

การจำลองแบบประสิทธิภาพการทำงานและการอุปถัมภ์ในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พอง
ด้วยเส้นใยกลวงหลายขั้นตอน



นายเกษม หฤทัยธนาสันดี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-130-576-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPERATING EFFICIENCY SIMULATION AND OPTIMISATION OF COPPER- ION EXTRACTION WITH
A MULTI-STAGES HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

Mr. Kasem Haruthaithanasan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-130-576-1

นายเกษม หฤทัยธนาสันต์ : การจำลองแบบประสิทธิภาพการทำงานและการออกแบบที่ไม่ซ้ำในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายขั้นตอน. (Operating Efficiency Simulation and Optimisation of Copper- Ion Extraction with a Multi-stages Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. อูรา ปานเจริญ, 120 หน้า. ISBN 974-130-576-1.

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 1 คอลัมน์ 2 คอลัมน์ และ 3 คอลัมน์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงและสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 1 คอลัมน์ 2 คอลัมน์ และ 3 คอลัมน์ ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนทองแดงและนำผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลอง งานวิจัยส่วนที่สองทำนายประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์ และ 3 คอลัมน์

จากผลการคำนวณพบว่า แบบจำลองนี้มีค่าร้อยละของความผิดพลาดเฉลี่ยเพียง 6.9 เมื่อทำการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงขั้นตอนเดียว และการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์ และ 3 คอลัมน์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงได้มากกว่าการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงขั้นตอนเดียว 2 ถึง 3 เท่าเป็นอย่างน้อยเมื่อมีการกำหนดสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสม

ภาควิชา.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2543

4070219821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: COPPER / EXTRACTION / HOLLOW FIBER / SUPPORTED LIQUID MEMBRANE /
MULTI-STAGES

KASEM HARUTHAITHANASAN : OPERATING EFFICIENCY SIMULATION AND
OPTIMISATION OF COPPER- ION EXTRACTION WITH A MULTI-STAGES HOLLOW
FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. URA
PANCHAROEN, D.Eng.Sc. 120 pp. ISBN 974-130-576-1.

This research studied and optimized the efficiency of copper-ion extraction in the one, two and three stages hollow fiber supported liquid membrane system by using computer program. The first part of this research simulated and optimized the parameters that affected copper-ion extraction. The results were compared with some experimental results for accuracy and precision of the model. The second part of this research studied the efficiency simulation of copper-ion extraction in the two and three stages hollow fiber supported liquid membrane.

From the simulated results it was found that the average relative error of this model was 6.9%. The efficiency of copper-ion extraction in the two and three stages hollow fiber supported liquid membrane system increased at least 2–3 times more than the efficiency of single stage extraction system.

Department.....

Student's

Field of study.....

Advisor's

Academic year 2000

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ เป็นอย่างดี รวมทั้งขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในช่วงที่ รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ เดินทางไปต่างประเทศ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจเสมอมา และขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฒ
สัญลักษณ์.....	ด
อภิธานศัพท์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เยื่อแผ่นเหลว.....	7
2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองตัวด้วยตัวรองรับ.....	7
2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด.....	8
2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกวาน.....	10
2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดของ Boyadzhiev.....	11
2.1.4 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	12
2.1.5 เยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้า.....	14
2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ.....	15
2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน.....	16
2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วน.....	17
2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	18
2.3 ชนิดของสารสกัด.....	18
2.3.1 สารสกัดชนิดกรด.....	18
2.3.2 สารสกัดชนิดด่าง.....	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.3 สารสกัดชนิดซอลเวท.....	21
บทที่ 3 กลไกการถ่ายมวล.....	23
3.1 กลไกการถ่ายมวล.....	23
3.1.1 การถ่ายเทมวลอย่างง่าย.....	23
3.1.2 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายที่มีปฏิกิริยาเคมี.....	24
3.1.3 การถ่ายเทมวลอย่างง่าย โดยอาศัยสารสกัด.....	24
3.1.4 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายโดยอาศัยสารสกัดที่มีปฏิกิริยาเคมี.....	26
3.1.5 การถ่ายเทมวลแบบไปด้วยกัน.....	27
3.1.6 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง.....	27
3.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่.....	28
3.3 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	33
บทที่ 4 การทดลองและวิธีพัฒนาโปรแกรม.....	35
4.1 สารเคมีที่ใช้.....	35
4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัด.....	36
4.3 รูปแบบของการทดลอง.....	38
4.3.1 รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พุงด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียว.....	38
4.3.2 รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอน.....	42
4.4 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อการคำนวณ.....	44
บทที่ 5 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลการคำนวณ.....	56
5.1 รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลวงแบบชั้นตอนเดียว.....	56
5.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อ การสกัดไอออนทองแดง.....	56

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.2 ผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในภูมิภาค สารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง.....	61
5.1.3 ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนต่อ การสกัดไอออนทองแดง.....	64
5.1.4 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อ การสกัดไอออนทองแดง.....	66
5.2 รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลวงหลายชั้นตอน.....	68
5.2.1 ผลของการคำนวณประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วย เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์.....	68
5.2.2 ผลของการคำนวณประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วย เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์.....	71
บทที่ 6 สรุปผลการคำนวณและข้อเสนอแนะ.....	75
6.1 สรุปผลการคำนวณ.....	75
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก.....	82
ภาคผนวก ข.....	83
ภาคผนวก ค.....	94
ประวัติผู้วิจัย.....	108

สารบัญญัตราสาร

	หน้า
ตารางที่ 4.1	แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....35
ตารางที่ 4.2	แสดงคุณสมบัติของโมดูลเส้นใยกลวง.....37
ตารางที่ 4.3	แสดงสภาวะเริ่มต้นก่อนการคำนวณในการสกัดไอออนทองแดง ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์.....43
ตารางที่ 4.4	แสดงสภาวะเริ่มต้นก่อนการคำนวณในการสกัดไอออนทองแดง ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์.....45
ตารางที่ 5.1	แสดงร้อยละความผิดพลาดของการคำนวณการหาร้อยละการสกัด ไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุกๆ 1, 2 และ 4 เซนติเมตรเมื่อเทียบกับผลจากการทดลองจริง.....58
ตารางที่ 5.2	ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความ เข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA และค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายป้อนก่อนการสกัดของทั้งสองคอลัมน์.....69
ตารางที่ 5.3	ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความ เข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA และค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายป้อนก่อนการสกัดของทั้งสามคอลัมน์.....72
ตารางที่ ก-1	แสดงค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออน ทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายขั้นตอน.....82
ตารางที่ ข-1	แสดงสภาวะก่อนการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุง ด้วยเส้นใยกลวงในช่วงที่สารละลายป้อนและสารละลายสตริปยัง ไม่ไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน.....86
ตารางที่ ข-2	แสดงสภาวะก่อนการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุง ด้วยเส้นใยกลวงในช่วงที่สารละลายป้อนและสารละลายสตริปไหล มาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน.....89

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ค-1	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 , 2 และ 4 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว เทียบกับผลการทดลองจริง.....94
ตารางที่ ค-2	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 10 ppm.....95
ตารางที่ ค-3	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 50 ppm.....95
ตารางที่ ค-4	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 100 ppm.....96
ตารางที่ ค-5	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 300 ppm.....96
ตารางที่ ค-6	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 500 ppm.....97
ตารางที่ ค-7	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 1000 ppm.....97

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ค-8	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v.....98
ตารางที่ ค-9	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 3 %v/v.....98
ตารางที่ ค-10	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 5 %v/v.....99
ตารางที่ ค-11	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 10 %v/v.....99
ตารางที่ ค-12	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 15 %v/v.....100
ตารางที่ ค-13	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v.....100
ตารางที่ ค-14	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 3 %v/v.....101

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ค-15	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 5 %v/v.....	102
ตารางที่ ค-16	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 10 %v/v.....	103
ตารางที่ ค-17	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 25 %v/v.....	104
ตารางที่ ค-18	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v.....	105
ตารางที่ ค-19	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 2 %v/v.....	105
ตารางที่ ค-20	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 3 %v/v.....	106
ตารางที่ ค-21	แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 5 %v/v.....	106

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ค-22 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยน อัตราการไหลของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ สารสกัด D2EHPA เป็น 10 %v/v.....	107



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	กระบวนการแยกทองแดงด้วยสารละลายน้ำ.....2
รูปที่ 1.2	กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction; liquid-liquid extraction).....3
รูปที่ 1.3	กระบวนการสกัดด้วยเส้นใยกลวง (liquid-liquid extraction with hollow fiber).....4
รูปที่ 1.4	กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ.....5
รูปที่ 2.1	รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ.....8
รูปที่ 2.2	ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด.....9
รูปที่ 2.3	ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน.....10
รูปที่ 2.4	ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดของ boyadzhiev.....11
รูปที่ 2.5	ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....12
รูปที่ 2.6	ระบบเยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยกระแสไฟฟ้า.....15
รูปที่ 2.7	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน.....16
รูปที่ 2.8	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน.....17
รูปที่ 2.9	ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....19
รูปที่ 3.1	กลไกการถ่ายเทมวลแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว.....25
รูปที่ 3.2	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในกระบวนการถ่ายเทมวลแบบควบคุมของการถ่ายเทไอออนทองแดง.....31
รูปที่ 4.1	แสดงสูตรโครงสร้างของ D2EHPA ซึ่งเป็นสารสกัดที่ใช้.....35
รูปที่ 4.2	แสดงอุปกรณ์ชุด Liqui-Cel® Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง.....36
รูปที่ 4.3	โมดูลของเส้นใยกลวง.....37
รูปที่ 4.4	แสดงรูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงขั้นตอนเดียว.....39
รูปที่ 4.5	แสดงรูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์.....39
รูปที่ 4.6	แสดงรูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์.....39

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7	ไดอะแกรมแสดงรูปแบบการไหลสวนทางกันระหว่างสารละลายป้อนกับสารละลายสไตริปในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	47
รูปที่ 4.8	แสดงกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในช่วงเวลาที่สารละลายป้อนและสารละลายสไตริปยังไม่ไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน.....	48
รูปที่ 4.9	แสดงกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในช่วงเวลาที่สารละลายป้อนและสารละลายสไตริปไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน.....	52
รูปที่ 5.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ที่ได้จากโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 , 2 และ 4 เซนติเมตร กับการทดลองจริง.....	57
รูปที่ 5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ที่ได้จากโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร กับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงต่าง ๆ	59
รูปที่ 5.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดง ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตรกับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ.....	62
รูปที่ 5.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดง ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตรกับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ.....	63
รูปที่ 5.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตรกับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ	65

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.6	
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับอัตราการไหลของ	
สารละลายป้อนที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ	
1 เซนติเมตรกับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA	
ต่าง ๆ.....	67
รูปที่ 5.7	
แสดงแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดง	
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ทั้งแบบ 1 คอลัมน์ และ	
2 คอลัมน์.....	70
รูปที่ 5.8	
แสดงแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วย	
เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ทั้งแบบ 1 คอลัมน์ 2 คอลัมน์ และ	
3 คอลัมน์.....	73

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวสัมผัสที่กำหนดของโมดูลเส้นใยกลวง , (cm ² /cm)
B	ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA , (mol/l)
C	ความเข้มข้นของไอออนทองแดง , (mol/l)
H	ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจน, (mol/l)
J	ค่าอัตราการซึมผ่านของการถ่ายเทสารประกอบเชิงซ้อน , (mol/cm ² -s)
k _B	ค่าคงที่ของการถ่ายเทสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว , (cm/s)
k _m	ค่าคงที่ของการถ่ายเทสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว , (cm/s)
k ₁	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าสำหรับปฏิกิริยาการสกัด
k ₂	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับสำหรับปฏิกิริยาการสกัด
k ₃	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าสำหรับปฏิกิริยาการสตริป
k ₄	ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับสำหรับปฏิกิริยาการสตริป
K _{ex}	ค่าคงที่สมดุล
M	ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดง , (mol/l)
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของวัฏภาคสารละลายป้อน ,(ml/min.)
Γ _{c,forward}	อัตราการเกิดไอออนทองแดงจากการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า , (mol/cm ² -s)
Γ _{c,reverse}	อัตราการเกิดไอออนทองแดงจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ , (mol/cm ² -s)
W	มวลอะตอม หรือ มวลโมเลกุล
x	ความยาวของโมดูลเส้นใยกลวง ,(cm)
ε	ความพรุนของเส้นใยกลวง
ρ	ความหนาแน่นของสารสกัด D2EHPA , (g/cm ³)

ตัวยก

eq	ที่สภาวะสมดุล
f	วิฤภาคสารละลายป้อน
s	วิฤภาคสารละลายสตรีป
—	วิฤภาคสารละลายอินทรีย์

ตัวห้อย

B	สารสกัด D2EHPA
Cu	ไอออนทองแดง
D2EHPA	สารสกัด D2EHPA
feed	วิฤภาคสารละลายป้อน
M	สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดง
in	ขาเข้า
out	ขาออก
r	การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิวสัมผัส
0	สภาวะเริ่มต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อภิธานศัพท์

อภิธานศัพท์	คำนิยาม
การนำกลับมา (Recovery)	การใช้กระบวนการต่าง ๆ เพื่อนำเอาองค์ประกอบที่ต้องการกลับมาใช้ประโยชน์
การสกัด (Extraction)	การดึงเอาองค์ประกอบที่ต้องการออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนโดยใช้สารสกัด
การสตริป (Strip)	การดึงเอาองค์ประกอบที่ต้องการออกจากวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้ปฏิกิริยาเคมี
โมดูล ใน(Module)	กลุ่มของเส้นใยกลวงจำนวนมากที่ถูกรวบรวมโดยคอลัมน์
วัฏภาคสารละลายป้อน (Feed solution phase)	สารละลายที่มีองค์ประกอบที่ต้องการสกัดอยู่
วัฏภาคสารละลายสตริป ต้องการ(Strip solution phase) เคมี	สารละลายกรดที่ทำหน้าที่ดึงเอาองค์ประกอบที่ออกจากวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้ปฏิกิริยาเคมี
วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane phase)	สารละลายของสารสกัดที่อยู่ในรูพรุนของเส้นใยกลวง
สภาวะคงตัว (Steady-state)	สภาวะของระบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ กับเวลา
สภาวะเอกรูป (Unsteady-state)	สภาวะของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ กับเวลา
D2EHPA	Di-2-Ethylhexyl Phosphoric Acid
Raffinate	สารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว

บทที่ 1

บทนำ

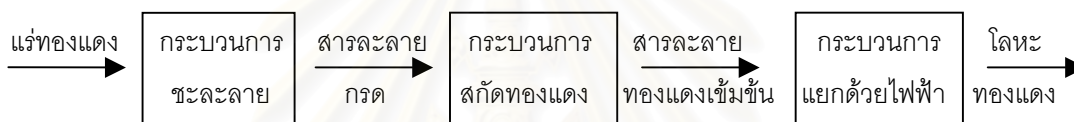
1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันความต้องการในการใช้โลหะมีสูงชันมาก เนื่องจากจำนวนประชากรโลกมีจำนวนสูงขึ้นโดยเฉพาะประเทศที่กำลังพัฒนา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาค้นคว้าหากระบวนการใหม่ ๆ หรือพัฒนากระบวนการที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อใช้ในการผลิตโลหะ หรือนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่ในธรรมชาติมีอยู่อย่างจำกัดและไม่เพียงพอต่อความต้องการ

ทองแดงเป็นโลหะที่มีความสำคัญทั้งทางด้านเทคโนโลยีและประวัติศาสตร์ โลหะชนิดนี้ถูกนำมาใช้ตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ทั้งในลักษณะของโลหะทองแดงและในลักษณะของโลหะผสมของทองแดง เช่น เครื่องมือ อาวุธ เครื่องประดับ เป็นต้น คุณสมบัติของทองแดงอยู่ที่มีความแข็งแรง ความเหนียว สามารถรีดเป็นแผ่นบางได้ ความทนทานต่อการสึกกร่อน และสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมาก ปัจจุบันทองแดงมีความสำคัญในหลาย ๆ ด้าน เช่น การชุบด้วยโลหะ อุปกรณ์ท่อต่าง ๆ การผลิตมอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องรับโทรทัศน์ เครื่องบิน และดาวเทียม ส่วนสารประกอบทองแดงมีความสำคัญทั้งในด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเคมี (Galligan, 1998)

ทองแดงเป็นธาตุตัวแรกในหมู่ IB ของตารางธาตุ และถูกจัดเป็นโลหะมีตระกูล (noble) เช่นเดียวกับทองและเงิน โดยปกติทองแดงส่วนใหญ่ที่มีอยู่ตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปของสินแร่ที่เป็นสารประกอบซัลไฟด์และสารประกอบออกไซด์ สินแร่ที่นำมาใช้ผลิตทองแดงมีคุณภาพน้อยลงไปทุกขณะเพราะสินแร่ที่มีคุณภาพสูงถูกใช้หมดไป (Butts, 1977) กระบวนการผลิตทองแดงที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย (Butt, 1997) มีหลายขั้นตอนประกอบด้วยกระบวนการขุดเจาะ (mining) กระบวนการเพิ่มความเข้มข้น (concentration) กระบวนการหลอม (smelting) และสุดท้ายทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีทางไฟฟ้า (electrorefining) ซึ่งจะได้แร่ที่มีความเข้มข้นของทองแดงประมาณ ร้อยละ 20 ถึง 30 โดยน้ำหนัก

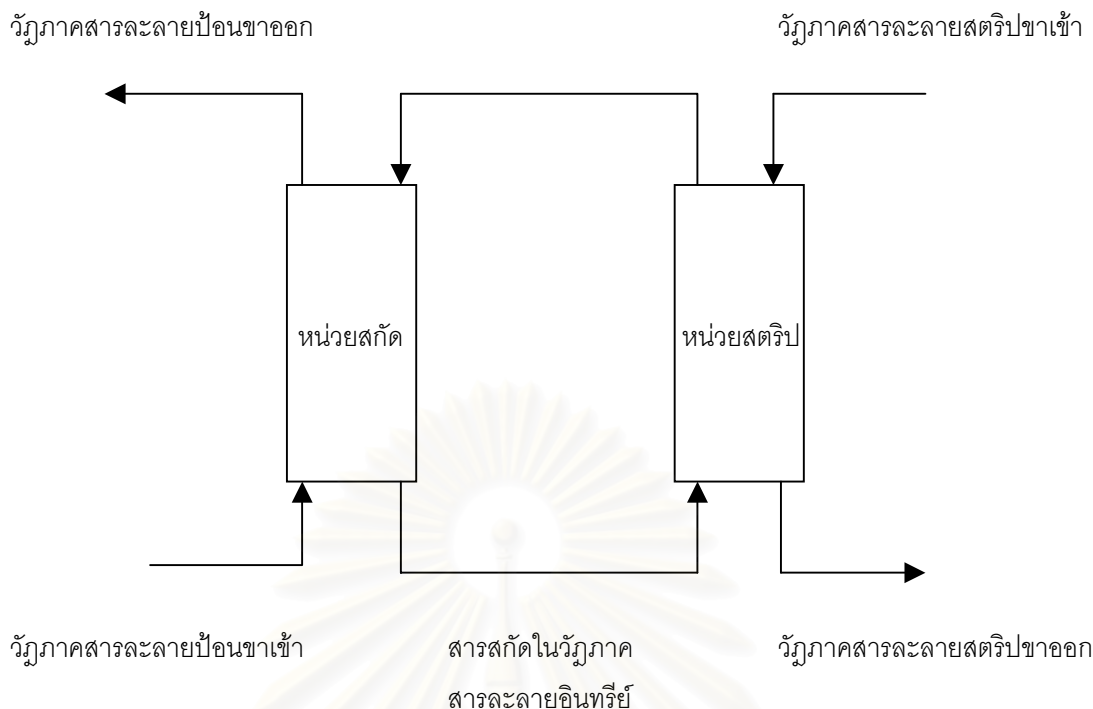
กระบวนการผลิตทองแดงอีกชนิดหนึ่งคือ กระบวนการแยกทองแดงด้วยสารละลายน้ำ (hydrometallurgical process) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ประกอบไปด้วยกระบวนการชะละลาย(leaching) โดยใช้ตัวทำละลายได้สารละลายที่มีทองแดงละลายอยู่ ตัวทำละลายที่นิยมใช้คือ สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายที่มีทองแดงละลายอยู่จะถูกส่งไปยังกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของทองแดงในสารละลาย ก่อนที่จะส่งไปยังกระบวนการแยกทองแดงด้วยไฟฟ้า (electrowinning) กระบวนการแยกทองแดงด้วยสารละลายน้ำได้รับความสนใจและพัฒนาขึ้นมาเพื่อแทนที่กระบวนการผลิตทองแดงโดยวิธีการหลอม เนื่องจากในกระบวนการหลอมจะได้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นผลพลอยได้ ซึ่งก๊าซนี้เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง



รูปที่ 1.1 กระบวนการแยกทองแดงด้วยสารละลายน้ำ (Tuddenham, 1979)

เนื่องจากทองแดงมีความต้องการในการใช้สูง ประกอบกับความตื่นตัวทางด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้มีความพยายามค้นหาวิธีการแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพในกระบวนการแยกไอออนทองแดงเพื่อใช้ทองแดงให้คุ้มค่า (Liacono et al., 1986) และปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ดังนั้น กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) จึงถูกนำมาใช้เพื่อแยก องค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตทองแดงด้วย สารละลายของน้ำในขั้นตอนการชะละลาย แต่มีข้อเสียคือใช้ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอนค่อนข้างมากจึงทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูง ความสามารถในการคัดเลือกรวม (selectivity) ต่ำ และที่สำคัญคือสารประกอบของไอออนโลหะที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปที่นำไปใช้ได้ลำบาก

กระบวนการแยกไอออนโลหะที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายอีกวิธีหนึ่งคือ การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) กระบวนการนี้ประกอบไปด้วยวัฏภาคของสารละลาย 3 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคสารละลายป้อน (feed phase) วัฏภาคสารละลายอินทรีย์ (organic phase) และ วัฏภาคสารละลายสตริป (strip phase) การนำกลับ (recovery) ของไอออนโลหะจะเสร็จสมบูรณ์ใน 2 ขั้นตอนดังแสดงในรูป 1.2

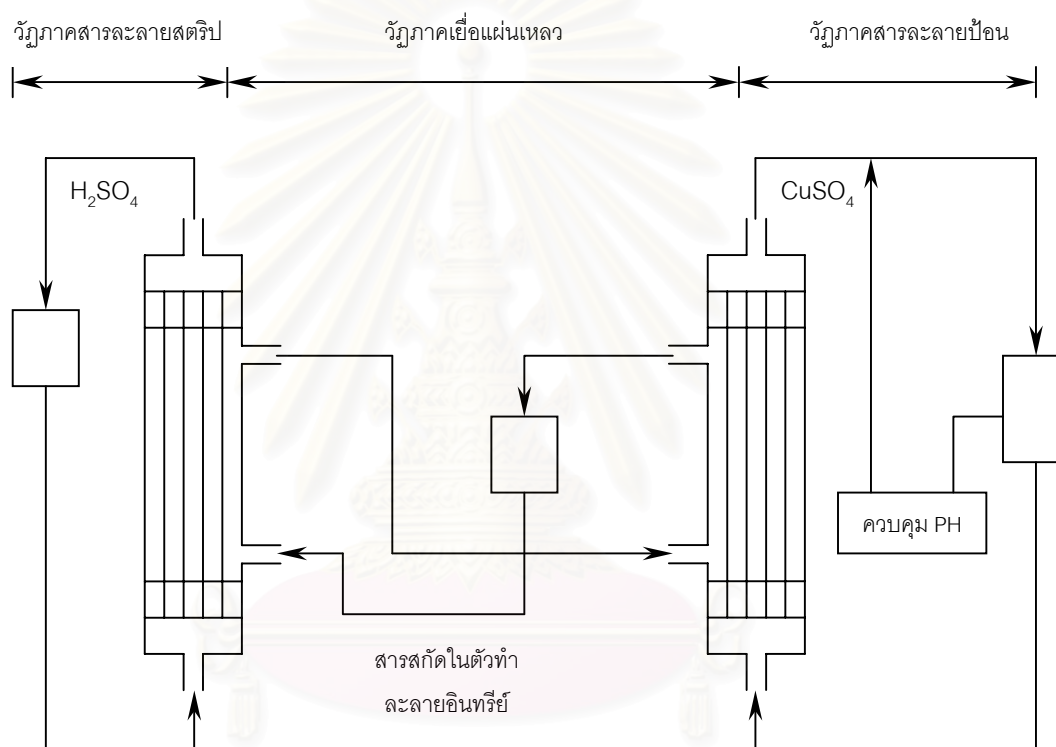


รูปที่ 1.2 กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction ; liquid-liquid extraction)

(Nopphakorn, 1995)

