ผลของการไหลเวียนของสารสตริปต่อการสกัดไอออนทองแดง 58
5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 61
5.1 ผลของความเข้มข้นสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง 62
5.2 ผลของชนิดของสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง 77
5.3 ผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 81
5.4 ผลของรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 92
5.5 ผลของการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ต่อการสกัดไอออนทองแดง 97
5.6 ผลของการไหลเวียนวัฏภาคสารละลายสตริปต่อการสกัดไอออนทองแดง 103
6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 106
6.1 สรุปผลการทดลอง 106
6.2 ข้อเสนอแนะ 107

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง 108

ภาคผนวก ก 113

ภาคผนวก ข 115

ภาคผนวก ค 120

ภาคผนวก ง 135

ภาคผนวก จ 138

ภาคผนวก ฉ 140

ประวัติผู้วิจัย 143

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	กระบวนการแยกทองแดงด้วยสารละลายของน้ำ	2
1.2	กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย	4
1.3	กระบวนการสกัดด้วยเส้นใยกลวง	5
1.4	กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับ	6
2.1	รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ	11
2.2	ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด	12
2.3	ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกวน	14
2.4	ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดของ Boyadzhiev	15
2.5	ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชั่น	16
2.6	ระบบเยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้า	18
2.7	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงบนตัวรองรับแบบแผ่นแบน	20
2.8	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงบนตัวรองรับแบบแผ่นม้วน	21
2.9	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงบนเส้นใยกลวง	22
3.1	กลไกการถ่ายเทมวลแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว	29
3.2	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในกระบวนการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ของการถ่ายเทไอออนทองแดง	36
4.1	สูตรโครงสร้างของสารสกัดที่ใช้	48
4.2	อุปกรณ์ชุด Liqui-Cel ® Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง	49
4.3	โมดูลของเส้นใยกลวง	50
4.4	การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงในกรณีสารละลายป้อนและสารละลายสตริปไหลผ่าน (one-through mode)	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงในกรณีป้อนสารละลายสตริปในฝั่งท่อ (tube-side) และกรณีป้อนสารละลายป้อนในฝั่งเปลือก (shell-side)	56
4.6	การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงในกรณีสารละลายป้อนไหลผ่าน (one-through mode) และสารละลายสตริปไหลเวียน (circulation mode)	60
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA	64
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด LIX84-I	67
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด LIX860-I	69
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA	71
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด LIX84-I	74
5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด LIX860-I เมื่อ	76
5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนของทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด	79
5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด	80
5.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด D2EHPA	82
5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I	85
5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX860-I	87
5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด D2EHPA	89
5.14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I	90
5.15	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX860-I	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.16	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัดและรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I	93
5.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของสารสกัดและรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I	95
5.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการนำกลับไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของสารสกัดและรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I	96
5.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กรณีเติมสารละลายบัฟเฟอร์และไม่เติมสารละลายบัฟเฟอร์ในวัฏภาคสารละลายป้อน	98
5.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กรณีเติมสารละลายบัฟเฟอร์และไม่เติมสารละลายบัฟเฟอร์ในวัฏภาคสารละลายป้อน	101
5.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการนำกลับกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กรณีเติมสารละลายบัฟเฟอร์และไม่เติมสารละลายบัฟเฟอร์ในวัฏภาคสารละลายป้อน	102
5.22	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดสะสมและค่าร้อยละการนำกลับสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทดลองสำหรับกรณีเติมสารละลายบัฟเฟอร์ในวัฏภาคสารละลายป้อน	104
ก-1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายในฝั่งท่อกับค่าของชุดควบคุมอัตราการไหล	114

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก-2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายในฝั่งเปลือกกับค่าของชุดควบคุมอัตราการไหล	114
ฉ-1	การดูดและคายพลังงานของอะตอม	141
ฉ-2	การดูดกลืนพลังงาน	141

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	47
4.2	คุณสมบัติของไมคูลเส้นใยกลวง	50
ก-1	ข้อมูลดิบสำหรับปรับมาตรฐานของชุดควบคุมอัตราการไหล	113
ก-2	ข้อมูลสำหรับปรับมาตรฐานของชุดควบคุมอัตราการไหล	113
ข-1	ผลการทดลองจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง	115
ข-2	ผลการทดลองจากการศึกษาผลของชนิดสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง	116
ข-3	ผลการทดลองจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง	117
ข-4	ผลการทดลองการศึกษาผลของรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง	117
ข-5	ผลการทดลองจากการศึกษาผลของสารละลายบัฟเฟอร์ในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง	118
ข-6	ผลการทดลองที่เวลาต่าง ๆ จากการศึกษาผลของการไหลเวียนสารละลายสตริปต่อการสกัดไอออนทองแดง	119
ข-7	ผลการทดลองจากการศึกษาผลของการไหลเวียนสารละลายสตริปต่อการสกัดไอออนทองแดง	119
ค-1	ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค-2 ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับไอออนทองแดงจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง 121