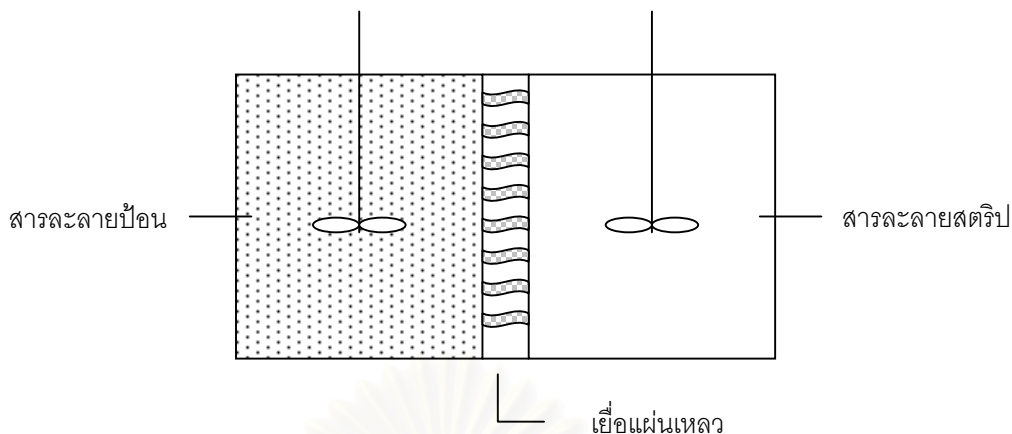
ขั้นตอนแรกคือขั้นตอนสกัด เป็นขั้นตอนซึ่งองค์ประกอบที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขององค์ประกอบที่ต้องการแยกกับสารสกัดซึ่งสารประกอบนี้จะละลายได้ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์เท่านั้น ทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์ประกอบไปด้วยสารประกอบเชิงซ้อน ขั้นต่อมาคือขั้นตอนสตริบ ในขั้นตอนนี้องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะถ่ายเทจากสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์มายังวัฏภาคสารละลายสตริบ การถ่ายเทไอออนโลหะในกระบวนการนี้ขึ้นกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและผันกลับได้ ดังนั้นจึงสามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้กระบวนการนี้ได้รับความสนใจมากขึ้น (Tavlarides, 1987) แต่เนื่องจากข้อจำกัดหลายประการของกระบวนการนี้ เช่น ประสิทธิภาพของการสกัดถูกจำกัดโดยค่าสัดส่วนระหว่างสารละลายป้อนกับตัวทำละลาย (feed to solvent ratio) และค่าสัดส่วนการกระจายไอออนโลหะระหว่างวัฏภาคต่าง ๆ (distribution ratio) นอกจากนี้กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายต้องใช้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่และใช้สารสกัดและตัวทำละลายในปริมาณมาก เนื่องจากมีด้วยกันหลายขั้นตอน

การนำโมดูล (module) ของเส้นใยกลวงซึ่งมีลักษณะเหมือนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchanger) เพียงแต่แทนที่ท่อด้วยเส้นใยกลวง มาประยุกต์ใช้กับสารสกัดด้วยตัวทำละลายได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายท่าน (D'elia et al., 1986; Hann et al., 1989, Yun et al., 1993; Yang et al., 1996) กระบวนการนี้ วิทยาศาสตร์ละลายป้อนและวิทยาศาสตร์ละลายสไตริปจะไหลในฝั่งหนึ่งของเส้นใยกลวง (ฝั่งท่อ) ส่วนวิทยาศาสตร์ละลายอินทรีย์จะไหลในอีกฝั่งหนึ่งของเส้นใยกลวง (ฝั่งเปลือก) ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 กระบวนการสกัดด้วยเส้นใยกลวง (liquid-liquid extraction with hollow fiber) (Hann et al., 1989)

อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังมีจุดที่ต้องพัฒนาคือ ปริมาณสารสกัดที่ต้องใช้เป็นจำนวนมากและการรั่วไหลของวิทยาศาสตร์ละลายน้ำไปยังวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นจึงมีการคิดกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane) ขึ้นมา กระบวนการนี้จะวางวิทยาศาสตร์ละลายอินทรีย์ไว้ระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและวิทยาศาสตร์ละลายสไตริป ทำให้การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนเดียวที่รวมขั้นตอนสกัดและขั้นตอนสไตริปไว้ด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (Komasawa et al., 1983)

มีผู้สนใจศึกษากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวหลายท่าน (Smith et al., 1973; Lee et al., 1978; Li et al., 1983; Dwozak และ Naser, 1987; Draxler et al., 1988; Matsumoto et al., 1990; Barnes และ Marshall, 1995) ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพในการคัดเลือกราคาไม่แพง สารสกัดและตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้มีปริมาณน้อยลง (Shiau และ Chen, 1993) และประหยัดพลังงาน ถึงแม้ว่ากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวจะมีข้อได้เปรียบในหลาย ๆ ด้าน แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการนำกระบวนการนี้ไปใช้อย่างกว้างขวางในระดับอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งนำไปสู่การถ่ายเทมวลที่ลดลงและประสิทธิภาพในการคัดเลือกราคาที่ลดลง (Nakano et al., 1987; Tanikaki et al., 1988; Dreher และ Stevens, 1988)

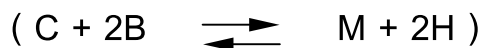
1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองในการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอน ซึ่งใช้กรดได-2-เอทิล เฮกซิลฟอสฟอริกเป็นสารสกัด และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนทองแดง สุดท้ายนำผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาภายใต้ขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1. ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะดังนี้



ซึ่งในที่นี่จะให้	C	แทน	Cu^{2+}
	B	แทน	$(RH)_2$
	M	แทน	$CuR_2 \cdot 2RH$
	H	แทน	H^+

2. จะใช้คอลัมน์ในการสกัดแบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอนเพียง 3 คอลัมน์ ในการสร้างแบบจำลอง

3. ศึกษาผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองจริง เพื่อหา ร้อยละความผิดพลาด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงลักษณะการทำงานของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง กลไกการ ถ่ายเทมวล กลไกของปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัด และทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อ การสกัด

2. โปรแกรมที่เขียนขึ้นจากแบบจำลองนี้สามารถใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการ สกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอนที่มีกรดไค-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก เป็นสารสกัด โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทดลอง

3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับไอออนโลหะอื่น ๆ ที่มีกลไกของปฏิกิริยาเหมือนกับของ ไอออนทองแดง และกรดไค-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก เช่น ไอออนโคบอลต์ เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เยื่อแผ่นเหลว

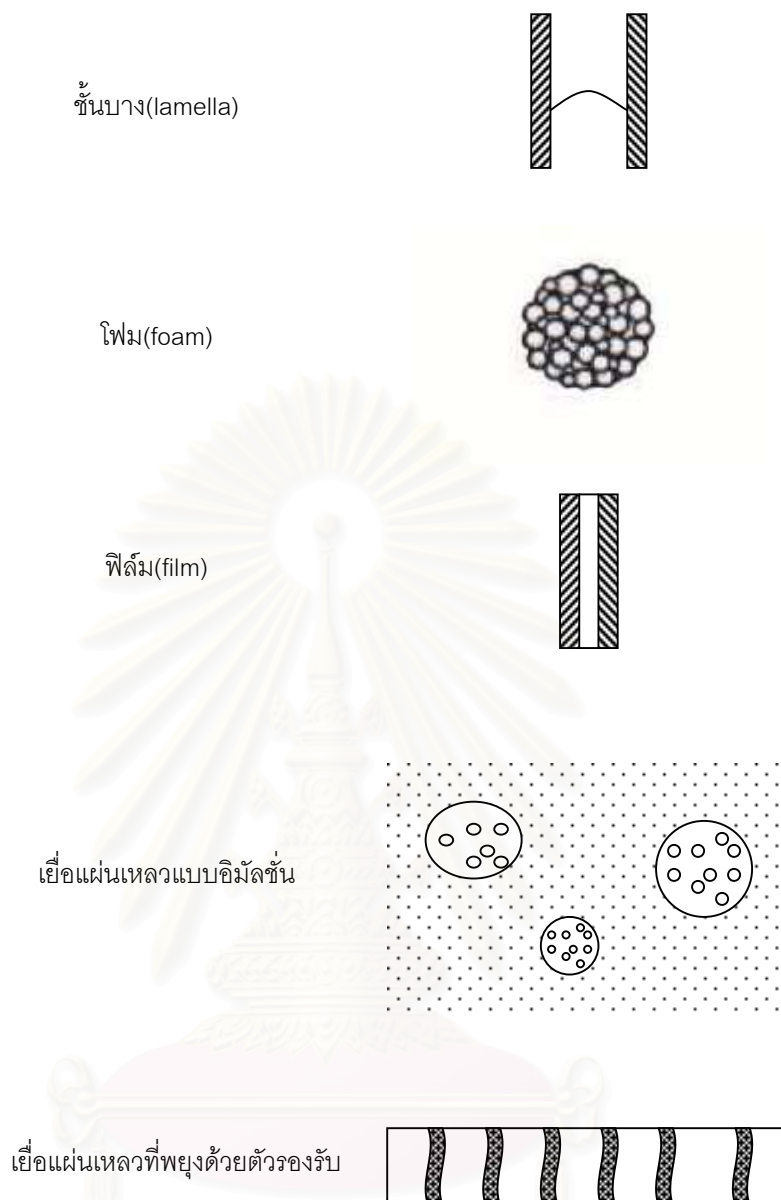
บทนี้จะกล่าวถึงประเภทของกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบต่าง ๆ รวมถึงชนิดของสารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane process) ประกอบด้วย วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) วัฏภาคสารละลายป้อน (feed phase) และวัฏภาคสารละลายสตริป (strip phase) วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่ประกอบไปด้วยสารสกัดจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคสารละลาย เมื่อนำวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างวัฏภาคสารละลายองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะถูกสกัดให้อยู่ในรูปที่สามารถละลายได้ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยสารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสตริปที่ฝั่งตรงข้าม สุดท้ายองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะถูกสกัดให้อยู่ในรูปที่สามารถละลายในวัฏภาคสารละลายสตริปได้ ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการในวัฏภาคสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายสตริปได้ เยื่อแผ่นเหลวมีหลายรูปแบบ โดยเฉพาะเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่ากรณีอื่น ๆ (Schultz, 1988) ดังรูปที่ 2.1

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ (unsupported liquid membranes) และเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membranes) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองตัวด้วยตัวรองรับ

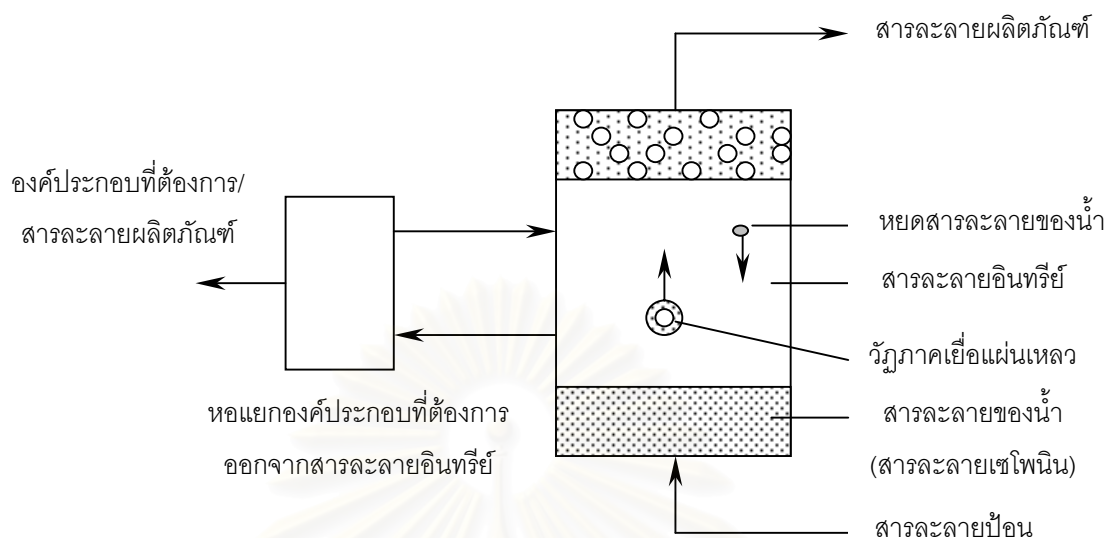
ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า เยื่อแผ่นเหลวแบบเคลื่อนไหวได้ (mobilized liquid membrane) เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนไหวได้ มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ ได้แก่



รูปที่ 2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (Shultz,1988)

2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด (liquid membrane in droplet column)

N.Ni. Li ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดในปี 1967 ซึ่งนับได้ว่าเป็นการศึกษาระบบการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับเป็นครั้งแรก ต่อมา Marr และ Kopp ได้ทำการศึกษาโดยใช้หอสกัดที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.2

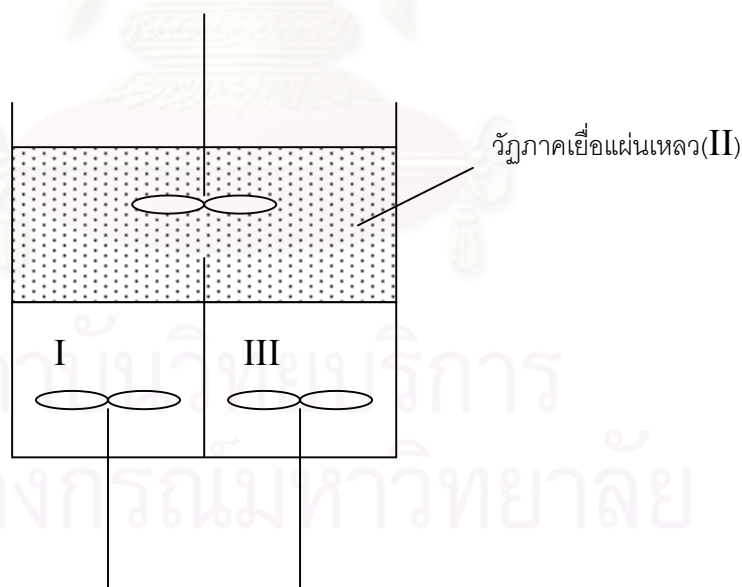


รูปที่ 2.2 ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหอยสกัด (Marr และ Kopp, 1982)

หอยสกัดดังกล่าวจะบรรจุด้วยสารละลายอินทรีย์จนเกือบเต็มโดยให้มีชั้นของสารละลายเซโปนิน (saponin) ในน้ำที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 1 โดยปริมาตรอยู่ด้านล่างของหอยสกัด ถ้าให้หอยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าสารละลายอินทรีย์ในหอยสกัด หอยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากทางด้านล่างของหอยสกัด เมื่อหอยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนเคลื่อนที่ผ่านชั้นของสารละลายเซโปนิน หอยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนจะถูกห่อหุ้มด้วยชั้นฟิล์มของสารละลายเซโปนินในลักษณะเหมือนฟองสบู่ที่ห่อหุ้มอากาศ หอยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนที่ผิวมีสารละลายของน้ำหุ้มอยู่จะเคลื่อนที่ผ่านวัฏภาคสารละลายอินทรีย์จากด้านล่างขึ้นไปด้านบนของหอยสกัดเนื่องจากผลต่างของความถ่วงจำเพาะทำให้องค์ประกอบบางชนิดถ่ายเทออกจากหอยดสารละลายไฮโดรคาร์บอนโดยไม่มีการรวมตัวกันระหว่างวัฏภาคต่าง ๆ แต่หอยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นต้องมีขนาดจำกัดเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นขอบเขตของสารละลายของน้ำกับสารอินทรีย์ได้ และในกระบวนการแยกวัฏภาคออกจากกันอย่างสมบูรณ์หลังจากหอยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนรวมตัวกันที่ด้านบนของหอยสกัดเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้เองกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวในหอยสกัดจึงถูกจำกัดให้อยู่ในระดับการทดลองเท่านั้น

2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน (stirred cells)

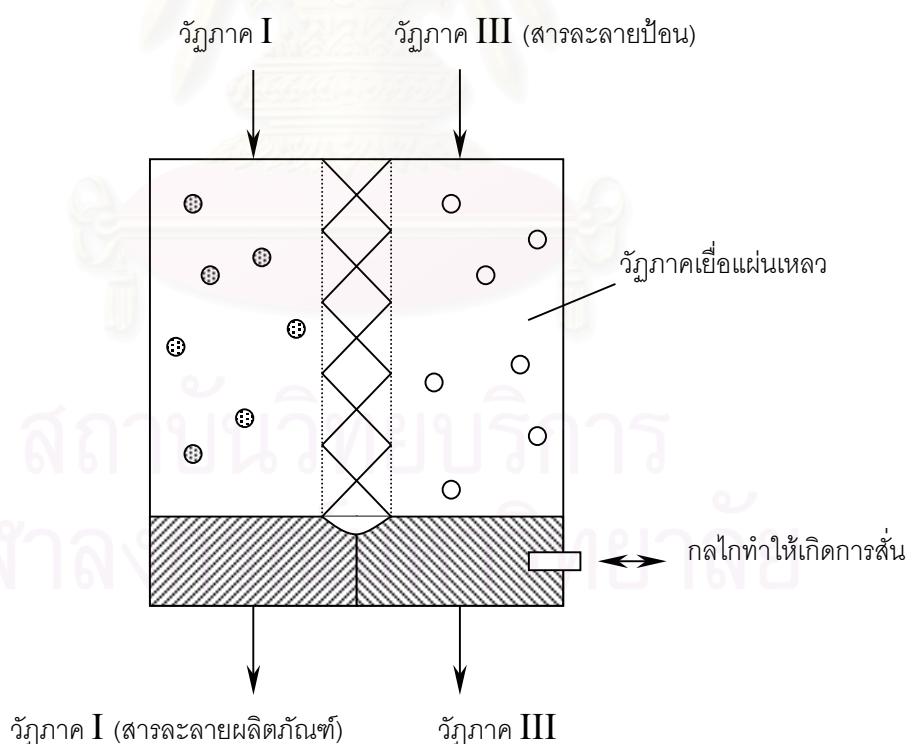
เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววนมีโครงสร้างที่ง่ายในการนำไปใช้ศึกษาความต้านทานที่ผิวสัมผัส (interfacial resistance) กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้เตรียมโดยนำวัฏภาคสารละลายสองชนิดที่รวมกันได้ (วัฏภาค I และ วัฏภาค III) มาบรรจุในอุปกรณ์โดยมีแผ่นกั้นเพื่อมิให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองรวมตัวกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 (Marr และ Kopp,1982) จากนั้นจึงนำวัฏภาคสารละลายชนิดที่สาม (วัฏภาค II) ซึ่งไม่รวมตัวกับวัฏภาคสารละลายสองชนิดแรกมาบรรจุในอุปกรณ์โดยให้วัฏภาคสารละลายชนิดที่สามสัมผัสกับวัฏภาคสารละลายทั้งสองชนิดแรก การถ่ายเทมวลในกระบวนการนี้เกิดขึ้นในทิศทางจากวัฏภาคสารละลาย (วัฏภาค I) ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (วัฏภาค II) ไปยังวัฏภาคสารละลาย (วัฏภาค III) หรือในทิศทางกลับกัน แต่ในกรณีที่วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นวัฏภาคสารละลายของน้ำ วัฏภาคสารละลายอินทรีย์ที่ใช้จะต้องมีความถ่วงจำเพาะมากกว่า กระบวนการนี้มีข้อจำกัดที่อัตราการถ่ายเทมวลต่ำและมีการใช้เยื่อแผ่นเหลวในปริมาณมาก (Izatt,1988)



รูปที่ 2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน (Marr และ Kopp,1982)

2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดของ Boyadzhiev (Boyadzhiev column)

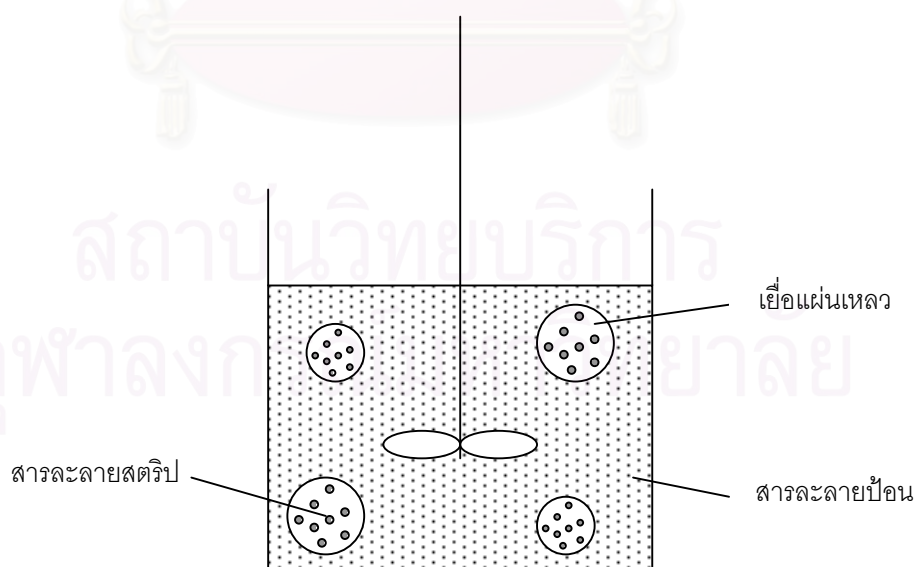
Boyadzhiev (Boyadzhiev และ Kyuchoukov, 1980) ได้เสนอ หอสกัดแบบเขย่า (pulse column) ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยใช้แผ่นกั้นพอลิเมอร์ที่มีช่องว่างและวางไว้ในแนวตั้ง แผ่นกั้นนี้ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อให้วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเคลื่อนที่ผ่านได้แต่หยดของสารละลายผ่านไม่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวถูกบรรจุอยู่ในหอสกัดทั้งสองส่วน วัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายสตรีปจะถูกป้อนเข้าด้านบนทางฝั่งซ้ายหรือทางฝั่งขวาของหอสกัดในลักษณะเป็นหยดกระจายไปในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว เมื่อมีการเขย่าหอสกัด วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสองฝั่งของแผ่นกั้นทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อนที่ฝั่งหนึ่งถ่ายเทผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายสตรีปที่อีกฝั่งหนึ่งได้ กระบวนการนี้มีจุดเด่นตรงสามารถเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทมวลได้มากขึ้นแต่เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ยังคงมีปริมาณมากอยู่ อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเทคนิคนี้ให้มีรูปแบบที่ง่ายต่อการใช้งานต่อไป (Marr และ Kopp, 1982)



รูปที่ 2.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดของ Boyadzhiev (Boyadzhiev และ Kyuchoukov, 1980)

2.1.4 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (emulsion liquid membrane; ELM)

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันมีชื่ออีกอย่างว่า เยื่อแผ่นเหลวแบบเซอร์แฟกแทนต์ (liquid surfactant membrane) เนื่องจากอิมัลชันจะถูกเตรียมโดยนำวัฏภาคสารละลายสองชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงมาก จนเกิดเป็นอิมัลชันในลักษณะที่วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวห่อหุ้มวัฏภาคสารละลายสตริปหรือวัฏภาคภายใน (internal phase) เอาไว้ แต่อิมัลชันเหล่านี้มักไม่เสถียรดังนั้นจึงต้องเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเพื่อรักษาเสถียรภาพของอิมัลชันระหว่างปฏิบัติการจึงมีชื่ออย่างที่กล่าวมา จากนั้นจึงปั่นกลุ่มอิมัลชันที่ได้ผสมกับวัฏภาคสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงตีกวนเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทมวล ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีการเคลื่อนตัวตลอดเวลาจึงเป็นเหตุให้เรียกวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวว่าเป็น วัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ดังรูปที่ 2.5 การถ่ายเทมวลในระบบนี้จะถ่ายเทจากวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังวัฏภาคสารละลายสตริปโดยผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว การถ่ายเทจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนวัฏภาคสารละลายสตริปมีความเข้มข้นเพียงพอต่อความต้องการ จากนั้นจึงแยกอิมัลชันออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนแล้วทำการแตกอิมัลชันเพื่อแยกวัฏภาคสารละลายสตริปออกมา ส่วนวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่



รูป 2.5 ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Schultz, 1988)

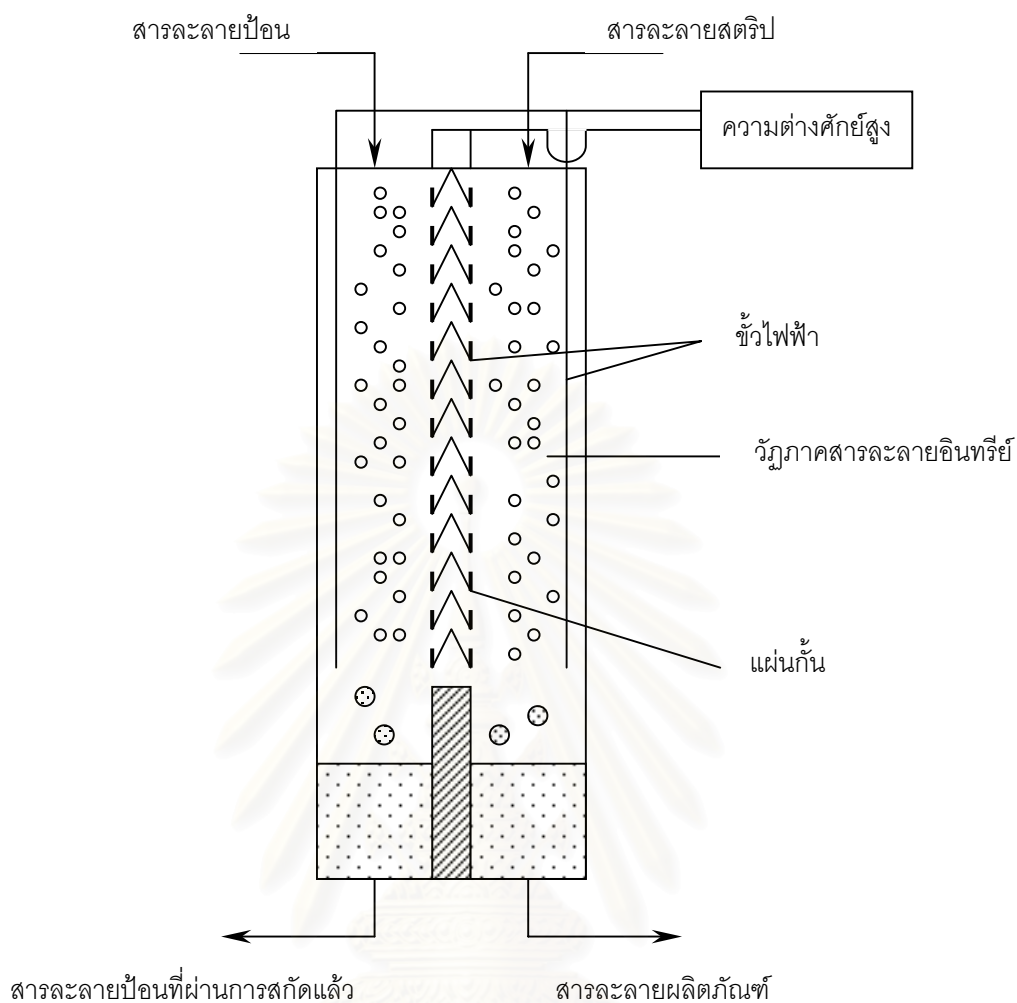
เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิด (Ho และ Li, 1992; Marr และ Kopp, 1982) ได้แก่ อิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (water-in-oil (w/o) emulsion) และอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (oil-in-water (o/w) emulsion) ในแบบแรกวิทยาศาสตร์ละลายสตริปเป็นสารละลายของน้ำ ส่วนในแบบที่สองวิทยาศาสตร์ละลายสตริปเป็นสารละลายอินทรีย์ เมื่อนำอิมัลชันของน้ำในน้ำมันมากระจายในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนที่เป็นสารละลายของน้ำ ระบบจะเรียงลำดับจากวิทยาศาสตร์ด้านในไปยังวิทยาศาสตร์ด้านนอกดังนี้ น้ำ/น้ำมัน/น้ำ (w/o/w) ในลักษณะเดียวกันเมื่อนำอิมัลชันของน้ำมันในน้ำมากระจายในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนที่เป็นสารละลายของน้ำจะได้ระบบ น้ำมัน/น้ำ/น้ำมัน (o/w/o) ดังนั้นจึงมีสารลดแรงตึงผิวสองประเภท ได้แก่ สารลดแรงตึงชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surfactant) สำหรับอิมัลชันน้ำในน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic surfactant) สำหรับอิมัลชันน้ำมันในน้ำ

โดยทั่ว ๆ ไป สารละลายสตริปซึ่งเป็นวิทยาศาสตร์ภายในควรจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-3 ไมโครเมตรเพื่อให้เกิดเสถียรภาพในระหว่างปฏิบัติการ และขนาดของหยดอิมัลชันของสารละลายอินทรีย์ควรอยู่ในช่วง 0.1-2 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ของสารละลายสตริปและสารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีพื้นที่ประมาณ 10^6 เมตร²/เมตร³ และ 3,000-4,000 เมตร²/เมตร³ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์สูงมาก แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังคงมีปัญหาบางประการได้แก่ การเติมสารลดแรงตึงผิวในการทำอิมัลชันทำให้การแตกอิมัลชันเพื่อแยกวิทยาศาสตร์ละลายสตริปออกมาทำได้ยากขึ้น (Gu, 1992) นอกจากนี้อัตราการถ่ายเทมวลอาจต่ำลงเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมารวมกันที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ ทำให้การถ่ายเทมวลเข้าและออกจากวิทยาศาสตร์ละลายสตริปถูกจำกัดโดยสารลดแรงตึงผิว วิธีการพื้นฐานในการแตกอิมัลชันมีสองวิธีด้วยกันคือ การบำบัดทางเคมี (chemical treatment) และการบำบัดทางกายภาพ (physical treatment) (Tavlarides, 1987) การบำบัดทางเคมีเป็นการเติมสารลดการประสาน (demulsifier) ลงไปในอิมัลชันวิธีการนี้มีประสิทธิภาพมาก แต่ตัวลดการประสานอาจเปลี่ยนคุณสมบัติของวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก การบำบัดทางกายภาพจะเป็นการใช้ประจุไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อแตกอิมัลชัน วิธีการบำบัดแบบนี้มีประสิทธิภาพดีและเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการแตกอิมัลชัน แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่จะใช้มีความยุ่งยากซับซ้อน และปัญหาสุดท้ายของกระบวนการนี้คือการที่อิมัลชันแตกออกขณะปฏิบัติการทำให้วิทยาศาสตร์ละลายสตริปปนกับวิทยาศาสตร์ละลายป้อน ซึ่งเป็นการลดประสิทธิภาพของการสกัด

2.1.5 เยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้า (electrostatic pseudo liquid membrane; ESPLIM)

เยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากหอสกัดที่ Boyadzhiev และ Kyuchoukov คิดค้นขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน จากหลักพื้นฐานของสนามไฟฟ้าที่ว่า หยดน้ำในวัฏภาคน้ำมันจะแตกกระจายออกเป็นหยดเล็ก ๆ จำนวนมากภายใต้สนามไฟฟ้ากำลังสูง (Martin et al., 1983 อ้างถึงใน Gu, 1990) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การกวนด้วยกระแสไฟฟ้า (electrostatic agitation)” การนำเอาสนามไฟฟ้ามาใช้กับกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว จึงทำให้วัฏภาคน้ำมันละลายของน้ำกระจายตัวในวัฏภาคน้ำมันอินทรีย์ได้ดีขึ้น หอสกัดที่ใช้ในกระบวนการนี้แบ่งออกเป็นสองฝั่งคือ ฝั่งสกัดและฝั่งสกัดรีไซเคิลโดยใช้แผ่นกั้นรูปตัว V คิวเวียเรียงต่อกันโดยมีหลอดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอาไว้ อีกทั้งยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วยดังรูปที่ 2.6 วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะถูกรวบรวมในหอสกัด ส่วนล่างของหอสกัดเป็นบริเวณที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันการรวมตัวกันของหยดสารละลายของน้ำในฝั่งสกัดและฝั่งสกัดรีไซเคิล วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสองฝั่งอย่างอิสระผ่านทางแผ่นกั้นรูปตัว V เมื่อใส่กระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเข้าระหว่างฝั่งสกัดและฝั่งสกัดรีไซเคิล สารละลายของน้ำในสองฝั่งจะแตกกระจายเป็นเม็ดเล็ก ๆ จำนวนมากในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกในวัฏภาคน้ำมันอินทรีย์ปนถ่ายเทผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคน้ำมันอินทรีย์ที่อีกฝั่งหนึ่งได้

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้าจะมีข้อดีอยู่มากมายได้แก่ มีค่าพลาติกซ์ของการถ่ายเทมวลสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่าง ๆ ต่ำ ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว ระบบไม่ซับซ้อน ใช้พลังงานต่ำ และเยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก แต่กระบวนการนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการคือ ขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว วัฏภาคน้ำมันอินทรีย์ที่ใช้ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรต่ำ วัฏภาคที่กระจายตัวต้องเป็นวัฏภาคน้ำมันอินทรีย์เท่านั้น และยังต้องใช้สารละลายอินทรีย์เป็นปริมาณมาก นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างใหม่ จึงจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมอีก (Gu, 1990)



รูปที่ 2.6 ระบบเยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยกระแสไฟฟ้า (Gu, 1990)

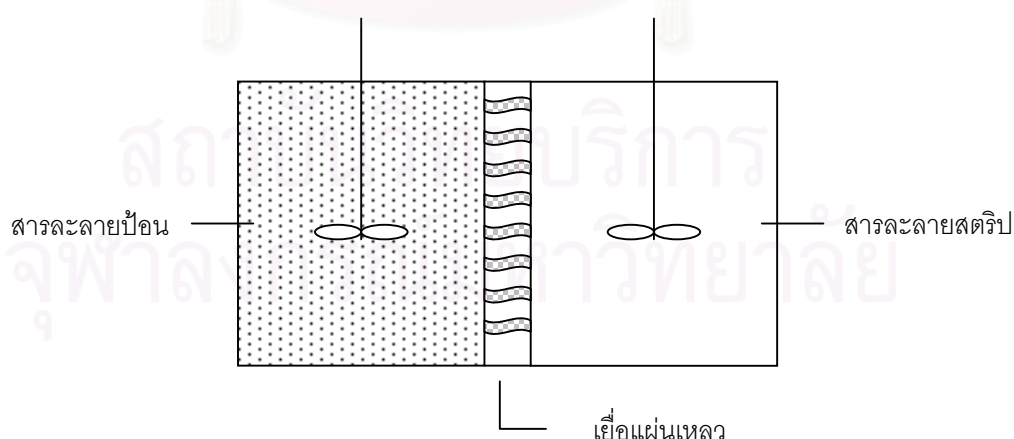
2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ

สำหรับกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เยื่อแผ่นเหลวแบบเคลื่อนที่ไม่ได้ (immobilized liquid membrane) เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นจะถูกตรึงอยู่กับที่ในรูพรุนของตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนด้วยแรงคาปิลลารี (capillary force) (Marr และ Kopp, 1982; Schultz, 1988) ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพมากขึ้นเป็นเหตุให้สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสาน ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวพุงด้วยตัวรองรับอีกประการคือ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและสารสกัดที่ใช้มีปริมาณน้อย แต่อย่างไรก็ตามอัตราการถ่ายเทมวลที่ต่ำและการเสื่อมสภาพของเยื่อแผ่นเหลวเป็นจุดอ่อนของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (O'Hara, 1989; Shiau และ Chen, 1993)

การเตรียมกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับโดยนำวัสดุเยื่อแผ่นเหลวมาเคลือบฝังไว้บนตัวรองรับ เมื่อนำตัวรองรับนี้มาขึ้นระหว่างสารละลายสองชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับวัสดุเยื่อแผ่นเหลว ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทไอออนโลหะจากสารละลายชนิดแรกไปยังสารละลายอีกชนิดหนึ่ง ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำ ซึ่งแบบแรก วัสดุเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังจะเป็นวัสดุสารละลายอินทรีย์ ส่วนแบบหลัง วัสดุเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังต้องเป็นวัสดุสารละลายของน้ำ นอกจากนี้ตัวรองรับที่มีรูพรุนยังมีรูปร่างหลายแบบได้แก่ แบบแผ่นแบน (flat sheet) แบบแผ่นม้วน (spiral – wound) และแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber)

2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (flat sheet supported liquid membrane)

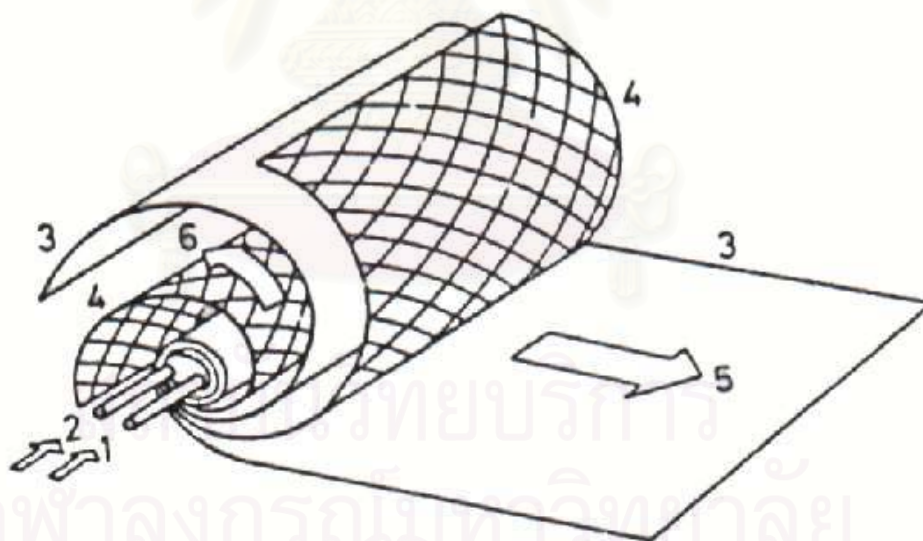
ตัวรองรับในเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ความพรุน (porosity) สูง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์ อาทิเช่น พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิซัลโฟน (PF) เป็นต้น เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนมีรูปแบบดังแสดงไว้ในรูป 2.7 เยื่อแผ่นเหลวแบบนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายเทมวลเนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อย



รูปที่ 2.7 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Komasawa et al., 1983)

2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแผ่นม้วน (spiral-type supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแผ่นม้วนที่พัฒนาขึ้นโดย Teramoto (Teramoto et al., 1987) แสดงไว้ดังรูปที่ 2.8 ตัวรองรับแบบแผ่นม้วนได้รับการพัฒนามาจากตัวรองรับแบบแผ่นโดยการม้วนท่อตัวรองรับแบบแผ่น ดังนั้น โมดูล (module) ของตัวรองรับแบบแผ่นม้วนจึงผลิตขึ้นโดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำและแผ่นตาข่าย (mesh spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อ นำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของโมดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี (epoxy) ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว (raffinate) และสารละลายสตริปที่ได้ออกจะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของโมดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้คือ โมดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายสตริปไม่ซับซ้อน แต่ยังมีข้อด้อยอยู่หลายประการได้แก่ การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวมีความยุ่งยากและซับซ้อน การตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวทำได้ยากกว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่น และเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวมีอายุการใช้งานจำกัด



รูปที่ 2.8 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Teramoto et al., 1987)

หมายเลขที่ 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน หมายเลขที่ 2 ทางเข้าของสารละลายสตริป

หมายเลขที่ 3 เยื่อแผ่นเหลว

หมายเลขที่ 4 แผ่นกั้น

หมายเลขที่ 5 สารละลายป้อน

หมายเลขที่ 6 สารละลายสตริป

2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane; HFSLM)

ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นตัวรองรับอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนามาจากตัวรองรับแบบแผ่น เริ่มแรกจะม้วนท่อตัวรองรับให้มีลักษณะเป็นท่อกลม (tubular tube) แต่พบว่าสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรยังมีค่าต่ำอยู่ จึงมีการพัฒนาเป็นการใช้เส้นใยกลวงซึ่งมีขนาดเล็ก แต่ใช้เส้นใยจำนวนมากมาประกอบเป็นหน่วยเดียวกัน ดังนั้นรูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงจึงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง (Yeng และ Cussler, 1986; Dahuron และ Cussler, 1988) และเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ (Danesi และ Rickert, 1986; Nakano et al., 1987; Tanikaki et al., 1988)

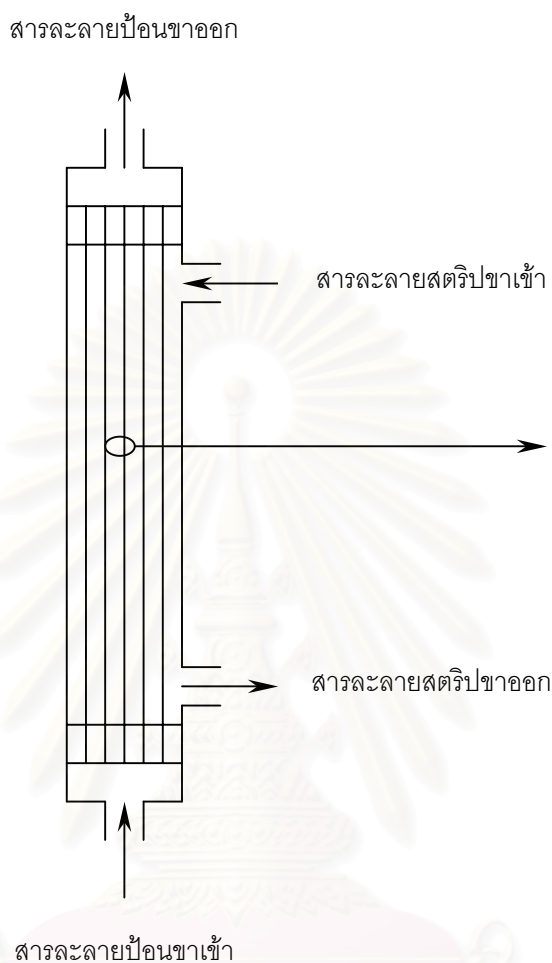
โมดูล (module) ของเส้นใยกลวงถูกผลิตในลักษณะที่นำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงในโมดูลรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของโมดูลด้วยเรซิน (resin) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยปกติเส้นใยกลวงมักเป็นตัวรองรับชนิดไม่ชอบน้ำ ดังนั้นเส้นใยกลวงจะถูกเคลือบฝังไว้ด้วยวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์ วัสดุภาคสารละลายของน้ำสองชนิดจะไหลภายในเส้นใยกลวง (lumen or tube side) และภายนอกเส้นใยกลวง (shell side)

2.3 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด (Tavlarides et al., 1987) ดังนี้

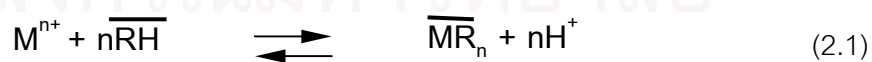
2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อยคือ สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant) และสารสกัดชนิดคีเลต (chelate extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-COOH$, $=P(O)OH$, $-SO_3H$ ส่วนประเภทหลังสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุ



รูปที่ 2.9 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Izatt, 1989)

บวกลสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารอินทรีย์ดังสมการ



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ นอกจากนั้นสมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็น

กรด-ต่างของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้น ๆ (Tavlarides et al., 1987)

สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (organic derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (monocarboxylic acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะกรดอัลคิลฟอสฟอริก (alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acids ; D2EHPA)

ส่วนสารสกัดประเภทคีเลทได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วยดอนเนอร์กรุป (donor groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลทเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียงสองประเภทคือ

(ก) -ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX

-สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA

-สารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA

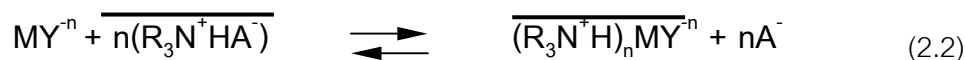
(ข) -ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้า Kelex

สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (acidic leach liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (alkaline)

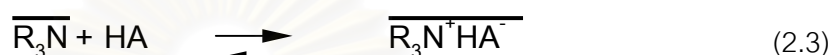
2.3.2 สารสกัดชนิดต่าง (Basic Extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะสัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (quaternary ammonium halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (primary; RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (secondary; R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (tertiary; R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (quaternary; R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วย

สารสกัดเอมีนขึ้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (anionic species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว $\overline{R_3N^+HA^-}$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ MY^{-n} จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการ (2.2) ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้เอมีนเป็นสารสกัดคือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ (ammonium cation และ anion) การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการ 2.4



การเกิดวัฏภาคที่สามของสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (modifiers) เช่น พวกแอลกอฮอล์ที่มีสูตรโครงสร้างแบบสายตรงยาว (long-chain aliphatic) (Tavlarides et al., 1987)

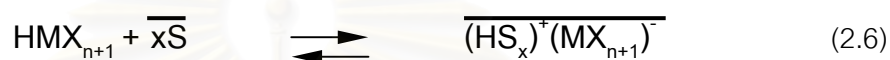
2.3.3 สารสกัดชนิดซอลเวท (Solvating Extractant)

สารสกัดประเภทซอลเวท (solvating) หรือสารสกัดประเภทกลาง (neutral) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะดอนเนอร์กรุป จึงไม่สามารถแตกโปรตรอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง

ความสามารถการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคของสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (central metal atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตรอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



หรือ



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดขอลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมตัวกันกับสารสกัดชนิดขอลเวทดังสมการ 2.5 และสมการ 2.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

กลไกการถ่ายมวล

บทนี้จะกล่าวถึงกลไกการถ่ายมวลแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวตั้งแต่การถ่ายเทมวลอย่างง่ายไปจนถึงซับซ้อน จากนั้นจะอธิบายกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ และสุดท้ายจะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาของการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ

3.1 กลไกการถ่ายเทมวล

ปกติกระบวนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน (Marr และ Kopp, 1982) ได้แก่

1. การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจากสารละลายป้อนไปยังที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว
2. การแพร่เข้าภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว
3. การแพร่ผ่านภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว
4. การแพร่ออกจากภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว
5. การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจากที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายสตริปกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายสตริป

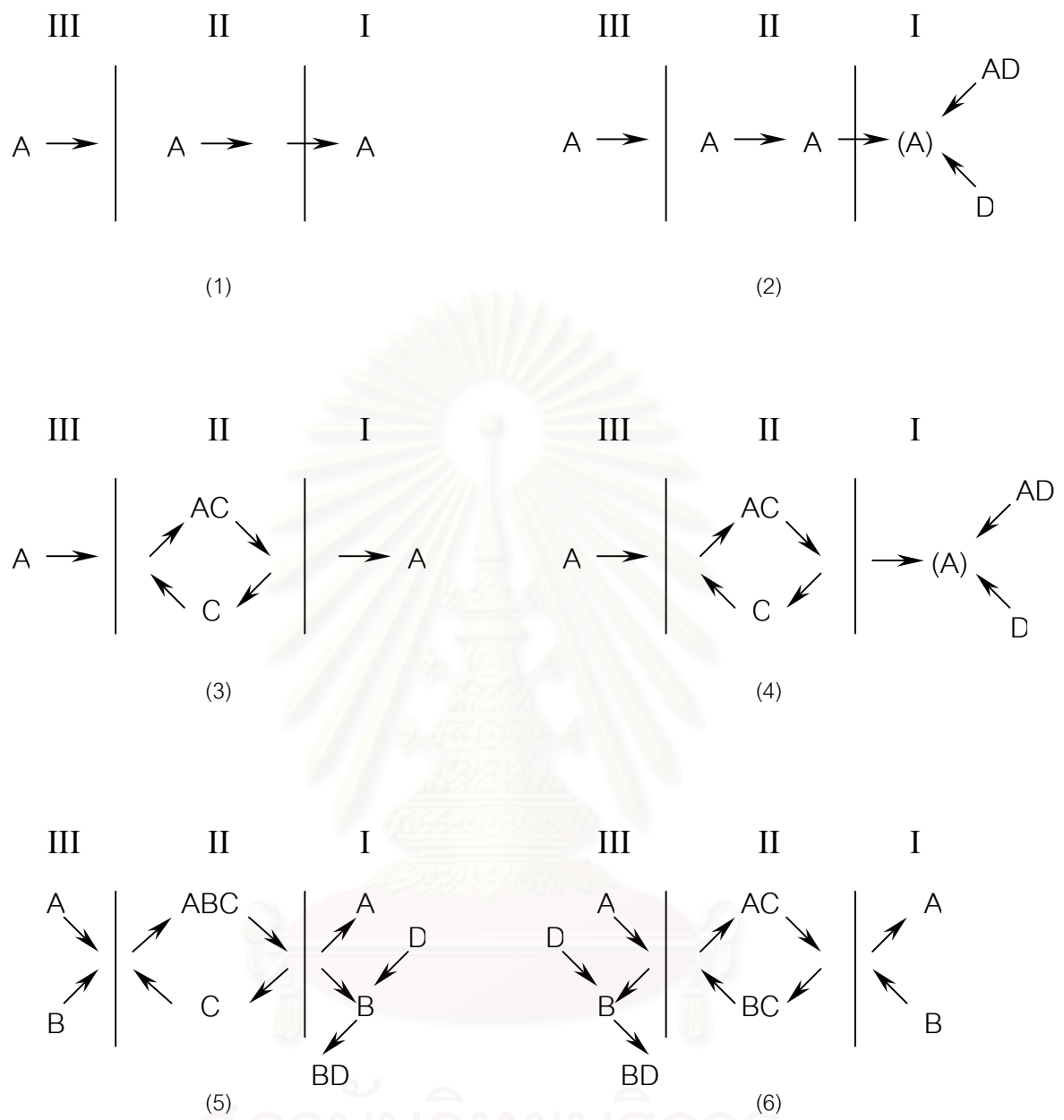
ถ้ากำหนดให้การแพร่ผ่านภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate determining step) กลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้เป็น 6 ประเภท (Marr และ Kopp, 1982) ได้แก่

3.1.1 การถ่ายเทมวลอย่างง่าย (simple permeation) การถ่ายเทมวลแบบนี้อาศัยความสามารถในการละลายขององค์ประกอบที่ต้องการแยกเท่านั้น การถ่ายเทมวลแบบนี้เริ่มโดยองค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ที่ละลายอยู่ในภูมิภาคสารละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้ของค์ประกอบที่ต้องการแยกจะละลายในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว แล้วจึงแพร่ผ่านภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวไปที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาค

เยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสไตริปโดยมีผลต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกเป็นแรงขับ จากนั้นองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะละลายในวัฏภาคสารละลายสไตริปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสไตริป และแพร่ไปยังสารละลายสไตริป ดังแสดงในรูป 3.1(1)

3.1.2 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายที่มีปฏิกิริยาเคมี (simple permeation with chemical reaction) การถ่ายเทมวลแบบนี้ปรับปรุงมาจากการถ่ายเทมวลอย่างง่าย กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้เริ่มโดยองค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะละลายในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว แล้วจึงแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสไตริปโดยมีผลต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกเป็นแรงขับ จากนั้นองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะละลายในวัฏภาคสารละลายสไตริปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสไตริป แล้วองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ D เกิดเป็นสารประกอบที่ไม่สามารถละลายได้ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (AD) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(2) การทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกในฝั่งสารละลาย สไตริปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายได้ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวทำให้แรงขับของการถ่ายเทมวลมีค่าสูงอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกมีค่าคงที่ กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้ได้รับความสนใจในการนำไปใช้แยกฟีนอลออกจากน้ำทิ้ง แต่การนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังเป็นเรื่องยาก เนื่องจากต้องใช้เวลานานเพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นสุดท้ายตามที่ต้องการ และปัญหาการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

3.1.3 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายโดยอาศัยสารสกัด (simple carrier transport) สารสกัดที่ใช้ต้องละลายได้เฉพาะในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและสามารถทำปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้ดังแสดงในรูป 3.1(3) อธิบายได้ดังนี้ องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้สารสกัด (C) ซึ่งละลายอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับองค์ประกอบที่ต้องการแยก (AC) จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านชั้นของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสไตริปโดยมีผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับ



รูปที่ 3.1 กลไกการถ่ายเทมวลแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบการเยื่อเหลว (Marr และ Kopp, 1982)

โดยที่ **I** หมายถึง ภูมิภาคสารละลายตริป **II** หมายถึง ภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว
III หมายถึง ภูมิภาคสารละลายป้อน

วิทยาศาสตร์ละลายสตริป สารประกอบเชิงซ้อนจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกแพร่ผ่านไปยังวิทยาศาสตร์ละลายสตริป ส่วนสารสกัดจะแพร่ย้อนกลับไปยังผิวสัมผัสแรกเพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกต่อไป

สารสกัดช่วยให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวได้ดีขึ้นและช่วยลดปัญหาการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทมวลจึงมีได้ขึ้นกับความแตกต่างของความเข้มข้นเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารสกัดในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวด้วย ข้อจำกัดของกลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้คือกระบวนการถ่ายเทมวลจะหยุดเมื่อความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกของวิทยาศาสตร์ทั้งสองฝั่งของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้การแยกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบให้มีหลายชั้นตอน

3.1.4 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายโดยอาศัยสารสกัดที่มีปฏิกิริยาเคมี (simple carrier transport with chemical reaction) กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้ปรับปรุงมาจากการถ่ายเทมวลอย่างง่ายโดยอาศัยสารสกัดโดยการใช้ข้อดีของการถ่ายเทมวลอย่างง่ายที่มีปฏิกิริยาเคมีมาช่วย ดังแสดงในรูปที่ 3.1(4) และสามารถอธิบายได้ดังนี้ องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ที่ละลายอยู่ในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสนี้สารสกัด (C) ที่ละลายอยู่ในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับองค์ประกอบที่ต้องการแยก (AC) จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านชั้นของวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายสตริปโดยมีผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายสตริป สารประกอบเชิงซ้อนจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกแพร่ผ่านไปยังวิทยาศาสตร์ละลายสตริป ส่วนสารสกัดจะแพร่ย้อนกลับไปยังผิวสัมผัสแรกเพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกต่อไป ขณะเดียวกันที่วิทยาศาสตร์ละลายสตริปองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ D เกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายในเยื่อแผ่นเหลว (AD) ดังนั้นจึงสามารถลดความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกในฝั่งวิทยาศาสตร์ละลายป้อนได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับกลไกการถ่ายเทมวลอย่างง่ายโดยอาศัยสารสกัด

กรณีของการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (couple transport) เยื่อแผ่นเหลวจะประกอบไปด้วยสารสกัดซึ่งทำหน้าที่ถ่ายเทมวลเมื่อมีองค์ประกอบสองชนิดอยู่ในเวลาเดียวกัน ถ้าการถ่ายเทมวล

ของทั้งสององค์ประกอบเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน จะเรียกกลไกนี้ว่า การถ่ายเทมวลแบบไปด้วยกัน (co-transport) ถ้าการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกันจะเรียกกลไกนี้ว่า การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (counter transport)

3.1.5 การถ่ายเทมวลแบบไปด้วยกัน (co-transport) องค์ประกอบสองชนิดจะถ่ายเทไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูป 3.1(5) กลไกการถ่ายเทมวลอธิบายได้ดังนี้ องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) และองค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกัน (B) ที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้สารสกัด(C) ที่ละลายอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยกและองค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (ABC) สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสตริปเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสตริปสารประกอบเชิงซ้อนจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับแล้วปล่อยองค์ประกอบทั้งสองไปยังสารละลายสตริปส่วนสารสกัดทำการแพร่ย้อนกลับไปยังผิวสัมผัสแรก ขณะเดียวกันที่วัฏภาคสารละลายสตริปองค์ประกอบที่ถ่ายเทมาด้วยกันจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ D เกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายในเยื่อแผ่นเหลว (BD) ถ้าองค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกัน (B) มีปริมาณมากเกินพอในวัฏภาคสารละลายป้อน องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) จะยังคงถ่ายเทผ่านชั้นเยื่อแผ่นเหลวไปได้ แม้ว่าความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกในด้านสารละลายสตริปมากกว่าด้านสารละลายป้อน

กระบวนการถ่ายเทมวลในทิศทางตรงข้ามกับผลต่างของความเข้มข้นเรียกว่า การสูบ (pumping) นอกจากนั้นยังสามารถลดความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกัน (B) ในวัฏภาคสารละลายป้อนจนเป็นศูนย์ได้โดยเลือกใช้ปฏิกิริยาที่เหมาะสมในวัฏภาคสารละลายสตริป ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายสตริปได้เกือบหมด แรงขับของกลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้คือผลต่างความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกัน(B) ระหว่างสารละลายทั้งสองด้าน

3.1.6 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (counter transport) องค์ประกอบสองชนิดที่ถ่ายเทไปในทิศทางตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 3.1(6) กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้สารสกัด (C) ที่ละลายอยู่ใน

ภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยก เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับองค์ประกอบที่ต้องการแยก (AC) จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อน (AC) ที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านชั้นของภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายสตรีปโดยมีผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายสตรีปสารประกอบเชิงซ้อน (AC) จะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ถ่ายเทสวนทาง (B) ได้สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดและองค์ประกอบที่ถ่ายเทสวนทาง (BC) และองค์ประกอบที่ต้องการแยก จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อน (BC) จะแพร่ย้อนกลับไปยังผิวสัมผัสแรก ขณะที่องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะแพร่ผ่านไปยังภูมิภาคสารละลายสตรีป ถ้าองค์ประกอบที่ถ่ายเทสวนทางในภูมิภาคสารละลายสตรีป (B) มีปริมาณมากพอ จะช่วยให้การถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากภูมิภาคสารละลายป้อนไปยังภูมิภาคสารละลายสตรีปเกิดได้อย่างสมบูรณ์

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมและอุตสาหกรรม จะพบว่า (Marr และ Kopp, 1982)

กลไกแบบที่ 1 ไม่ได้รับความสนใจเพราะขาดประสิทธิภาพ

กลไกแบบที่ 2 เหมาะสำหรับใช้แยกไฮโดรคาร์บอนออกจากน้ำเสีย

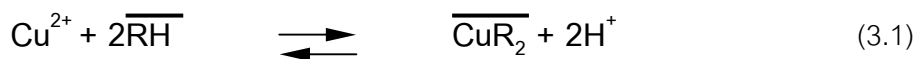
กลไกแบบที่ 3 และ 4 ยังคงมีข้ออยู่ในกรณีเฉพาะ

กลไกแบบที่ 5 และ 6 ได้รับความสนใจมาก เช่น นำมาใช้ในการนำไอออนโลหะจากน้ำเสียและน้ำที่ได้จากกระบวนการสกัดโลหะด้วยสารละลายของน้ำ (hydrometallurgical process) กลับมาใช้ใหม่

3.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่

การถ่ายเทมวลแบบควบคู่คือ กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากภูมิภาคสารละลายป้อนไปยังภูมิภาคสารละลายสตรีป โดยใช้ผลต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบอีกชนิดหนึ่งเป็นแรงขับของการถ่ายเทมวล เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในกรณีนี้ประกอบไปด้วยของเหลวที่ไม่ละลายน้ำ (ภูมิภาคสารละลายอินทรีย์) ที่มีสารสกัดซึ่งเลือกทำปฏิกิริยาเฉพาะกับไอออนที่ต้องการแยกเท่านั้น โดยภูมิภาคสารละลายอินทรีย์จะถูกเคลือบฝังไว้ในรูพรุนของตัวรองรับพอลิเมอร์เกิดเป็นภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกั้นระหว่างภูมิภาคสารละลายของน้ำทั้งสองของภูมิภาค

สำหรับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในกระบวนการถ่ายเทมวลแบบควบคุมของไอออนทองแดงแสดงในรูป 3.2 สมดุลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายของน้ำทั้งสองฝั่ง คือ



โดยการเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปในทิศทางใดขึ้นอยู่กับสภาวะของระบบ

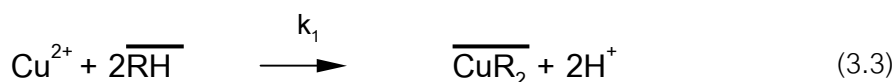
กระบวนการถ่ายเทมวลแบบควบคุมของไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ไอออนทองแดงที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

2. ไอออนทองแดง (Cu^{2+}) จะทำปฏิกิริยากับสารสกัด (RH) ได้ไฮโดรเนียมไอออน (H^+) และสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่มีประจุของไอออนทองแดงกับสารสกัด (CuR_2) ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัส 1 ของรูป 3.2) ดังสมการสมดุล



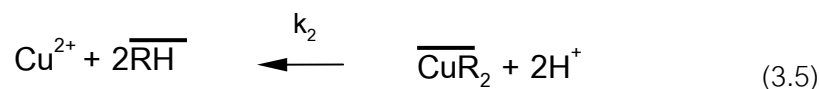
โดยที่ k_1 คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และ k_2 คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ไอออนทองแดง (Cu^{2+}) ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะถูกสกัดโดยสารสกัด (RH) เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าดังสมการเคมี



ดังนั้นอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนคือ

$$-r_{\text{c,forward}} = k_1[\text{Cu}^{2+}][\text{RH}]^2 \quad (3.4)$$

สำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนกับไฮโดรเนียมไอออนที่ผิวสัมผัสระหว่าง
 ภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวตั้งสมการเคมี



อัตราการเกิดไอออนทองแดงในภูมิภาคสารละลายป้อนจะเป็น

$$r_{c,\text{reverse}} = k_2[\text{CuR}_2][\text{H}^+]^2 \quad (3.6)$$

ถ้าคุณสมการนี้ทั้งสองฝั่งด้วย -1 จะได้สมการแสดงอัตราการหายไปของไอออนทองแดงใน
 ภูมิภาคสารละลายป้อนสำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับดังนี้

$$-r_{c,\text{reverse}} = -k_2[\text{CuR}_2][\text{H}^+]^2 \quad (3.7)$$

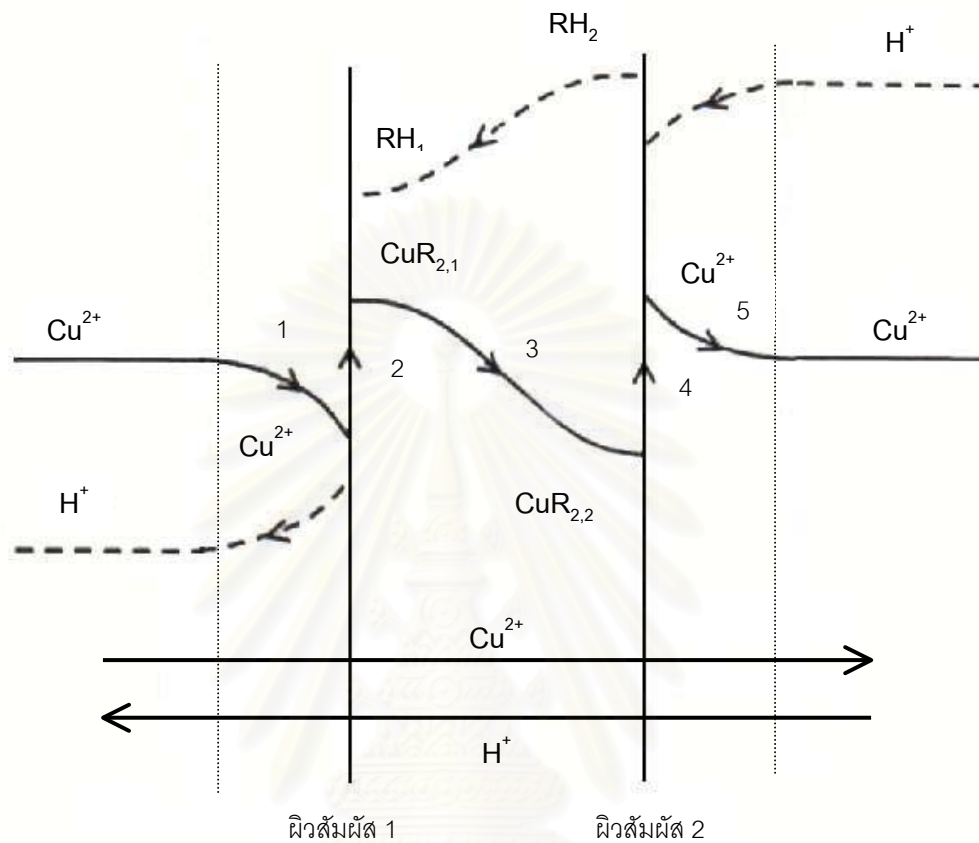
ดังนั้นอัตราการหายไปของไอออนทองแดงจากภูมิภาคสารละลายป้อนสุทธิ คือ

$$-r_c = -r_{c,\text{net}} = -(r_{c,\text{forward}} + r_{c,\text{reverse}}) \quad (3.8)$$

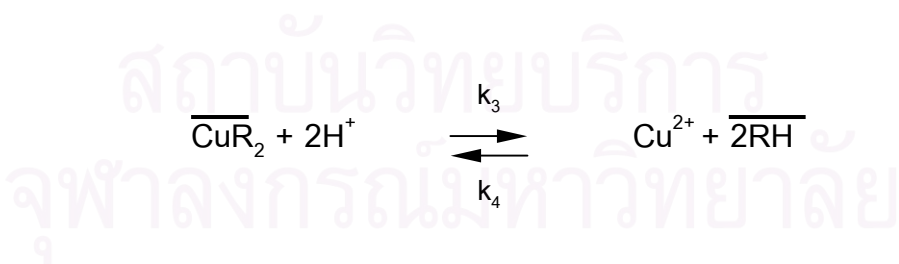
$$-r_c = k_1[\text{Cu}^{2+}][\text{RH}]^2 - k_2[\text{CuR}_2][\text{H}^+]^2 \quad (3.9)$$

3. สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะละลายได้ในภูมิภาคสารละลายอินทรีย์เท่านั้นจะแพร่
 ผ่านชั้นของภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายสตรีกับภูมิภาค
 เยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัส 2 ของรูปที่ 3.2) เนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน
 เป็นแรงขับ ขณะเดียวกันไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นจะแพร่จากผิวสัมผัส 1 ไปยังภูมิภาค
 สารละลายป้อนเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน

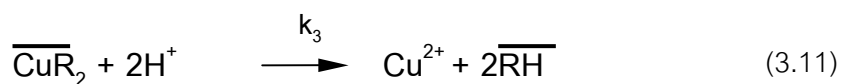
4. สารประกอบเชิงซ้อนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนได้ไอออนทองแดงและสารสกัด
 ที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายสตรี (ผิวสัมผัส 2 ของรูปที่ 3.2) ดัง
 สมการสมดุล



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในกระบวนการถ่ายเทมวลแบบควบคุมคู่ของการถ่ายเทมวลแบบควบคุมคู่ของไอออนทองแดง (Komasawa et al., 1993)



โดยที่ k_3 คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและ k_4 คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ สารประกอบเชิงซ้อนในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวจะถูกสตริปโดยไฮโดรเนียมไอออนเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ไอออนทองแดงดังสมการ



อัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสตริปจะเป็น

$$r_{c,\text{forward}} = k_3[\text{CuR}_2][\text{H}^+]^2 \quad (3.12)$$

สำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับระหว่างไอออนทองแดงและสารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายสตริปกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวดังสมการเคมี



อัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสตริปคือ

$$-r_{c,\text{reverse}} = k_4[\text{Cu}^{2+}][\text{RH}]^2 \quad (3.14)$$

ถ้าคุณสมการนี้ทั้งสองฝั่งด้วย -1 จะได้สมการที่แสดงอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสตริปสำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับดังนี้

$$r_{c,\text{reverse}} = -k_4[\text{Cu}^{2+}][\text{RH}]^2 \quad (3.15)$$

ดังนั้นอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสตริปสุทธิคือ

$$r_c = r_{c,\text{net}} = r_{c,\text{forward}} + r_{c,\text{reverse}} \quad (3.16)$$

$$r_c = k_3[\text{CuR}_2][\text{H}^+]^2 - k_4[\text{Cu}^{2+}][\text{RH}]^2 \quad (3.17)$$

5. สารสกัดที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะแพร่ย้อนกลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อนโดยอาศัยผลต่างความเข้มข้นของสารสกัด ขณะเดียวกันไอออนทองแดงที่เกิดขึ้นจะแพร่จากผิวสัมผัส 2 ไปยังวัฏภาคสารละลายสตริป เนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไอออนทองแดง

ดังนั้นไอออนทองแดงจึงเคลื่อนที่จากฝั่งสารละลายป้อนไปยังฝั่งสารละลายสตริปและไฮโดรเนียมไอออนจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อช่วยรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าของ

ระบบ โดยมีผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างภูมิภาคสลายป้อนกับภูมิภาคสลายสตริปเป็นแรงขับของการถ่ายเทมวล (Marr และ Kopp, 1982; Schultz, 1988; O' Hara, 1989)

3.3 งานวิจัยที่ผ่านมา

อิศรา เกษมเศรษฐ (1998) ได้ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายเจือจางมากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการสกัดนี้ อันได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 25 โดยปริมาตร ชนิดของสารสกัดซึ่งได้แก่ สารสกัด D2EHPA สารสกัด LIX84-I และสารสกัด LIX860-I ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนช่วง 1 ส่วนในหนึ่งล้านส่วน ถึง 100 ส่วนในหนึ่งล้านส่วน รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวง การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของภูมิภาคสลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ และการไหลเวียน (circulation) ของภูมิภาคสลายสตริป

จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว สารสกัดในกลุ่ม LIX สามารถถ่ายเทไอออนทองแดงได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในลักษณะไหลในฝั่งท่อกับไหลในฝั่งเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะเพิ่มขึ้นเมื่อควบคุมความเป็นกรด-ด่างของภูมิภาคสลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ให้มีค่าเท่ากับ 5 การใช้ภูมิภาคสลายสตริปในปริมาณน้อยและให้มีการไหลเวียนยังคงทำให้การถ่ายเทไอออนทองแดงเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม และผลของการใช้ ภูมิภาคสลายสตริปในปริมาณน้อยสามารถทำให้สารละลายสตริปมีความเข้มข้นของไอออนทองแดงสูงขึ้น

CHING-YEH SHIAU และ PAI-ZON CHEN (1993) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ทางทฤษฎีในการสกัดไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริกเป็นตัวพา (Carrier) เนื่องจากความเข้าใจในเรื่องการสกัดไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบระบบการสกัดแบบ

เยื่อแผ่นเหลว จึงได้เสนอแบบจำลองที่ถูกต้อง (Rigorous model) และแบบจำลองอย่างง่าย (Simple model) ที่มีการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeation coefficient) และไม่มี การเปลี่ยนแปลง โดยมีการสกัดแบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบไหลผ่านครั้งเดียว (Once-through mode) และแบบไหลวนกลับ (Recycling mode) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมี การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน แบบจำลองทั้งสองจะให้ผลการทดลองที่มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองอย่างง่ายสามารถนำไปใช้ในการคำนวณระบบงานจริงได้ จาก การวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของไอออน ทองแดง และขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการสกัด (Rate-controlling step) คือ การแพร่ผ่าน เยื่อแผ่นเหลวและการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลาย

RUEY-SHIN JUANG และ JIANN-DER JIANG (1994) ได้ศึกษากลไกที่ควบคุม อัตราการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวนับตัวรองรับที่มีกรดได-2-เอทิลเฮกซิล ฟอสฟอริกเป็นตัวพา จึงได้เสนอแบบจำลองของการซึมผ่านซึ่งพิจารณาการแพร่ของไอออน โคบอลต์ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายไปยังเยื่อแผ่นเหลว , ปฏิกริยาเคมีระหว่างไอออนโคบอลต์ และกรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริกที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนเข้ากับเยื่อแผ่นเหลว และ การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโคบอลต์และกรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก ผ่านเยื่อแผ่นเหลว จากผลการทดลองพบว่าอัตราการซึมผ่านที่คำนวณได้จากแบบจำลองได้ ผลลัพธ์ที่ดีกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง (มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมาตรฐานโดยเฉลี่ยเพียง 12%) กลไกที่ควบคุมอัตราการซึมผ่านในกระบวนการจะหาได้โดยการเปรียบเทียบสัดส่วนของ ความต้านทานในการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลาย , ความต้านทานในการเกิดปฏิกิริยาที่ ผิวสัมผัส และความต้านทานในการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

MASAAKI TERAMOTO ,NORIAKI OHNISHI และ HIDETO MATSUYAMA (1994) ได้ศึกษาผลกระทบของการไหลวนกลับอย่างต่อเนื่อง (Recycling) ของสารละลายป้อนเข้าจาก ทางออกไปสู่ทางเข้าของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบเพลตและเฟรม (Plate and frame) ต่อการนำกลับมาของไอออนสังกะสี ภายใต้สภาวะที่ความต้านทานการถ่ายเทมวล ด้านสารละลายป้อนเข้ามีความสำคัญ และใช้กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริกเป็นตัวพา จาก การทดลองพบว่าอัตราการไหลและการไหลวนกลับอย่างต่อเนื่องของสารละลายป้อนเข้ามีผล กระทบต่อการปรับปรุงการนำกลับมาของไอออนสังกะสี เนื่องจากการไหลวนกลับจะเกี่ยวข้องกับ การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลทางด้านสารละลายป้อนเข้า และได้มี การเสนอแบบจำลองทางทฤษฎีเพื่อนำไปทำนายโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง

บทที่ 4

การทดลองและวิธีพัฒนาแบบจำลอง

บทนี้จะกล่าวถึง สารเคมีที่ใช้ และอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงรูปแบบการทดลอง และการพัฒนาโปรแกรม เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงานของสารสกัดไอออนทองแดงด้วย เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใย กลวงหลายชั้นต่อน

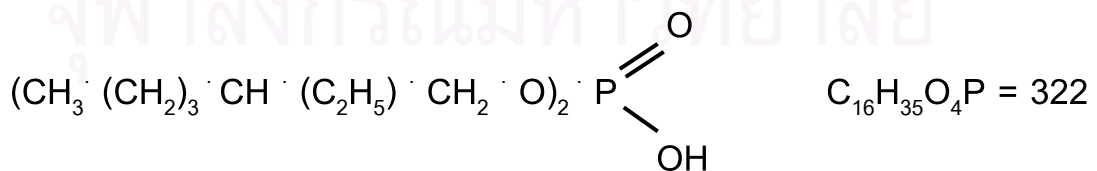
4.1 สารเคมีที่ใช้

สารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อ	สูตรเคมี	ข้อกำหนด
ไอออนโลหะ	คอปเปอร์ซัลเฟต	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1-1,000 ppm , pH 3-7
สารละลายผลิตภัณฑ์	ซัลฟิวริก	H_2SO_4	0.1 โมลต่อลิตร
สารสกัด	D2EHPA	$\text{C}_{16}\text{H}_{35}\text{O}_4\text{P}$	1-20 %v/v
สารละลายอินทรีย์	เคโรซีน	-	-

สารสกัดที่ใช้มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงสูตรโครงสร้างของ D2EHPA ซึ่งเป็นสารสกัดที่ใช้

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสกัด

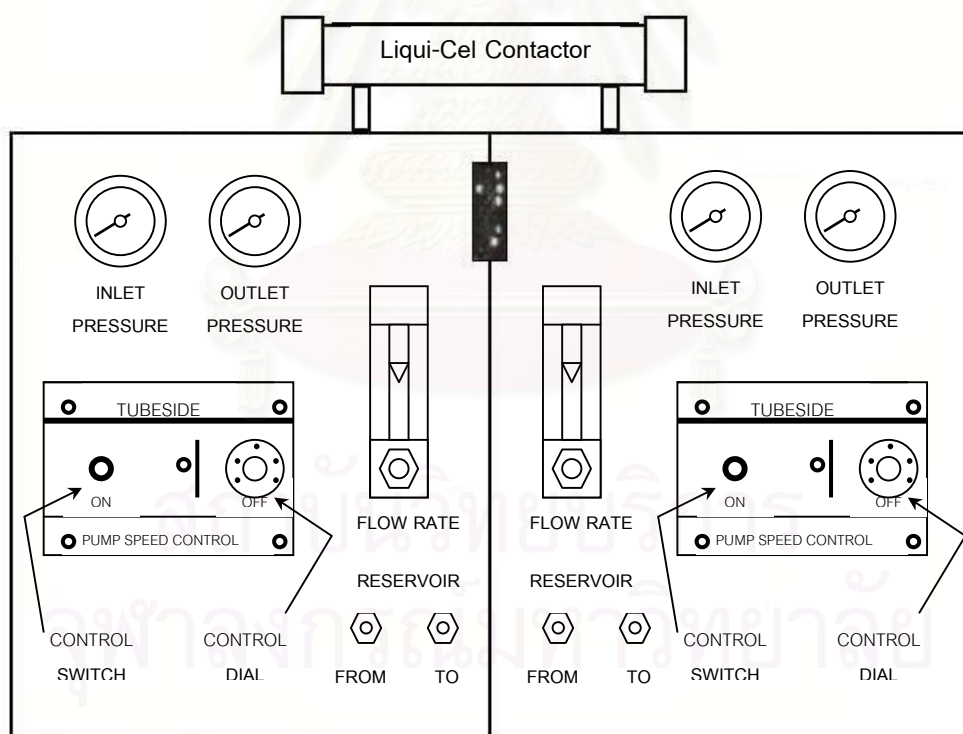
1. ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Laboratory แสดงไว้ในรูป 4.2 ประกอบด้วยเครื่องสูบลมสองชุดที่มีอัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่ออนาที ชุดควบคุมความเร็วสองชุด มาตรฐานอัตราการไหลสองชุด และมาตรฐานวัดความดันสองชุด

2. ตัวรองรับได้แก่ เส้นใยกลวงพอลิโพรพิลีน (polypropylene) ชนิดมีรูพรุน Celgard[®] X-30 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นโมดูลของเส้นใยกลวงดังแสดงในรูป 4.3 และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 4.2

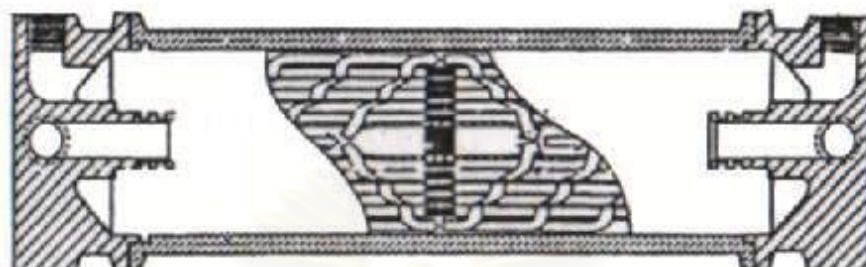
3. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง HI 8417 Microprocessor Bench pH/ °C Meter ของบริษัท Hanna Instrument

4. เครื่อง ATOMIC ABSORPTION/FLAME EMISSION SPECTROPHOTOMETER AA-670 ของบริษัท Shimadzu

5. เครื่อง AA spectrometer UNICAM 989 QZ ของบริษัท UNICAM



รูปที่ 4.2 แสดงอุปกรณ์ชุด Liqui-Cel[®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลอง (Hoechst Celanese Corporation, 1995)



รูปที่ 4.3 โมดูลของเส้นใยกลาง (Hoechst Celanese Corporation, 1995)

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของโมดูลเส้นใยกลาง (Hoechst Celanese Corporation, 1995)

คุณสมบัติ	ข้อกำหนด
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง	240 ไมโครเมตร
ความหนาของผนังของเส้นใยกลาง	30 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลาง	30%
พื้นที่ผิวสัมผัสที่กำหนดของโมดูลเส้นใยกลาง	1.4 ตารางเมตร
พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร	29.3 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ขนาดของโมดูล (เส้นผ่านศูนย์กลางxความยาว)	6.3x20.3 เซนติเมตร (2.5x8 นิ้ว)
ความดันคร่อมระหว่างเยื่อแผ่นเหลวสูงสุด	4.1 บาร์ (60 psi)
อุณหภูมิของการดำเนินการ	1-60 องศาเซลเซียส

4.3 รูปแบบการทดลอง

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นจึงมีรูปแบบการทดลอง 2 แบบ ดังนี้

1. การสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียว (1 คอลัมน์)
2. การสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอน (2 และ 3 คอลัมน์)

รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการทดลองแรก ซึ่งทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง ส่วนรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงรูปแบบการทดลองแบบที่ 2 ซึ่งทำการศึกษาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 และ 3 คอลัมน์ เพื่อเปรียบเทียบกับ การสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียว

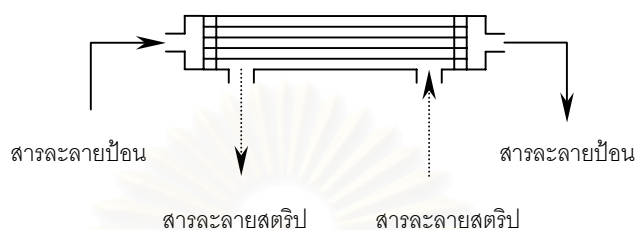
4.3.1 รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเครื่องการสกัดแบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียว

1. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนทองแดง

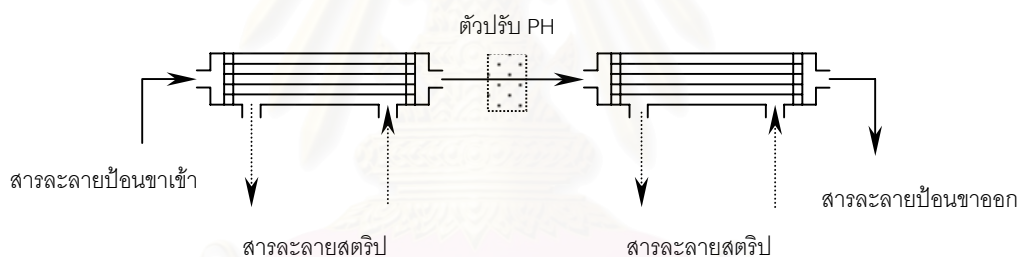
1.1 กำหนดสภาวะเริ่มต้นก่อนคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดง โดยให้ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนคือ 100 ppm ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเท่ากับ 7 ส่วนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA คือ 1 %v/v อัตราการไหลของสารละลายป้อน คือ 200 มิลลิลิตรต่ออนาที และปริมาตรของสารละลายป้อน คือ 10 ลิตร

1.2 เมื่อเริ่มดำเนินการคำนวณร้อยละการสกัดไอออนทองแดง วัฏภาคสารละลายป้อนจะไหลผ่านในฝั่งท่อ (tube side) ของโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับวัฏภาคสารละลายสตริปที่จะไหลผ่านในฝั่งเปลือก (shell side) ของโมดูลเส้นใยกลวงในลักษณะไหลสวน

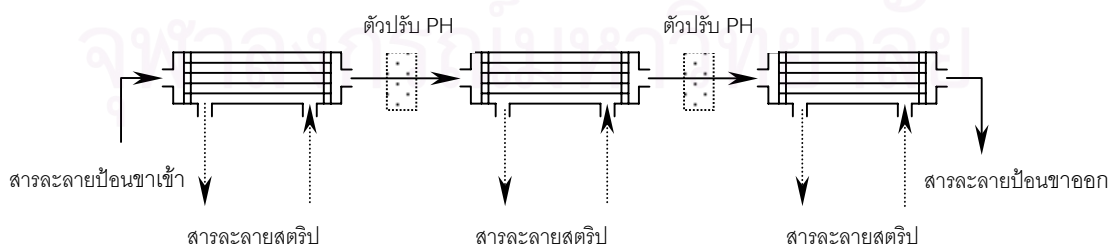
ทางกับวัฏภาคสารละลายป้อน (counter current flow) และวัฏภาคทั้งสองชนิดมีลักษณะการไหลแบบผ่านครั้งเดียว (one-through mode) ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียว



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์



รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์

1.3 ใช้โปรแกรมทำการคำนวณทุก ๆ 1 , 2 และ 4 เซนติเมตร คำนวณหาร้อยละ การสกัดและสตรีปของไอออนทองแดงตั้งแต่เริ่มป้อนวัฏภาคทั้งสองชนิดจนกระทั่งปริมาตรของ สารละลายป้อนหมด จึงจะหยุดการคำนวณ บันทึกข้อมูลที่ได้

1.4 ทำการคำนวณซ้ำ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 2 , 3 , 4 , 5 , 10 , 15 , 20 , 25 %v/v ตามลำดับ แล้วบันทึกข้อมูล

1.5 ทำการคำนวณซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1.1-1.4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของไอออน ทองแดงในสารละลายป้อน เป็น 10 , 50 , 300 , 500 , 1000 ppm และใช้โปรแกรมทำการคำนวณ ทุก ๆ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ แล้วบันทึกข้อมูล

1.6 นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปสร้างกราฟ เพื่อทำการวิเคราะห์

2. การศึกษาผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออน ทองแดง

2.1 กำหนดสภาวะเริ่มต้นก่อนคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดง โดยให้ ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนคือ 1 ppm ความเป็นกรด-ด่างของ สารละลายป้อนเท่ากับ 7 ส่วนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA คือ 1 %v/v อัตราการไหลของ สารละลายป้อน คือ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาตรของสารละลายป้อน คือ 10 ลิตร

2.2 เมื่อเริ่มดำเนินการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดง วัฏภาค สารละลายป้อนจะไหลผ่านในฝั่งท่อ (tube side) ของโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับวัฏภาค สารละลายสตรีปที่จะไหลผ่านในฝั่งเปลือก (shell side) ของโมดูลเส้นใยกลวงในลักษณะไหลสวน ทางกับวัฏภาคสารละลายป้อน (counter current flow) และวัฏภาคทั้งสองชนิดมีลักษณะการไหล แบบผ่านครั้งเดียว (one-through mode) ดังแสดงในรูปที่ 4.4

2.3 ใช้โปรแกรมทำการคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร คำนวณหาร้อยละการสกัด และสตรีปของไอออนทองแดงตั้งแต่เริ่มป้อนวัฏภาคทั้งสองชนิดจนกระทั่งปริมาตรของ สารละลายป้อนหมด จึงจะหยุดการคำนวณ บันทึกข้อมูลที่ได้

2.4 ทำการคำนวณซ้ำ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงใน สารละลายป้อนเป็น 5 , 7.5 , 10 , 50 , 100 , 200 , 300 , 400 , 500 , 1000 ppm ตามลำดับ แล้วบันทึกข้อมูล

2.5 ทำการคำนวณซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 2.1-2.4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 3 , 5 , 10 และ 25 %v/v และใช้โปรแกรมทำการคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร ตาม ลำดับ แล้วบันทึกข้อมูล

2.6 นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปสร้างกราฟ เพื่อทำการวิเคราะห์

3. การศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง

3.1 กำหนดสภาวะเริ่มต้นก่อนคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดง โดยให้ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนคือ 1 ppm ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเท่ากับ 1 ส่วนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA คือ 1 %v/v อัตราการไหลของสารละลายป้อน คือ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาตรของสารละลายป้อน คือ 10 ลิตร

3.2 เมื่อเริ่มดำเนินการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดง วัฏภาคสารละลายป้อนจะไหลผ่านในฝั่งท่อ (tube side) ของโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับวัฏภาคสารละลายสตริปที่จะไหลผ่านในฝั่งเปลือก (shell side) ของโมดูลเส้นใยกลวงในลักษณะไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายป้อน (counter current flow) และวัฏภาคทั้งสองชนิดมีลักษณะการไหลแบบผ่านครั้งเดียว (one-through mode) ดังแสดงในรูปที่ 4.4

3.3 ใช้โปรแกรมทำการคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร คำนวณหาร้อยละการสกัดและสตริปของไอออนทองแดงตั้งแต่เริ่มป้อนวัฏภาคทั้งสองชนิดจนกระทั่งปริมาตรของสารละลายป้อนหมด จึงจะหยุดการคำนวณ บันทึกข้อมูลที่ได้

3.4 ทำการคำนวณซ้ำ โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน เป็น 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 8 ตามลำดับ แล้วบันทึกข้อมูล

3.5 ทำการคำนวณซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 3.1-3.4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 3 , 5 , 10 และ 15 %v/v และใช้โปรแกรมทำการคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ แล้วบันทึกข้อมูล

3.6 นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปสร้างกราฟ เพื่อทำการวิเคราะห์

4. การศึกษาผลของอัตราการไหลในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง

4.1 กำหนดสภาวะเริ่มต้นก่อนคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดง โดยให้ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนคือ 1 ppm ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเท่ากับ 7 ส่วนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA คือ 1 %v/v อัตราการไหลของสารละลายป้อน คือ 1 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาตรของสารละลายป้อน คือ 0.05 ลิตร

4.2 เมื่อเริ่มดำเนินการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดง วัฏภาคสารละลายป้อนจะไหลผ่านในฝั่งท่อ (tube side) ของโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับวัฏภาค

สารละลายสไตริปที่จะไหลผ่านในฝั่งเปลือก (shell side) ของโมดูลเส้นใยกลวงในลักษณะไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายป้อน (counter current flow) และวัฏภาคทั้งสองชนิดมีลักษณะการไหลแบบผ่านครั้งเดียว (one-through mode) ดังแสดงในรูปที่ 4.4

4.3 ใช้โปรแกรมทำการคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร คำนวณหาร้อยละการสกัดและสไตริปของไอออนทองแดงตั้งแต่เริ่มป้อนวัฏภาคทั้งสองชนิดจนกระทั่งปริมาตรของสารละลายป้อนหมด จึงจะหยุดการคำนวณ บันทึกข้อมูลที่ได้

4.4 ทำการคำนวณซ้ำ โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนและปริมาตรของสารละลายป้อนเป็น 5 , 10 , 50 , 100 , 200 , 500 , 1000 มิลลิลิตรต่อนาที และ 0.25 , 0.5 , 2.5 , 5 , 10 , 15 , 25 , 50 ลิตร ตามลำดับ แล้วบันทึกข้อมูล

4.5 ทำการคำนวณซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 4.1-4.4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 2 , 3 , 5 และ 10 %v/v และใช้โปรแกรมทำการคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ แล้วบันทึกข้อมูล

4.6 นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปสร้างกราฟ เพื่อทำการวิเคราะห์

4.3.2 รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายขั้นตอน

1. รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์

1.1 กำหนดสภาวะเริ่มต้นของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์ที่ 1 ซึ่งได้แก่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน คือ 100 ppm ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์ทั้งสอง คือ 7 อัตราการไหลของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์ทั้งสอง คือ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาตรของสารละลายป้อน คือ 10 ลิตร

1.2 กำหนดคุณสมบัติและสภาวะเริ่มต้นของการสกัดแบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทั้งสองคอลัมน์ ได้แก่ พื้นที่ผิวสัมผัสของโมดูล คือ 14000 ตารางเซนติเมตร ความพรุนของเส้นใยกลวงเท่ากับ 1 ความยาวของโมดูล คือ 20 เซนติเมตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA คือ 1 %v/v

1.3 เมื่อเริ่มดำเนินการคำนวณร้อยละการสกัดไอออนทองแดง วัฏภาคสารละลายป้อนจะไหลผ่านในฝั่งท่อ (tube side) ของโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับวัฏภาคสารละลายสไตริปที่จะไหลผ่านในฝั่งเปลือก (shell side) ของโมดูลเส้นใยกลวงในลักษณะไหลสวน

ทางกับวัฏภาคสารละลายป้อน (counter current flow) และวัฏภาคทั้งสองชนิดมีลักษณะการไหลแบบผ่านครั้งเดียว (one-through mode) ดังแสดงในรูปที่ 4.5

1.4 ใช้โปรแกรมทำการคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร คำนวณหาร้อยละการสกัดและสตรีปของไอออนทองแดงตั้งแต่เริ่มป้อนวัฏภาคทั้งสองชนิดจนกระทั่งปริมาตรของสารละลายป้อนหมด จึงจะหยุดการคำนวณ บันทึกข้อมูลที่ได้

1.5 ทำการคำนวณซ้ำ โดยเปลี่ยนสภาวะเริ่มต้นของทั้งสองคอลัมน์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 แล้วบันทึกข้อมูล

1.6 นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปสร้างกราฟ เพื่อทำการวิเคราะห์และนำไปเปรียบเทียบกับกราฟสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียว

ตารางที่ 4.3 แสดงสภาวะเริ่มต้นก่อนการคำนวณในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์

การทดลอง	C_{in}^f (ppm)	PH of feed	%D2EHPA(%v/v)	Q^f (ml/min.)	x(cm)	A(m ²)	ϵ
1	100	7, 7*	1, 1*	200, 200*	20, 20 *	1.4, 1.4*	1, 1*
2	100	7, none*	1, 1*	200, 200*	20, 20 *	1.4, 1.4*	1, 1*
3	100	7, 7*	2, 2*	200, 200*	20, 20 *	1.4, 1.4*	1, 1*
4	100	7, 7*	3, 3*	200, 200*	20, 20 *	1.4, 1.4*	1, 1*
5	100	7, 7*	4, 4*	200, 200*	20, 20*	1.4, 1.4*	1, 1*
6	100	7, 7*	5, 5*	200, 200*	20, 20*	1.4, 1.4*	1, 1*

* ตัวเลขแรก คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 1

ตัวเลขที่สอง คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 2 (none หมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง PH ของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์)

2. รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์

2.1 กำหนดสภาวะเริ่มต้นของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์ที่ 1 ซึ่งได้แก่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน คือ 100 ppm ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์ทั้งสาม คือ 7 อัตราการไหลของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์ทั้งสาม คือ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาตรของสารละลายป้อน คือ 10 ลิตร

2.2 กำหนดคุณสมบัติและสภาวะเริ่มต้นของการสกัดแบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทั้งสามคอลัมน์ ได้แก่ พื้นที่ผิวสัมผัสของโมดูล คือ 14000 ตารางเซนติเมตร ความพรุนของเส้นใยกลวงเท่ากับ 1 ความยาวของโมดูล คือ 20 เซนติเมตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA คือ 1 %v/v

2.3 เมื่อเริ่มดำเนินการคำนวณร้อยละการสกัดไอออนทองแดง วัฏภาคสารละลายป้อนจะไหลผ่านในฝั่งท่อ (tube side) ของโมดูลเส้นใยกลวง พร้อมกับวัฏภาคสารละลายสตริปที่จะไหลผ่านในฝั่งเปลือก (shell side) ของโมดูลเส้นใยกลวงในลักษณะไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายป้อน (counter current flow) และวัฏภาคทั้งสองชนิดมีลักษณะการไหลแบบผ่านครั้งเดียว (one-through mode) ดังแสดงในรูปที่ 4.6

2.4 ใช้โปรแกรมทำการคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร คำนวณหาร้อยละการสกัดและสตริปของไอออนทองแดงตั้งแต่เริ่มป้อนวัฏภาคทั้งสองชนิดจนกระทั่งปริมาตรของสารละลายป้อนหมด จึงจะหยุดการคำนวณ บันทึกผลที่ได้

2.5 ทำการคำนวณซ้ำ โดยเปลี่ยนสภาวะเริ่มต้นของทั้งสามคอลัมน์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แล้วบันทึกข้อมูล

2.6 นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดไปสร้างกราฟ เพื่อทำการวิเคราะห์และนำไปเปรียบเทียบกับ การสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงขั้นตอนเดียวและแบบ 2 คอลัมน์

4.4 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อการคำนวณ

ในกระบวนการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงขั้นตอนเดียวซึ่งใช้ D2EHPA เป็นสารสกัด มีกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงผ่านผนังเส้นใยกลวงแสดงให้เห็นดังแสดงในรูปที่ 3.2 อยู่ 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) การแพร่ของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนผ่านชั้นฟิล์มไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของสารละลายป้อนกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว

ขั้นตอนที่ 2) อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของสารละลายป้อนกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว

ขั้นตอนที่ 3) การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงจากผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อนไปยังผิวสัมผัสด้านสารละลายสตริป

ตารางที่ 4.4 แสดงสภาวะเริ่มต้นก่อนการคำนวณในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พวยด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์

การทดลอง	C_{in}^f (ppm)	PH of feed	%D2EHPA (%v/v)	Q^f (ml/min.)	x(cm)	A(m ²)	ϵ
1	100	7, 7, 7*	1, 1, 1*	200, 200, 200*	20, 20, 20 *	1.4, 1.4, 1.4*	1, 1, 1*
2	100	7, none, none*	1, 1, 1*	200, 200, 200*	20, 20, 20 *	1.4, 1.4, 1.4*	1, 1, 1*
3	100	7, 7, 7*	2, 2, 2*	200, 200, 200*	20, 20, 20 *	1.4, 1.4, 1.4*	1, 1, 1*
4	100	7, 7, 7*	3, 3, 3*	200, 200, 200*	20, 20, 20 *	1.4, 1.4, 1.4*	1, 1, 1*
5	100	7, 7, 7*	4, 4, 4*	200, 200, 200*	20, 20, 20 *	1.4, 1.4, 1.4*	1, 1, 1*
6	100	7, 7, 7*	5, 5, 5*	200, 200, 200*	20, 20, 20 *	1.4, 1.4, 1.4*	1, 1, 1*

* ตัวเลขแรก คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 1

ตัวเลขที่สอง คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 2 (none หมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง PH ของสารละลายก่อนเข้าคอลัมน์)

ตัวเลขที่สาม คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 3 (none หมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง PH ของสารละลายก่อนเข้าคอลัมน์)

ขั้นตอนที่ 4) อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงไปเป็นไอออนทองแดงที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของสารละลายสตริปกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว

ขั้นตอนที่ 5) การแพร่ของไอออนทองแดงที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของสารละลายสตริปกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวผ่านชั้นฟิล์มไปยังสารละลายสตริป

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้สามารถตั้งสมมติฐานเพื่อใช้ในการคำนวณหาร้อยละการสกัดและสตริปของไอออนทองแดงตั้งแต่สภาวะเอกรูป (unsteady state) จนถึงสภาวะคงตัว (steady state) ดังนั้นจึงต้องกำหนดสมมติฐานที่จำเป็น เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

1. ไม่มีการแพร่ของไอออนทองแดงในแนวเดียวกับเส้นใยกลวง
2. สมมติให้ความหนาของชั้นฟิล์มของสารละลายทั้งสองด้านมีค่าน้อยมาก จึงสามารถตัดขั้นตอนที่ 1 และ 5 ทิ้งได้
3. ในขั้นตอนที่ 2 สมมติว่าเมื่อไอออนทองแดงทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA แล้วเข้าสู่สภาวะสมดุลทันที

4. ในขั้นตอนที่ 4 สมมติว่าไอออนทองแดงถูกสกัดรีบออกจากสารประกอบเชิงซ้อนที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวมายังผิวสัมผัสด้านสารละลายสกัดรีบได้ทั้งหมด

5. ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนควบคุมการถ่ายเทมวล (rate controlling step) เนื่องจากใช้เวลาในขั้นตอนนี้มากที่สุด

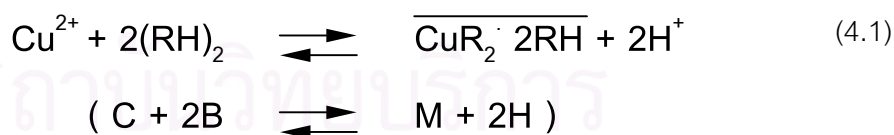
6. การไหลของสารละลายทั้งสองด้านเป็นแบบไหลสวนทางกัน (counter current flow) และมีลักษณะการไหลแบบผ่านครั้งเดียว (one-through mode)

จากสมมติฐานที่กล่าวมาทั้งหมด จะสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน การคำนวณหา ร้อยละการสกัดและสกัดรีบของไอออนทองแดงได้ โดยมีรูปแบบการไหลของ สารละลายดังแสดงในรูปที่ 4.7 และมีขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองดังนี้

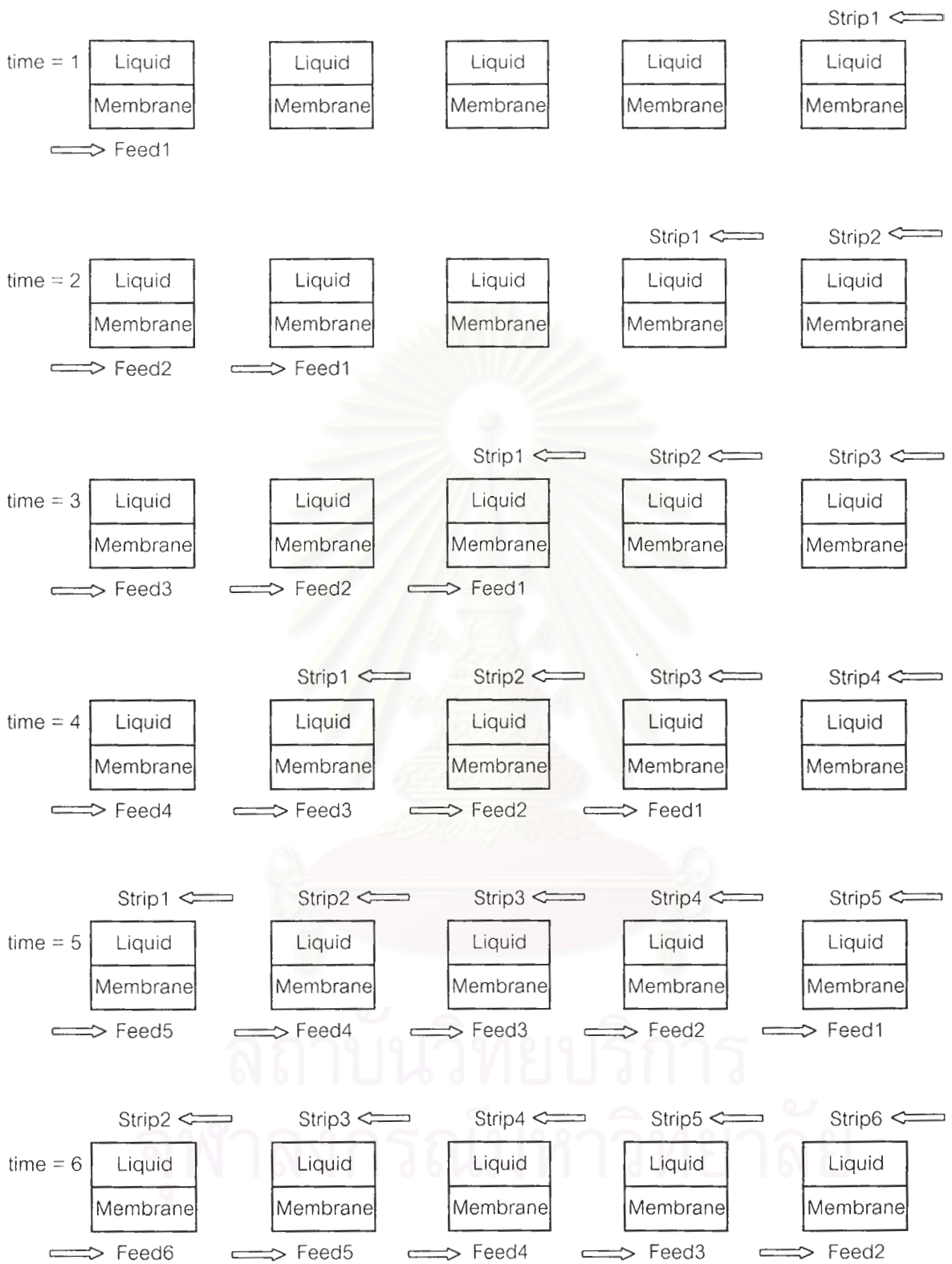
1. ช่วงที่สารละลายป้อนและสารละลายสกัดรีบยังไม่ไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งมีด้วยกัน 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.8

1.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมี

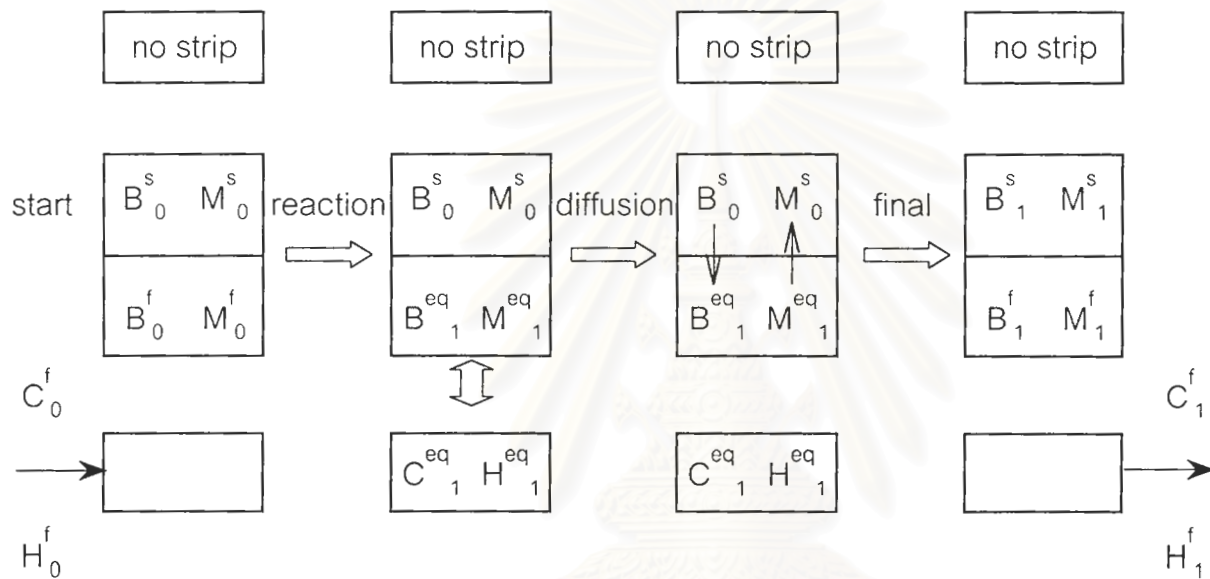
เริ่มต้นเมื่อไอออนทองแดงจากสารละลายป้อนไหลเข้ามาภายในเส้นใยกลวง ไอออนทองแดงจะเริ่มทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและไอออนของไฮโดรเจนแล้วเข้าสู่สภาวะสมดุลทันที ดังนั้นจะสามารถหาความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ที่สภาวะสมดุลได้จากกฎของสมดุลเคมี (กฤษณา, 1988) ดังสมการที่ 4.2 มีกลไกของปฏิกิริยาต่อไปนี้



โดย	C	คือ	Cu^{2+} (ไอออนทองแดง)
	B	คือ	$(\text{RH})_2$ (สารสกัด D2EHPA)
	M	คือ	$\overline{\text{CuR}_2 \cdot 2\text{RH}}$ (สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดง)
	H	คือ	H^+ (ไอออนของไฮโดรเจน)



รูปที่ 4.7 ไดอะแกรมแสดงรูปแบบการไหลสวนทางกันระหว่างสารละลายป้อนกับสารละลายสตริปในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในช่วงเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุ่งด้วยเส้นใยกลวงในช่วงเวลาที่สารละลายป้อนและสารละลายสตรีปยังไม่ไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

เริ่มต้น	C_0^f	B_0^f	M_0^f	H_0^f
ปริมาณที่ใช้ไป	- a	- 2a	+ a	+ 2a
สมดุล ดังนั้น	$(C_0^f - a)$	$(B_0^f - 2a)$	$(M_0^f + a)$	$(H_0^f + 2a)$

$$K_{ex} = \frac{(M_0^f + a) \cdot (H_0^f + 2a)^2}{(C_0^f - a) \cdot (B_0^f - 2a)^2} \quad (4.2)$$

แก้สมการที่ 4.2 เพื่อหาค่า a (วิธีหาแสดงไว้ในภาคผนวก ข) เมื่อหาค่า a ได้แล้วจะสามารถหาความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ที่สภาวะสมดุลได้ดังนี้

$$C^{eq}_1 = C^f_0 - 2a \quad (4.3)$$

$$B^{eq}_1 = B^f_0 - 2a \quad (4.4)$$

$$M^{eq}_1 = M^f_0 + a \quad (4.5)$$

$$H^{eq}_1 = H^f_0 + 2a \quad (4.6)$$

และสารละลายสตริปจะไหลเข้าในฝั่งเปลือกที่ด้านตรงข้ามกับสารละลายป้อน แต่เนื่องจากยังไม่มีสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายสตริป ดังนั้นการสตริปจึงยังไม่เกิดขึ้น

1.2 การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงที่เกิดขึ้น (M_{eq}) จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านสารละลายสตริป ซึ่งหมายถึง กลไกการถ่ายเทมวลในขั้นตอนที่ 3 และสามารถหาอัตราการซึมผ่านได้โดยอาศัยกฎของฟิคส์ (Fick's law) ดังสมการที่ 4.7

$$J_M = k_M (M^f_1 - M^s_2) \quad (4.7)$$

และสารสกัด D2EHPA ที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายสตริปจะแพร่ย้อนกลับมาเนื่องจากความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อนลดลง และสามารถหาอัตราการซึมผ่านได้โดยอาศัยกฎของฟิคส์ (Fick's law) ดังสมการที่ 4.8

$$J_B = k_B (B^s_1 - B^f_2) \quad (4.8)$$

1.3 สภาวะสุดท้ายของสารต่างๆหลังจากมีการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

เมื่อสามารถหาค่าอัตราการซึมผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและของสารสกัด D2EHPA (J_M, J_B) ได้แล้ว จะสามารถหาปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและสารสกัด D2EHPA ที่แพร่ไปยังที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายสตริปและสารละลายป้อนได้จากสมการสมดุลมวล (Shiau et al., 1993) ดังสมการที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

$$Q_f \cdot \frac{dM_1}{dx} = J_M \cdot A \quad (4.9)$$

$$Q_s \cdot \frac{dB_1}{dx} = J_B \cdot A \quad (4.10)$$

ดังนั้นความเข้มข้นสุดท้ายของสารต่าง ๆ ทั้งฝั่งของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป จะสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C^f_1 = C^{eq}_1 \quad (4.11)$$

$$H^f_1 = H^{eq}_1 \quad (4.12)$$

$$B^f_1 = B^{eq}_1 + dB_1 \quad (4.13)$$

$$M^f_1 = M^{eq}_1 - dM_1 \quad (4.14)$$

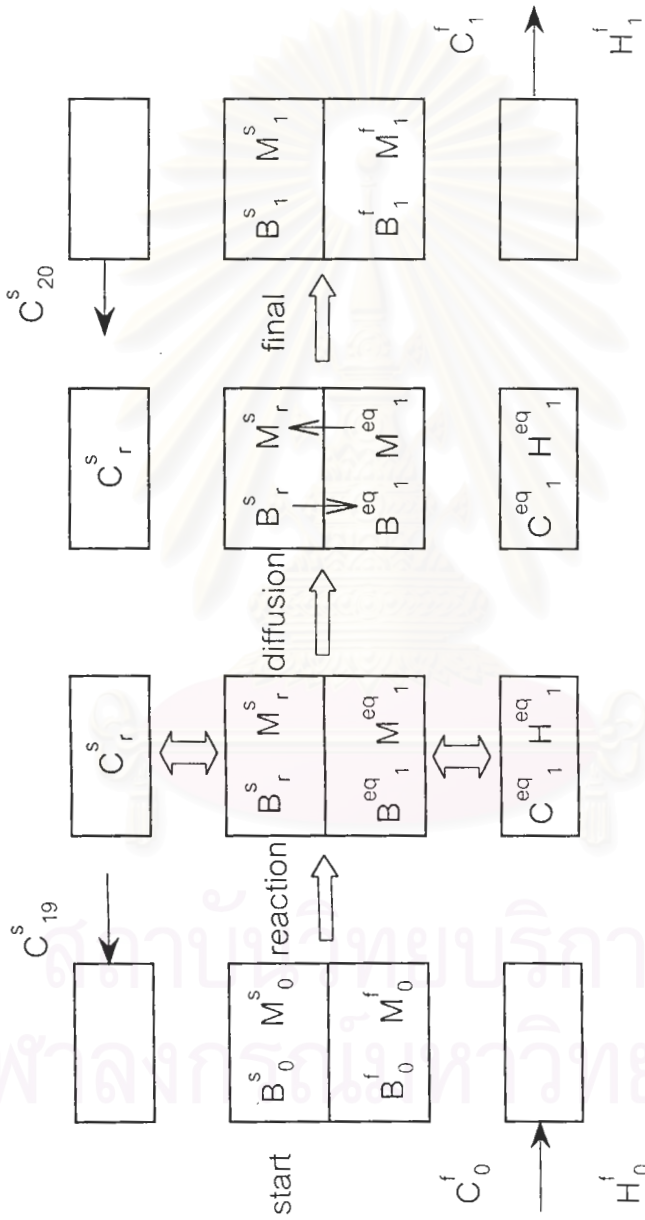
$$B^s_1 = B^s_0 - dB_1 \quad (4.15)$$

$$M^s_1 = M^s_0 + dM_1 \quad (4.16)$$

2. ช่วงที่สารละลายป้อนและสารละลายสตรีปไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งมีด้วยกัน 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.9

2.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมี

เมื่อไอออนทองแดงจากสารละลายป้อนไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับสารละลายสตรีป ไอออนทองแดงจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและไอออนของไฮโดรเจนแล้วเข้าสู่สภาวะสมดุลทันที ดังนั้นความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ที่สภาวะสมดุลจะหาได้จากกฎของสมดุลเคมี (กฤษณา, 1988) ดังสมการที่ 4.2 – 4.6 ส่วนสารละลายสตรีปจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงได้ไอออนทองแดงและสารสกัด D2EHPA แต่จากสมมติฐานข้อที่ 4 กล่าวว่าไอออนทองแดงถูกสตรีปออกจากสารประกอบเชิงซ้อนที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวมายังผิวสัมผัสด้านสารละลายสตรีปได้ทั้งหมด ดังนั้นจะสามารถหาความเข้มข้นของไอออนทองแดง สารสกัด D2EHPA และสารประกอบเชิงซ้อนของ



รูปที่ 4.9 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุ้งด้วยเส้นใยกลวงในช่วงเวลาที่สารละลายป้อนและสารละลายสรีปไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

ไอออนทองแดงที่ฝังสารละลายสไตริปหลังจากเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C^s_r = C^s_{19} + M^s_0 \quad (4.17)$$

$$B^s_r = B^s_0 + 2M^s_0 \quad (4.18)$$

$$M^s_r = 0 \quad (4.19)$$

2.2 การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงที่เกิดขึ้น (M_{eq}) จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านสารละลายสไตริป ซึ่งหมายถึง กลไกการถ่ายเทมวลในขั้นตอนที่ 3 และสามารถหาอัตราการซึมผ่านได้โดยอาศัยกฎของฟิคส์ (Fick's law) ดังสมการที่ 4.7 และสารสกัด D2EHPA ที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายสไตริปจะแพร่ย้อนกลับมา เนื่องจากความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อนลดลง และสามารถหาอัตราการซึมผ่านได้โดยอาศัยกฎของฟิคส์(Fick's law) ดังสมการที่ 4.8

2.3 สภาวะสุดท้ายของสารต่างๆหลังจากมีการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

เมื่อสามารถหาค่าอัตราการซึมผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและของสารสกัด D2EHPA (J_M, J_B) ได้แล้ว จะสามารถหาปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและสารสกัด D2EHPA ที่แพร่ไปยังที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายสไตริปและสารละลายป้อนได้จากสมการสมดุลมวล (Shiau et al., 1993) ดังสมการที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ ดังนั้นความเข้มข้นสุดท้ายของสารต่าง ๆ ทั้งฝั่งของสารละลายป้อนและสารละลายสไตริป จะสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C^f_1 = C^{eq}_1 \quad (4.20)$$

$$H^f_1 = H^{eq}_1 \quad (4.21)$$

$$B^f_1 = B^{eq}_1 + dB_1 \quad (4.22)$$

$$M^f_1 = M^{eq}_1 - dM_1 \quad (4.23)$$

$$B^s_1 = B^s_r - dB_1 \quad (4.24)$$

$$M^s_1 = M^s_r + dM_1 \quad (4.25)$$

$$C^s_{20} = C^s_r \quad (4.26)$$

จากสมการที่ผ่านมาจะสามารถหาความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่ออกมาจากคอลัมน์เยื่อแผ่นเหลวได้ทั้งฝั่งสารละลายป้อนและสารละลายสตริบในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้ แต่เนื่องจากคอลัมน์เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ศึกษามีความยาวของโมดูลประมาณ 20 เซนติเมตร ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ จึงคำนวณหาค่าอัตราการซึมผ่านและปริมาณของไอออนทองแดงที่ถูกสกัดและสตริบทุก ๆ 1, 2 และ 4 เซนติเมตร ($dx = 1, 2$ และ 4 cm) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ทำเช่นนี้ไปจนกระทั่งถึงเซนติเมตรที่ 20 โดยให้ความเข้มข้นของไอออนทองแดง (C) และไอออนไฮโดรเจน (H) ในวัฏภาคสารละลายป้อนก่อนจะเข้าเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะมีค่าคงที่เสมอ เนื่องจากการไหลแบบผ่านครั้งเดียว (one-through mode)

จากวิธีการข้างต้น จะสามารถหาร้อยละการสกัดและสตริบของไอออนทองแดงในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้ ในช่วงแรกกระบวนการสกัดจะอยู่ในสถานะเอกรูป (unsteady state) จากนั้นจะค่อย ๆ เข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) เมื่อเวลาผ่านไป ร้อยละการสกัดและสตริบของไอออนทองแดงจะสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\% Extraction = \frac{C^f_0 - C^f_{20}}{C^f_0} \times 100\% \quad (4.27)$$

$$\% \text{ Recovery} = \frac{C^s_{20}}{C^f_0} \times 100\%$$

(4.28)

ในช่วงแรกของการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ร้อยละการสกัดไอออนทองแดงจะมีค่าสูง ส่วนร้อยละการสกัดไอออนทองแดงจะมีค่าต่ำ แต่เมื่อเวลาผ่านไปร้อยละการสกัดไอออนทองแดงจะค่อย ๆ มีค่าลดลง ส่วนร้อยละการสกัดไอออนทองแดงจะค่อย ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งร้อยละการสกัดและสกัดไอออนทองแดงมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงและไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นแสดงให้เห็นว่ากระบวนการสกัดได้เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว

สำหรับแบบจำลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอน (2 และ 3 คอลัมน์) จะสามารถหาร้อยละการสกัดและสกัดไอออนทองแดงในแต่ละคอลัมน์ได้โดยให้นำเอาความเข้มข้นของไอออนทองแดงและไอออนไฮโดรเจนขาออกจากคอลัมน์ที่ 1 มาเป็นความเข้มข้นของไอออนทองแดงและไอออนไฮโดรเจนขาเข้าของคอลัมน์ที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากนั้นให้คำนวณตามวิธีที่ได้กล่าวมาคือคำนวณหาค่าอัตราการซึมผ่านและปริมาณของไอออนทองแดงที่ถูกสกัดและสกัดทุก ๆ 1, 2 และ 4 เซนติเมตรที่คอลัมน์ที่ 2 จนกระทั่งครบ 20 เซนติเมตร ถ้ามีคอลัมน์ที่ 3 หรือ มากกว่านั้น ให้ทำเหมือนกับที่ทำในคอลัมน์ที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลการคำนวณ

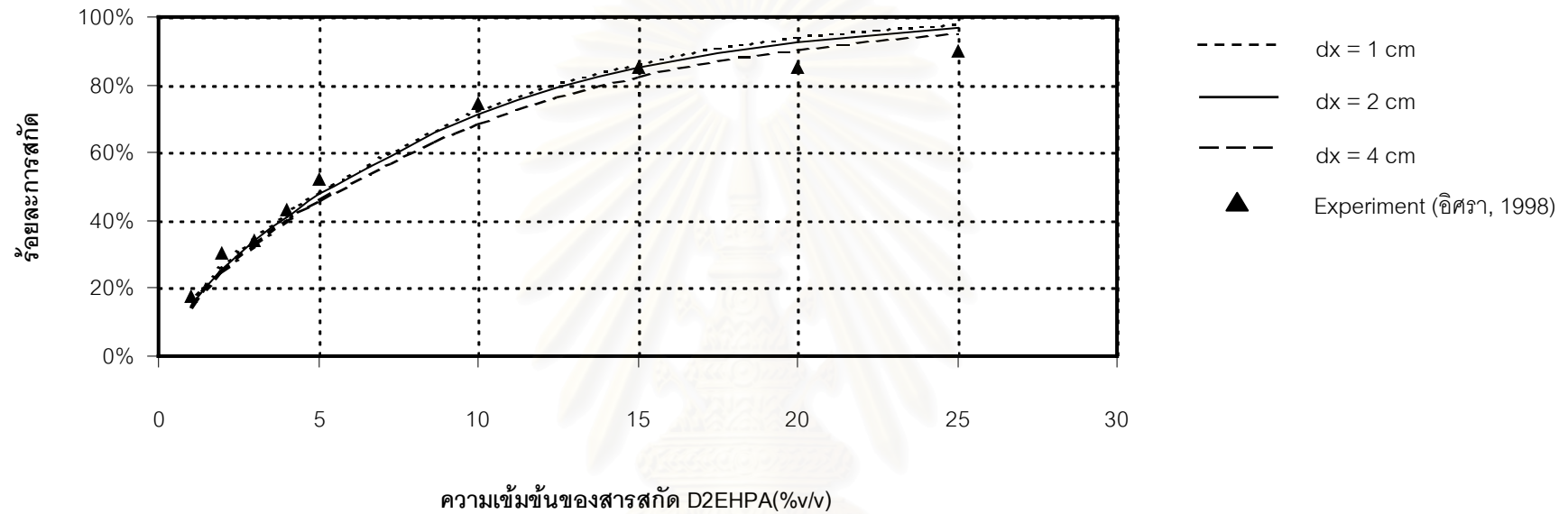
จากการศึกษากลไกการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 1 คอลัมน์ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้น เพื่อใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงทั้งแบบขั้นตอนเดียวและแบบหลายขั้นตอน นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงขั้นตอนเดียว รวมถึงการนำค่าที่ได้จากการทดลองจริงมาเปรียบเทียบเพื่อหาร้อยละความผิดพลาดและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้

5.1 รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงขั้นตอนเดียว

5.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดไอออนทองแดง

ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบขั้นตอนเดียว เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 10 , 15 , 20 , 25 %v/v) จะสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณทุก ๆ 1 , 2 และ 4 เซนติเมตร เทียบกับผลการทดลองจริง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ข้อมูลจากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

จากกราฟในรูป 5.1 จะเห็นว่าผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 และ 2 เซนติเมตร จะมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองจริง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่ำกว่า 15 %v/v แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มากกว่า 15 %v/v ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 4 เซนติเมตร จะมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองจริง และเมื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 , 2 และ 4 เซนติเมตร มาหาร้อยละความผิดพลาด โดยเทียบกับผลการทดลองจริงดังแสดงในตารางที่ 5.1 จะเห็นว่า โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร จะมีร้อยละความผิดพลาดโดยเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการคำนวณ



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ที่ได้จากโปรแกรมที่คำนวณทุกๆ 1, 2 และ 4 เซนติเมตร กับการทดลองจริง ($C_{in}^f = 100$ ppm, $PH_{in}^f = 7$, $Q^f = 200$ ml/min., $Q^s = 200$ ml/min.) โดยมีการไหลแบบผ่านครั้งเดียวและสวนทางกัน

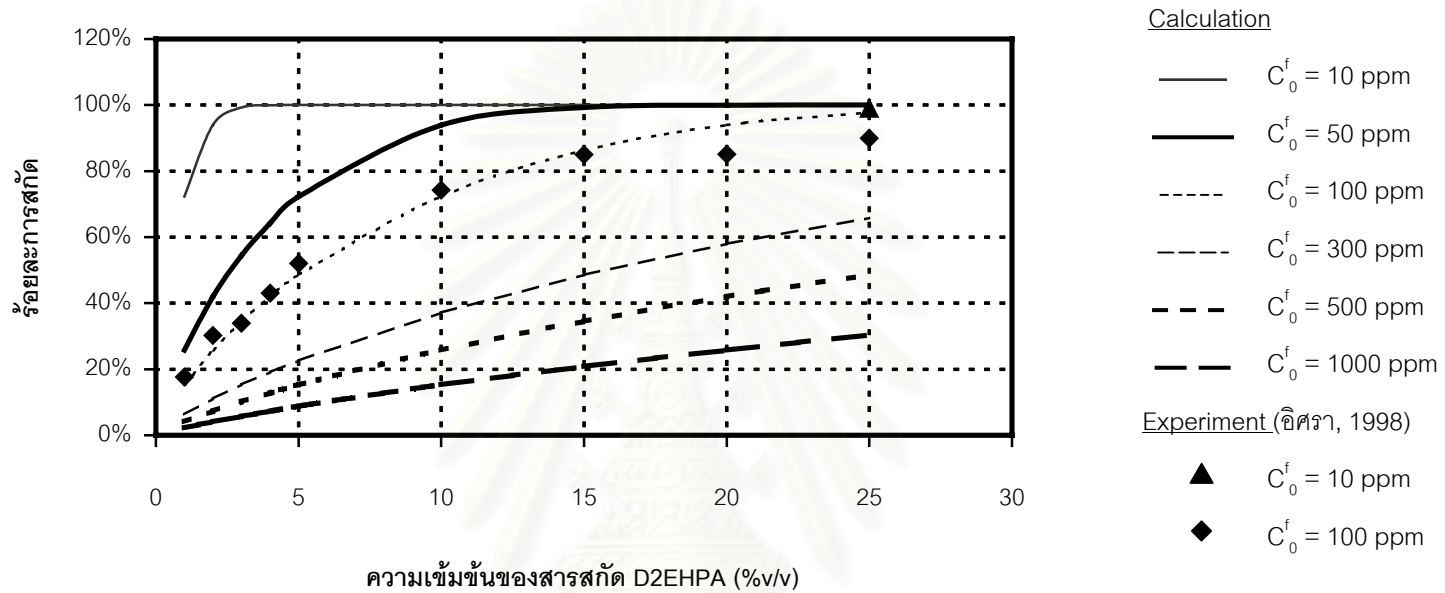
ตารางที่ 5.1 แสดงร้อยละความผิดพลาดของการคำนวณการหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดง โดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 , 2 และ 4 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับผลจากการทดลองจริง

สภาวะเริ่มต้น	%D2EHPA (%v/v)	%error(dx=1) counter-current	%error(dx=2) counter-current	%error(dx=2) counter-current
$C_{in}^f = 100 \text{ ppm}$ $PH_{in}^f = 7$ $Q^f = 200 \text{ ml/min.}$ $A = 1.4 \text{ m}^2$ $x = 20 \text{ cm}$ $\epsilon = 1$	1	13.44%	14.85%	17.46%
	2	14.74%	16.26%	19.07%
	3	1.71%	0.18%	3.66%
	4	2.42%	4.28%	7.65%
	5	6.69%	8.46%	11.73%
	10	2.60%	4.38%	7.66%
	15	1.49%	0.11%	3.13%
	20	10.43%	9.10%	6.43%
	25	8.57%	7.69%	5.76%
ค่าเฉลี่ย		6.90%	7.26%	9.17%

ด้วยโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 2 และ 4 เซนติเมตร ดังนั้นจึงนำเอาโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร มาใช้คำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทั้งแบบชั้นตอนเดียวและหลายชั้นตอน

ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบชั้นตอนเดียวโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 10 , 15 , 20 , 25 %v/v) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงต่าง ๆ จะสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เทียบกับผลการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ข้อมูลจากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

จากกราฟในรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มากขึ้น ซึ่งหมายถึงปริมาณของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ที่ได้จากโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตรกับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงเป็น 10 ppm , 50 ppm , 100 ppm , 300 ppm , 500 ppm และ 1000 ppm ($\text{pH}_{\text{in}}^f = 7$, $Q^f = 200$ ml/min. , $Q^s = 200$ ml/min.) โดยมีการไหลแบบผ่านครั้งเดียวและสวนทางกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะถูกสกัดมากขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าของการสกัดไอออนทองแดงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA สำหรับการสกัดไอออนทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงต่ำ ๆ (10 ppm) จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เพียงเล็กน้อยปริมาณของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนจะถูกสกัดมากขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มีค่าประมาณ 3 %v/v หรือมากกว่า ปริมาณของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนจะถูกสกัดออกจนหมด เนื่องจากความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เพิ่มขึ้นมีปริมาณมากเกินไปที่จะทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ส่วนการสกัดไอออนทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 50 และ 100 ppm จะเห็นว่าปริมาณของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนจะถูกสกัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA อยู่ในช่วงไม่เกิน 10 %v/v เนื่องจากในช่วงที่ใช้ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่ำ ๆ ปริมาณสารสกัด D2EHPA มีค่าไม่มากพอต่อการสกัดไอออนทองแดง ทำให้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มากขึ้น (แต่ไม่เกิน 10 %v/v) ประสิทธิภาพการสกัดจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA มากกว่า 10 %v/v การเพิ่มขึ้นของปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดจะค่อย ๆ น้อยลงจนกระทั่งไม่เพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เพิ่มขึ้นเริ่มมีปริมาณมากเกินไปที่จะทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ทำให้การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการสกัดค่อย ๆ น้อยลง และการสกัดไอออนทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงสูง (300 , 500 และ 1000 ppm) จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ปริมาณของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนจะถูกสกัดเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่ และได้ในปริมาณที่ต่ำเมื่อเทียบกับการสกัดไอออนทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงต่ำ ๆ ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายป้อนมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับปริมาณสารสกัด D2EHPA ทำให้สารสกัด D2EHPA ในเยื่อแผ่นเหลวมีค่าไม่มากพอต่อการสกัดไอออนทองแดง แม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ให้มากขึ้นแล้วก็ตาม

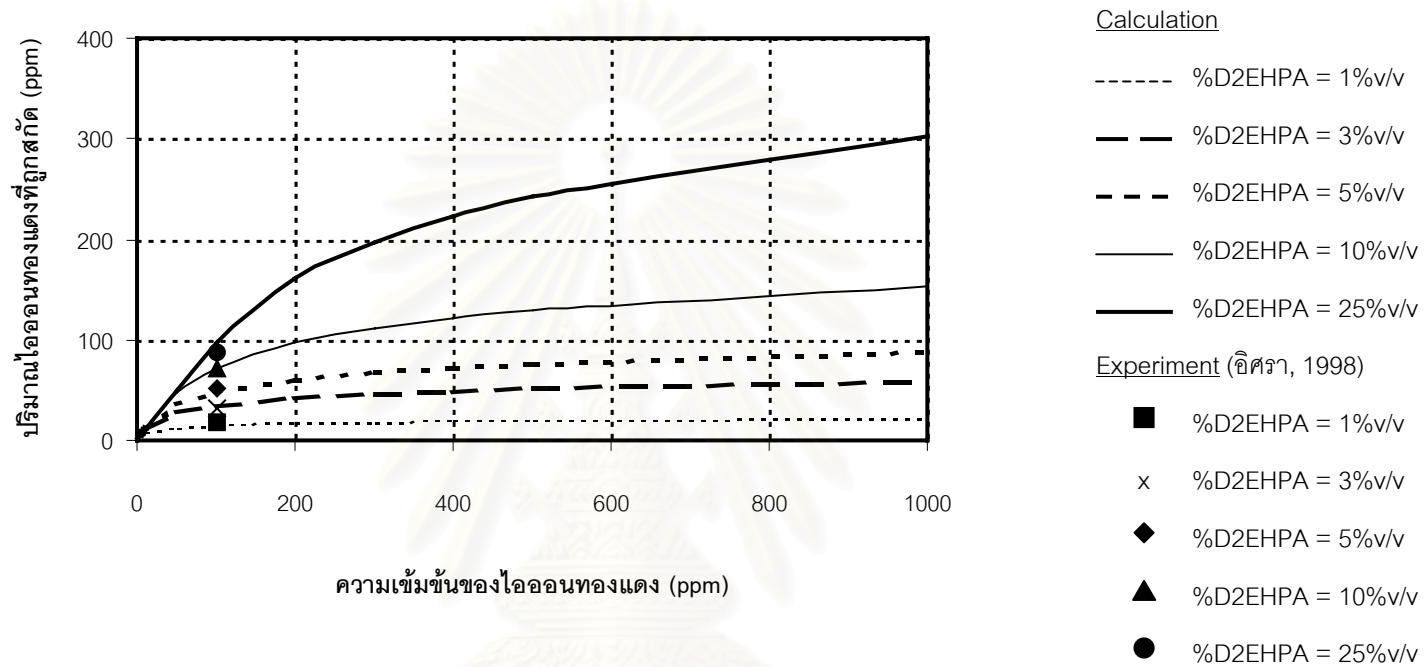
จากกราฟในรูปที่ 5.2 เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการสกัดที่ได้จากผลการคำนวณและผลการทดลองจริงในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 100 ppm จะเห็นว่าในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ไม่เกิน 15 %v/v ผลจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองจริง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ให้มากกว่า 15 %v/v แล้ว ผลจากการคำนวณจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ผลจากการทดลองจริงมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากในทาง

ปฏิบัติแล้วการสกัดแบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีข้อจำกัดที่พื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนทองแดงกับสารสกัด D2EHPA ซึ่งหมายความว่า ปริมาณของสารสกัด D2EHPA ที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดงที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ร้อยละการสกัดที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ให้มากกว่า 15 %v/v

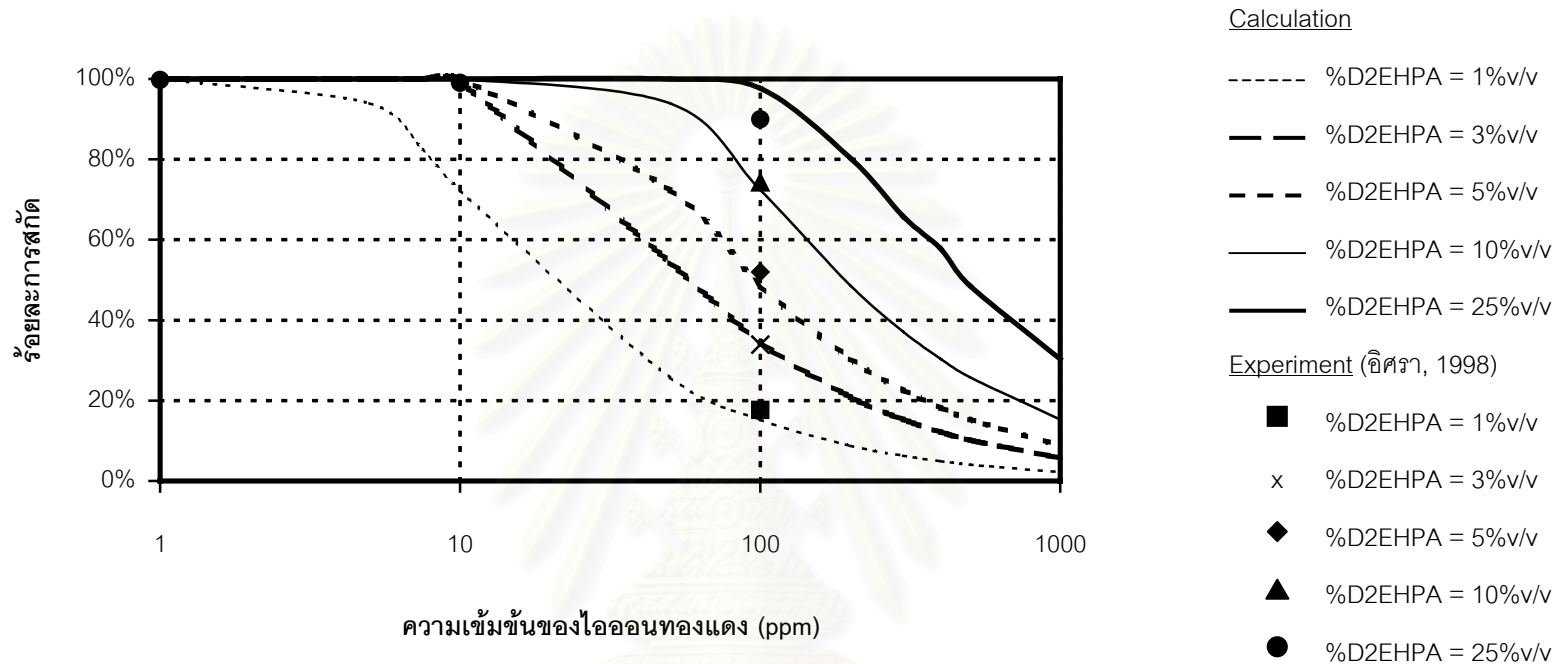
5.1.2 ผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง

ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบขั้นตอนเดียวโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อน (1 , 5 , 7.5 , 10 , 50 , 100 , 200 , 300 , 400 , 500 , 1000 ppm) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ จะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดง ที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เทียบกับผลการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.4 (ข้อมูลจากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

จากกราฟในรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณของไอออนทองแดงจะถูกสกัดมากขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายป้อนและปริมาณสารสกัด D2EHPA ในเยื่อแผ่นเหลวมากขึ้น ทำให้ปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายป้อนถูกสกัดมากขึ้นด้วย แต่จากกราฟในรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น ร้อยละของการสกัดในช่วงแรก (1 - 10 ppm) จะยังคงสกัดได้คงที่ ต่อมาร้อยละของการสกัดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ จนเกือบคงที่ เหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายป้อนมีจำนวนมากขึ้นแต่ปริมาณสารสกัด D2EHPA มีค่าคงที่ ทำให้สารสกัด D2EHPA ในเยื่อแผ่นเหลวมีปริมาณไม่มากพอต่อการสกัดไอออนทองแดง



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงที่ได้จากโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตรกับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v , 3 %v/v , 5 v/v% , 10 %v/v และ 25 %v/v ($PH_{in}^f=7$, $Q^f=200$ ml/min. , $Q^s=200$ ml/min.)โดยมีการไหลแบบผ่านครั้งเดียวและสวนทางกัน



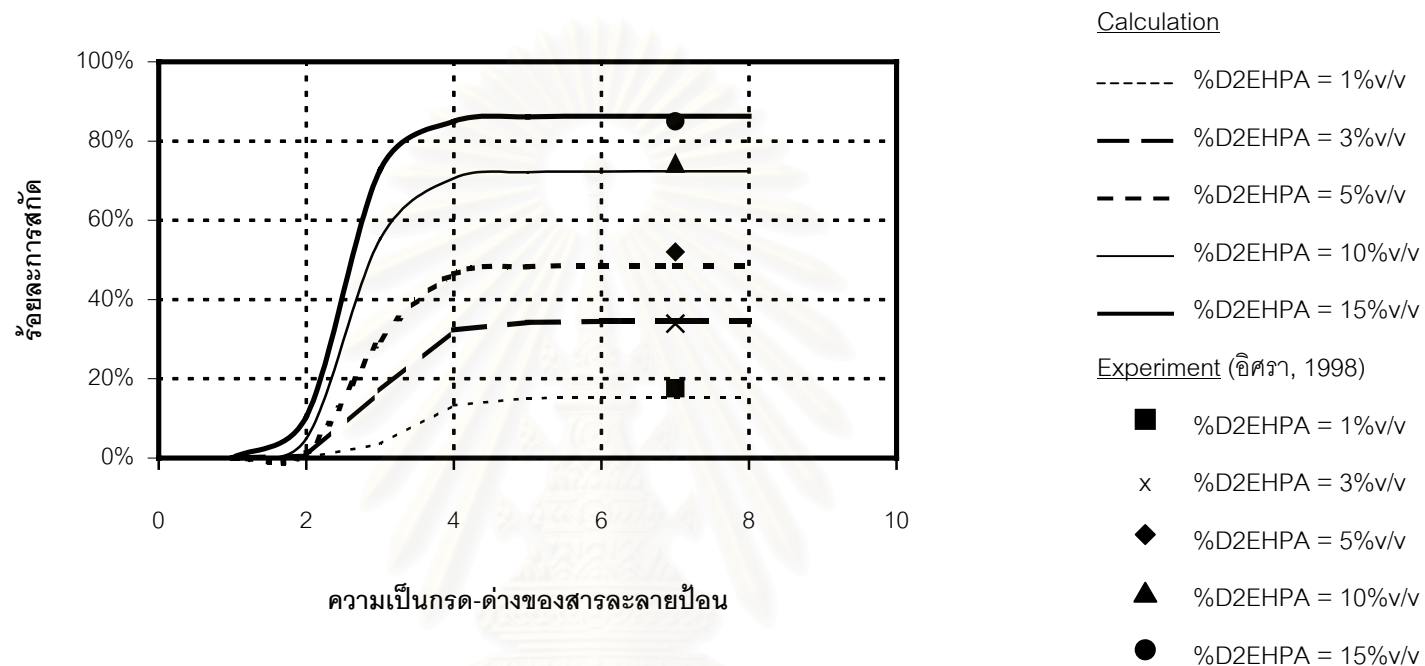
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงที่ได้จากโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตรกับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v , 3 %v/v , 5 v/v% , 10 %v/v และ 25 %v/v ($PH_{in}^f=7$, $Q^f=200$ ml/min. , $Q^s=200$ ml/min.) โดยมีการไหลแบบผ่านครั้งเดียวและสวนทางกัน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดและร้อยละการสกัดที่ได้จากผลการคำนวณและผลการทดลองจริงในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ จะเห็นว่าผลจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองจริงทั้งปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดและร้อยละการสกัด ยกเว้นในกรณีที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงมากกว่า 100 ppm และมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 25 %v/v จะพบว่าร้อยละการสกัดที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการทดลองจริง เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วการสกัดแบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีข้อจำกัดที่พื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนทองแดงกับสารสกัด D2EHPA ซึ่งหมายความว่า ปริมาณของไอออนทองแดงที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA ที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณสูงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเหมาะจะใช้กับความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่เจือจาง

5.1.3 ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง

ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบขั้นตอนเดียวโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน ($PH_{feed} = 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8$) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ จะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดไอออนทองแดงกับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน ที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เทียบกับผลการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 (ข้อมูลจากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

จากกราฟในรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าเมื่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้นเป็น 1 ร้อยละการสกัดจะเป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่าปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายป้อนไม่ถูกสกัดออกมาเลย แสดงว่าไม่มีการสกัดเกิดขึ้น เนื่องจากปริมาณไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายป้อนมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้นมีค่าต่ำ ๆ ($PH = 1 - 2$) แสดงว่ามีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนสูง ทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเพิ่มขึ้นมาก และมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าลดต่ำลงด้วย จึงทำให้การสกัดไอออนทองแดงแทบจะไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้นมากขึ้น ($PH = 2 - 4$) ร้อยละการสกัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะค่อย ๆ



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่ได้จากโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตรกับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v , 3 %v/v , 5 %v/v , 10 %v/v และ 15 %v/v ($C_{in}^f=100$ ppm , $PH_{in}^f= 7$, $Q^f=200$ ml/min. , $Q^s=200$ ml/min.) โดยมีกราฟไหลแบบผ่านครั้งเดียวและสวนทางกัน

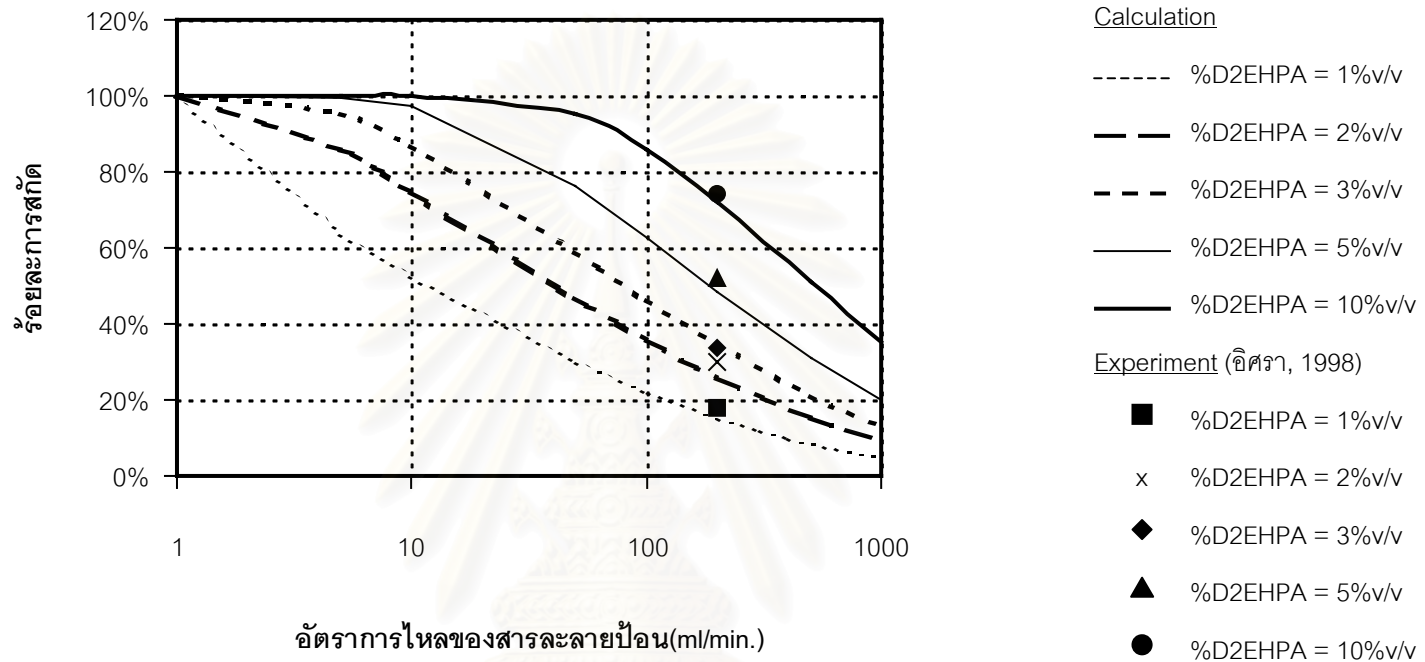
คงที่เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้นให้มากกว่า 5 ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนลดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเพิ่มขึ้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหลังจะค่อย ๆ คงที่ เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้นให้มากกว่า 5 เนื่องจากปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของไอออนทองแดงและสารสกัด D2EHPA ทำให้ปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนทองแดงและสารสกัด D2EHPA ดังนั้นจึงควรใช้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้นเป็น 7 เนื่องจากมีความสะดวกในการเตรียมสาร แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ควรควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีค่าประมาณ 5 และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสตรีปมีค่าประมาณ 1 ทั้งนี้เนื่องจาก ถ้าให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนสูงเกินไป ไอออนทองแดงอาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวได้ และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสตรีปต่ำเกินไป ส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์การสกัดอาจได้รับความเสียหายได้ (Baker และ Blume , 1990)

จากกราฟในรูปที่ 5.5 เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการสกัดที่ได้จากผลการคำนวณและผลการทดลองจริงในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนเริ่มต้น ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ จะเห็นว่าผลจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง

5.1.4 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง

ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบชั้นตอนเดียวโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อน (10 , 50 , 100 , 200 , 300 , 400 , 500 , 1000 ml/min.) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ จะสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับอัตราการไหลของสารละลายป้อน ที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เทียบกับผลการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 (ข้อมูลจากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

จากกราฟในรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนมีค่าต่ำ ๆ ร้อยละการสกัดจะมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อนให้มากขึ้น ร้อยละการสกัดจะลดลง ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อน ทำให้ช่วงเวลาที่ไอออน



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดกับอัตราการไหลของสารละลายป้อนที่ได้จากโปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตรกับการทดลองจริง ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v , 2 %v/v , 3 %v/v , 5 %v/v และ 10 %v/v ($C_{in}^f = 100 \text{ ppm}$, $PH_{in}^f = 7$)โดยมีการไหลแบบผ่านครั้งเดียวและสวนทางกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทองแดงและ D2EHPA จะทำปฏิกิริยาน้อยลง และมีผลทำให้ปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและสารสกัด D2EHPA ที่แพร่ไปยังที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายสไตริปและสารละลายป้อนลดลง ตามลำดับ (ดังแสดงไว้ในสมการที่ 4.9 และ 4.10) แต่ในการเลือกอัตราการไหลของสารละลายป้อนที่เหมาะสมไม่ได้ขึ้นอยู่กับร้อยละการสกัดไอออนทองแดงเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความคุ้มค่าด้วย เพราะเมื่อลดอัตราการไหลของสารละลายป้อนลง แม้จะทำให้ร้อยละการสกัดไอออนทองแดงเพิ่มขึ้นก็ตาม แต่จะไปลดปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ลงด้วย

จากกราฟในรูปที่ 5.6 เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการสกัดที่ได้จากผลการคำนวณและผลการทดลองจริงในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนเริ่มต้น ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ต่าง ๆ จะเห็นว่าผลจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองจริงเกือบทั้งหมด

5.2 รูปแบบการทดลองการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายขั้นตอน

5.2.1 ผลของการคำนวณประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์

ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนก่อนการสกัดของทั้งสองคอลัมน์ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และจากตารางที่ 5.2 จะสามารถสร้างแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทั้งแบบ 1 คอลัมน์ และ 2 คอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 5.7

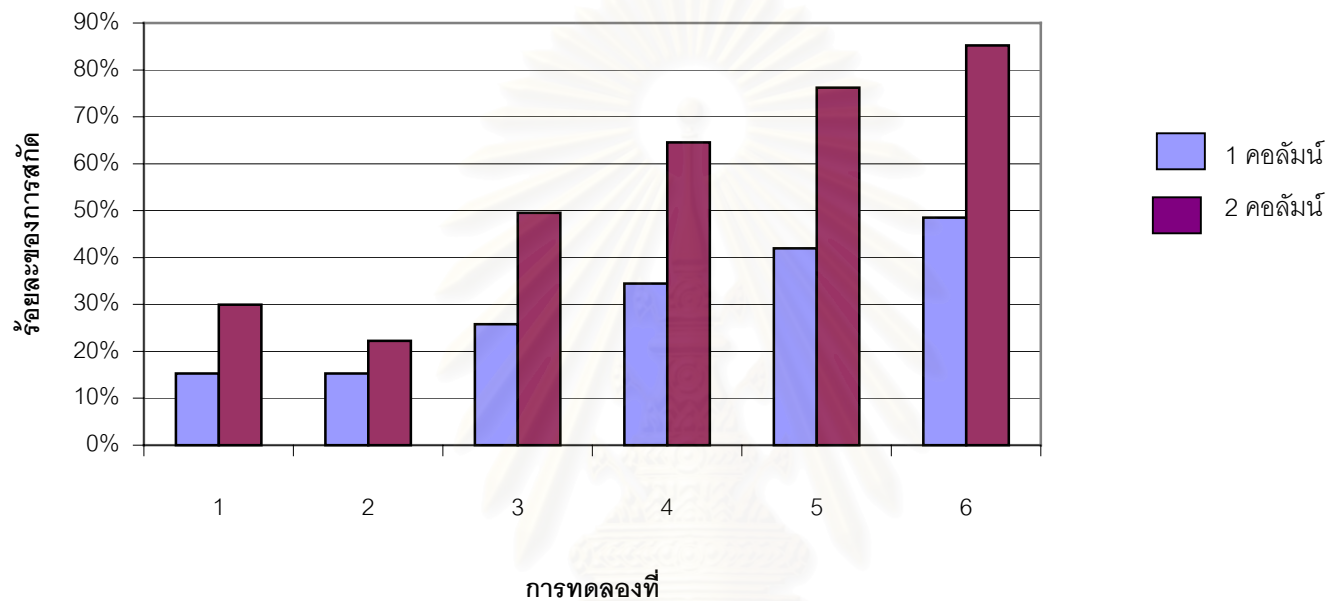
จากแผนภูมิในรูปที่ 5.7 เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 1 คอลัมน์ และ 2 คอลัมน์ จะเห็นว่า การสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์ จะสามารถสกัดไอออนทองแดงออกจากสารละลายป้อนได้มากกว่าถึง 2 เท่า ถ้ามีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนตอนออกจากคอลัมน์ที่ 1 ให้เท่ากับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นก่อนเข้าคอลัมน์ที่ 1 (การทดลองที่ 1, 3, 4, 5 และ 6) แต่ถ้าไม่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไดออกซอนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนก่อนการสกัดของทั้งสองคอลัมน์

สภาวะเริ่มต้น	การทดลอง	PH _{in} ^f	%D2EHPA (%v/v)	C _{out} ^f (ppm)	C _{out} ^s (ppm)	%extraction	%recovery
						(Calculation)	
C _{in} ^f = 100 ppm Q ^f = 200 , 200* ml/min. A = 1.4 , 1.4* m ² x = 20 , 20* cm ε = 1 , 1* dx = 1	1	7 , 7*	1 , 1*	84.73 , 70.02*	15.27 , 14.46*	15.27%,29.98%*	15.27%,29.98%*
	2	7 , none*	1 , 1*	84.73 , 77.74*	15.27 , 6.99*	15.27%,22.26%*	15.27%,22.26%*
	3	7 , 7*	2 , 2*	74.20 , 50.46*	25.80 , 23.74*	25.80%,49.54%*	25.80%,49.54%*
	4	7 , 7*	3 , 3*	65.51 , 35.46*	34.49 , 30.06*	34.49%,64.54%*	34.49%,64.54%*
	5	7 , 7*	4 , 4*	58.03 , 23.75*	41.97 , 34.28*	41.97%,76.25%*	41.97%,76.25%*
	6	7 , 7*	5 , 5*	51.46 , 14.77*	48.54 , 36.70*	48.54%,85.23%*	48.54%,85.23%*

* ตัวเลขแรก คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 1

ตัวเลขที่สอง คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 2 (none หมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง PH ของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์)



รูปที่ 5.7 แสดงแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสัปดาห์ไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ทั้งแบบ 1 คอลัมน์ และ 2 คอลัมน์

ตอนออกจากคอลัมน์ที่ 1 จะเห็นว่า ร้อยละการสกัดไอออนทองแดงเพิ่มขึ้นมาเพียง 0.5 เท่า (การทดลองที่ 2) ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายสตรีป เป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลของการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ดังที่ได้อธิบายไว้ใน การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ในบทที่ 3 และการไม่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนตอนออกจากคอลัมน์ที่ 1 จะเหมือนกับการมีคอลัมน์ที่ยาวขึ้นเป็นสองเท่านั่นเอง

5.2.2 ผลของการคำนวณประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์

ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนก่อนการสกัดของทั้งสองคอลัมน์ ดังแสดงในตารางที่ 5.3 และจากตารางที่ 5.3 จะสามารถสร้างแผนภูมิ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ทั้งแบบ 1 คอลัมน์ 2 คอลัมน์ และ 3 คอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 5.8

จากแผนภูมิในรูปที่ 5.8 เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะร้อยละการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 1 คอลัมน์ และ 3 คอลัมน์ จะเห็นว่า การสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์ จะสามารถสกัดไอออนทองแดงออกจากสารละลายป้อนได้มากกว่าถึง 3 เท่า ถ้ามีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนตอนออกจากคอลัมน์ที่ 1 และ คอลัมน์ที่ 2 ให้เท่ากับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นก่อนเข้าคอลัมน์ที่ 1 (การทดลองที่ 1 และ 3) แต่ถ้าไม่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนตอนออกจากคอลัมน์ที่ 1 และคอลัมน์ที่ 2 จะเห็นว่า ร้อยละการสกัดไอออนทองแดงเพิ่มขึ้นมาเพียง 0.7 เท่า (การทดลองที่ 2) ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายสตรีป เป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลของการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ดังที่ได้อธิบายไว้ใน การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ในบทที่ 3 และการไม่ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนตอนออกจากคอลัมน์ที่ 1 จะเหมือนกับการมีคอลัมน์ที่ยาวขึ้นเป็นสามเท่านั่นเอง

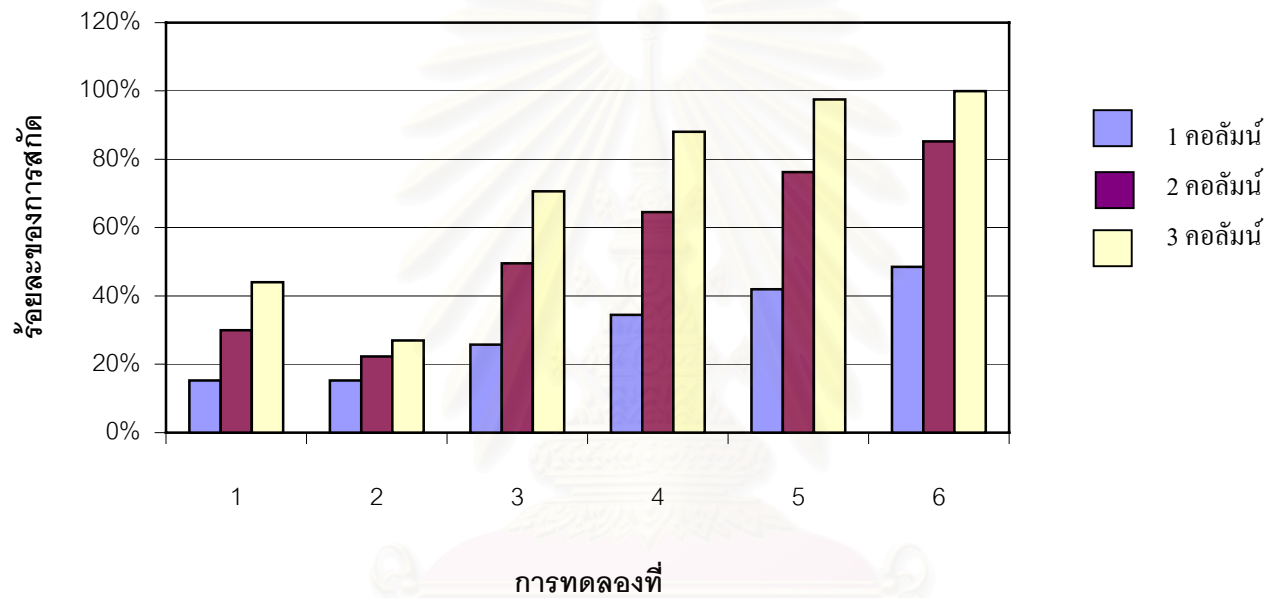
ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนก่อนการสกัดของทั้งสามคอลัมน์

สภาวะเริ่มต้น	การทดลอง	PH _{in} ^f	%D2EHPA (%v/v)	C _{out} ^f (ppm)	C _{out} ^s (ppm)	%extraction	%recovery
						(Calculation)	
C _{in} ^f = 100 ppm	1	7, 7, 7*	1, 1, 1*	84.73, 70.02, 55.95*	15.27, 14.46, 9.75*	15.27%,29.98%,44.05%*	15.27%,29.98%,39.73%*
Q ^f = 200, 200, 200* ml/min.	2	7, none,none*	1, 1, 1*	84.73, 77.74, 73.06*	15.27, 6.99, 2.75*	15.27%,22.26%,26.94%*	15.27%,22.26%,25.01%*
A = 1.4, 1.4, 1.4* m ²	3	7, 7, 7*	2, 2, 2*	74.20, 50.46, 29.41*	25.80, 23.74, 15.51*	25.80%,49.54%,70.59%*	25.80%,49.54%,65.06%*
x = 20, 20, 20* cm	4	7, 7, 7*	3, 3, 3*	65.51, 35.46, 11.94*	34.49, 30.06, 18.43*	34.49%,64.54%,88.06%*	34.49%,64.54%,82.97%*
ε = 1, 1, 1*	5	7, 7, 7*	4, 4, 4*	58.03, 23.75, 2.45*	41.97, 34.28, 18.25*	41.97%,76.25%,97.55%*	41.97%,76.25%,94.50%*
dx = 1	6	7, 7, 7*	5, 5, 5*	51.46, 14.77, 0.02*	48.54, 36.70, 14.22*	48.54%,85.23%,99.98%*	48.54%,85.23%,99.45%*

* ตัวเลขแรก คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 1

ตัวเลขที่สอง คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 2 (none หมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง PH ของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์)

ตัวเลขที่สาม คือ สภาวะเริ่มต้นในคอลัมน์ที่ 3 (none หมายถึง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง PH ของสารละลายป้อนก่อนเข้าคอลัมน์)



รูปที่ 5.8 แสดงแผนภูมิเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสักัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ทั้งแบบ 1 คอด้มน์ 2 คอด้มน์ และ 3 คอด้มน์

ส่วนในการทดลองที่ 4 การทดลองที่ 5 และการทดลองที่ 6 จะเห็นว่าการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบ 3 คอลัมน์ จะสามารถสกัดไอออนทองแดงออกจากสารละลายป้อนได้มากกว่าการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบ 1 คอลัมน์ เพียง 2 – 2.5 เท่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากในแต่ละคอลัมน์มีปริมาณสารสกัด D2EHPA มากเกินพอ ทำให้ปริมาณไอออนทองแดงถูกสกัดเป็นจำนวนมากในคอลัมน์ที่ 1 และ 2 ดังนั้นการเพิ่มคอลัมน์ที่ 3 จึงไม่สามารถเพิ่มร้อยละการสกัดให้มากขึ้นถึง 3 เท่าได้

จากการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 และ 3 คอลัมน์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงมากกว่าการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียว 2 ถึง 3 เท่า เมื่อมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนก่อนเข้าแต่ละคอลัมน์ให้เท่ากับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายป้อน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการคำนวณและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการคำนวณ

จากผลการคำนวณทั้งหมดได้นำมาสู่ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือ แบบจำลองนี้ ควรจะทำการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงแบบทุก ๆ 1 เซนติเมตร เนื่องจากมีร้อยละความผิดพลาดเฉลี่ยเพียง 6.9 เมื่อเทียบกับการคำนวณหาร้อยละการสกัดไอออนทองแดงแบบทุก ๆ 2 และ 4 เซนติเมตร เพื่อลดความผิดพลาดในการคำนวณลง

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียว มีดังนี้

2.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับร้อยละการสกัดไอออนทองแดง แต่ปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดง

2.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA จะแปรผันตรงกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัด แต่เมื่อให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA มีค่าสูงเกินจุด ๆ หนึ่ง ปริมาณปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณสารสกัด D2EHPA ที่เพิ่มเข้าไป

2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนจะมีผลกระทบอย่างมากต่อการสกัดไอออนทองแดงในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่น้อยกว่า 5 แต่จะมีผลกระทบต่ออัตราการสกัดไอออนทองแดงน้อยมาก เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมากกว่า 5

2.4 อัตราการไหลของสารละลายป้อนมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัด แต่การเลือกหาอัตราการไหลของสารละลายป้อนที่เหมาะสมไม่ได้ขึ้นอยู่กับร้อยละการสกัดไอออนทองแดงเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความคุ้มค่าด้วย

3. การสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 คอลัมน์ และ 3 คอลัมน์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงมากกว่าการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียว 2 ถึง 3 เท่า เมื่อมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนก่อนเข้าแต่ละคอลัมน์ให้เท่ากับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของ

สารละลายป้อน

4. ในการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอน ถ้าไม่มีปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายป้อนก่อนเข้าแต่ละคอลัมน์ จะเหมือนกับการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงชั้นตอนเดียวที่มีการเพิ่มความยาวของโมดูลเส้นใยกลวงให้มากขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจมีผลต่อการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง อันได้แก่ การเพิ่มความยาวของโมดูลเส้นใยกลวง ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น

2. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับข้อจำกัดของพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนทองแดงกับสารสกัด แล้วนำไปเสริมในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและขยายขอบเขตของแบบจำลองให้มากขึ้น

3. ควรศึกษาการสกัดไอออนโลหะอื่นนอกเหนือจากไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ใช้ D2EHPA เป็นสารสกัด เช่น ไอออนสังกะสี ไอออนโครเมต เป็นต้น

4. ควรศึกษาลักษณะการไหลแบบไหลวน (circulating-mode) ของสารละลายป้อน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับลักษณะการไหลแบบผ่านครั้งเดียว (one-through mode)

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กฤษณา ชูติมา. 1988. หลักเคมีทั่วไป เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 10 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : บริษัทประชาชน จำกัด.

อิสรา เกษมเศรษฐ. 1998. การสกัดไอออนทองแดงจากสารละลายเจือจางมากด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยุญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Baker, Richard, and Blume, Ingo. 1990. Couple Transport Membrane. In C. Porter, Mark.(eds.). Handbook of Industrial Membrane Technology, pp. 511-558. New Jersey: Noyes Publications.

Barnes, D.E., and Marshall, G.D. 1995. Rapid Optimization of chemical Parameter affecting Supported Liquid Membranes. Separation Science and Technology 30(5): 751-776.

Boyadzhiev, L., and Kyuchoukov, G. 1980. Further development of Carrier Mediated Extraction. Journal of Membrane Science 6: 107.

Butt, Allison. 1977. McGraw-Hill encyclopedia of Science and Technology Volume 3. USA: McGraw-Hill. 521-526.

Dahuron, Lise and Cussler, E. L. 1988. Protein Extraction with Hollow Fibers. AIChE Journal 34(1): 130-136.

Danesi, P.R., Rickett, P.G. 1986. Some Observation on the Performance of Hollow-Fiber Supported Liquid Membranes for Co-Ni Separations. Solvent Extraction and Ion Exchange 4 (1): 149-164.

D'elia, Nancy A., Dahuron, Lise and Cussler E.L. 1986. Liquid-Liquid Extraction with Microporous Hollow Fibers. Journal of Membrane Science 29: 309-319.

- Draxler, J., Furst, W., and Marr, R. 1988. Separation of Metal Species by Emulsion Liquid Membranes. Journal of Membrane Science 43 : 281-289.
- Dreher, T.M. and Stevens, G.W. 1998. Instability Mechanisms of Supported Liquid Membranes. Separation Science and Technology 33(6): 835-853.
- Dworzak, W.R. and Naser, A.J. 1987. Pilot-Scale Evaluation of Supported Liquid Membrane Extraction. Separation Science and Technology 22(2&3): 677-689.
- Galligan, James M., 1988. Encyclopedia Americana Volume 7. USA: Grolier. 759-761.
- Gu, Zhong-Mao. 1990. A New Liquid Membrane Technology – Electrostatic Pseudo Liquid Membrane. Journal of Membrane Science 52: 77-88
- Gu, Z. 1992. Electrostatic Pseudo-Liquid-Membrane. In Winston Ho, W.S. and Sirkar, K.K.(eds.). Membrane Handbook, pp. 867-884. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Haan, A.B., Bartels, P.V., and Graauw, J. 1989. Extraction of Metal Ions from Waste Water Modeling of the Mass Transfer in a Supported-Liquid-Membrane Process. Journal of Membrane Science 45: 281-297.
- Ho, W.S.W. and Li, N.N. 1992. Emulsion Liquid Membranes: Definitions. In Wintson Ho, W.S. and Sirkar, K.K. (eds.). Membrane Handbook, pp. 656-700. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Hoechst Celanese coporation. 1995. Operating Manual: Laboratory Liquid Extraction System. N.p. (Type written).
- Izatt, R.M., Lamb, J.D., and Bruening , R.L. 1998. Comparison of bulk, Emulsion, Thin Sheet Supported, and Hollow Fiber Supported Liquid Membranes in Macrocycle-Mediated Cation Separations. Separation Science and Technology 23(12&13): 1645-1658.
- Komasawa, Isao, Otake, Tsutao and Yamashita, tomohiro. 1983. Mechanism Kinetic of Copper Permeation Through a Supported Liquid membrane Containing a Hydroxyoxime as a Mobile Carrier. Ind. Eng. Chem. Fundam 22: 127-131.
- Lee, Kyung-Hee, Evans, D.F. and Cussler, E.L. 1978. Selective Copper Recovery with Two Type of Liquid Membranes. AIChE Journal 23(5): 860-868.
- Li, N.N., Cahn, R.P., Naden, D. and Lai, R. W. M. 1983. Liquid Membrane Process for Copper Extraction. Hydrometallurgy 9: 277-305.

- Liacono, O., Drioli, E., and Molinari, R. 1986. Metal Ion Separation and Concentration with Supported Liquid Membranes. Journal of Membrane Science 28: 123-138.
- M. Teramoto, N. Ohnishi, and H. Matsuyama. 1994. Effect of Recycling of Feed Solution on the Efficiency of Supported Liquid Membrane Module. Separation Science and Technology 29(13): 1749-1755.
- Marr, R., and Kopp, A. 1982. Liquid Membrane Technology a Survey of Phenomena, Mechanism and Models. International Chemical Engineering 22(1): 44-59
- Matsumoto, Michiaki, Matsuo, Kenji, Kondo, Kazuo and Nakashiro, Fumiuki. 1990. Effect of Anionic Surfactant on Copper Extraction With N-8-Quinoly-p-Dodecylbenzenesulfonamide in Hollow Fiber Membrane Extractor. Journal of Membrane Science 53: 287-298.
- 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.
- Nopphakorn Thamphiphit. 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, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- O' Hara, P.A., and Bohrer, M.P. 1989. Supported Liquid Membrane for Copper Transport. Journal of Membrane Science 44: 273-287.
- R. -S. Juang, and D. -J. Jiang. 1994. Rate-Controlling Mechanism of Cobalt Transport through Supported Liquid Membranes Containing D2EHPA. Separation Science and Technology 29(2): 223-237.
- Schultz, S., Jerome, Goddard, Joe D. and Suchdeo, Shyam R. 1974. Facilitated Transport via Carrier-Mediated Diffusion in membranes. AIChE Journal 20(3): 417-443.
- Schultz, 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 28 (13&14):2149-2165.

- Smith, Kenneth A., Meldon, Jerry H. and Colton, Clark K. 1973. An Analysis of Carrier-Facilitated Transport. AIChE Journal 19(1): 102-111.
- Tanikaki, Masataka, Shiode, Tetsuo, Ueda, Masami and Eguchi, Wataru. 1988. Facilitated Transport of Zinc Chloride through Hollow fiber Supported Liquid Membrane. Part 2. Membrane Stability. Separation Science and Technology 23(10&11): 1161-1169.
- 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, Masaaki, Masuyama, Hideto, Takaya, Hitoshi, and Asano, Shigehiro. 1987. Development of Spiral-Type Supported Liquid Membrane Module for Separation and Concentration Metal Ions. Separation Science and Technology 22(11):2175-2201.
- Tuddenham, W.M. and Dougall, P.A. 1979. Encyclopedia of Chemical Technology Volume 6. USA: John Wiley & Sons. 819-869.
- Yang, Ming-Chien, and Cussler, e.L. 1986. Designing Hollow Fiber Contractor. AIChE Journal 32(11): 1910-1916.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยางค์ด้วยเส้นใยกลวงหลายชั้นตอน

ค่าต่าง ๆ ที่ใช้	
A	700 cm ² /cm
k _B	7.27 x 10 ⁻⁶ cm/s
k _m	0.76 x 10 ⁻⁵ cm/s
K _{ex}	1.8 x 10 ⁻³
x	20 cm
W _{Cu}	63.5
W _{D2EHPA}	322
ε	1
ρ _{D2EHPA}	0.98 g/cm ³

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

การแปลงหน่วยความเข้มข้นของไอออนทองแดงจาก ppm เป็น mol/l

$$C_{(mol/l)} = \frac{C_{(ppm)} \cdot (1 \times 10^{-6}) \cdot 1000}{W_{Cu}}$$

ถ้าความเข้มข้นของไอออนทองแดง คือ 100 ppm

$$\begin{aligned} C_{(mol/l)} &= \frac{100 \cdot (1 \times 10^{-6}) \cdot 1000}{63.5} \\ &= 1.5748 \times 10^{-3} \text{ mol / l} \end{aligned}$$

การแปลงหน่วยความเข้มข้นของสารสกัดจาก % v/v เป็น mol/l

$$B_{(mol/l)} = \frac{\rho_{D2EHPA} \cdot B_{(\%v/v)} \cdot 10}{W_{D2EHPA}}$$

ถ้าความเข้มข้นของสารสกัด คือ 25 %v/v

$$B_{(mol/l)} = \frac{0.98 \cdot 25 \cdot 10}{322}$$

$$= 0.76 \text{ mol / l}$$

การแก้สมการที่ 4.2 เพื่อหาค่า a

จากสมการที่ 4.2

$$K_{ex} = \frac{(M_0^f + a) \cdot (H_0^f + 2a)^2}{(C_0^f - a) \cdot (B_0^f - 2a)^2}$$

$$K_{ex}(C_0^f - a)(B_0^f - 2a)^2 = (M_0^f + a)\{(H_0^f)^2 + (4a H_0^f) + 4a^2\}$$

$$(K_{ex}C_0^f - K_{ex}a)\{(B_0^f)^2 - (4a B_0^f) + 4a^2\} = (M_0^f + a)\{(H_0^f)^2 + (4a H_0^f) + 4a^2\}$$

$$\begin{aligned} \text{L.S.} &= \{K_{ex}C_0^f(B_0^f)^2\} - (4a B_0^f K_{ex}C_0^f