ค-3 ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงจากการศึกษาผลของชนิดสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง 122

ค-4 ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับจากการศึกษาผลของชนิดสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง 123

ค-5 ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 124

ค-6 ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 124

ค-7 ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงจากการศึกษาผลของรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 125

ค-8 ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับไอออนทองแดงจากการศึกษาผลของรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 125

ค-9 ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงจากการศึกษาผลของสารละลายบัฟเฟอร์ต่อการสกัดไอออนทองแดง 126

ค-10 ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงจากการศึกษาผลของสารละลายบัฟเฟอร์ต่อการสกัดไอออนทองแดง 126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค-11 ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดสะสมและร้อยละการนำกลับสะสมของไอออนทองแดงที่เวลาต่าง ๆ จากการศึกษาผลของการไหลเวียนสารละลายสตริปต่อการสกัดไอออนทองแดง 127

ค-12 ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดสะสมและร้อยละการนำกลับสะสมของไอออนทองแดงจากการศึกษาผลของการไหลเวียนสารละลายสตริปต่อการสกัดไอออนทองแดง 127

ค -13 ผลการคำนวณสมดุลมวลจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง 128

ค-14 ผลการคำนวณสมดุลมวลจากการศึกษาผลของชนิดของสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง 129

ค-15 ผลการคำนวณสมดุลมวลจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 130

ค-16 ผลการคำนวณสมดุลมวลจากการศึกษาผลของรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดออออนทองแดง 130

ค-17 - ผลการคำนวณสมดุลมวลจากการศึกษาผลของสารละลายบัฟเฟอร์ในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง 131

ค-18 ผลการคำนวณสมดุลมวลจากการศึกษาผลของการไหลเวียนสารละลายสตริปต่อการสกัดไอออนทองแดง 131

ค-19 ผลการคำนวณค่าความชันจากค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง 132

ค-20 ผลการคำนวณค่าความชันจากค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง 133

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค-21 ผลการคำนวณค่าความชันจากค่าร้อยละการสกัดสะสมและร้อยละการนำกลับสะสมของไอออนทองแดงที่เวลาต่าง ๆ ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง..... 134

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

k_1	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าสำหรับปฏิกริยาสกัด
k_2	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับสำหรับปฏิกริยาสกัด
k_3	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้าสำหรับปฏิกริยาสตริป
k_4	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกริยาย้อนกลับสำหรับปฏิกริยาสตริป
$r_{c,forward}$	อัตราการเกิดไอออนทองแดงจากการเกิดปฏิกริยาไปข้างหน้า
$r_{c,reverse}$	อัตราการเกิดไอออนทองแดงจากการเกิดปฏิกริยาไปย้อนกลับ
K	ค่าคงที่สมดุล
k_m	สัมประสิทธิ์ของการแบ่งส่วน (partition coefficient) ของ M
k_a	สัมประสิทธิ์ของการแบ่งส่วน (partition coefficient) ของ A
K'	ค่งคงที่สมดุลกรณีที่ตัดผลขององค์ประกอบที่มีอยู่น้อยออกไป
J_{MRn}	ค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทสารประกอบเชิงซ้อน
$\overline{D}_{MRn}$	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อน
γ	ความหนาแน่นเชิงโมล
$Cu_{total,extract}$	ปริมาณไอออนทองแดงที่สกัดได้ทั้งหมด
$Cu_{total,feed}$	ปริมาณไอออนทองแดงทั้งหมดในวัฏภาคสารละลายป้อน
$Cu_{total,recovery}$	ปริมาณไอออนทองแดงที่นำกลับได้ทั้งหมด
t	เวลาที่ใช้ในการทดลอง
A	พื้นที่ผิวสัมผัสที่กำหนดของโมดูลเส้นใยกลวง
V	ปริมาตรของวัฏภาคสารละลายของน้ำในภาชนะบรรจุ
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของวัฏภาคสารละลายของน้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Different	ผลต่างระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่วัฏภาคสารละลายสตริป
% Different	ร้อยละของผลต่างระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่วัฏภาคสารละลายสตริปเมื่อเทียบกับปริมาณไอออนทองแดงทั้งหมดในวัฏภาคสารละลายป้อน

ตัวยก

′	หมายถึงวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
″	หมายถึงวัฏภาคสารละลายของน้ำ

ตัวห้อย

1	หมายถึงที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
2	หมายถึงที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสตริป
membrane	หมายถึงวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
feed	หมายถึงในภาชนะบรรจุวัฏภาคสารละลายป้อนขาเข้า
raffinate	หมายถึงในภาชนะบรรจุวัฏภาคสารละลายป้อนขาออก
strip	หมายถึงในภาชนะบรรจุวัฏภาคสารละลายสตริปขาเข้า
recovery	หมายถึงในภาชนะบรรจุวัฏภาคสารละลายสตริปขาออก
t	หมายถึงที่เวลา t

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย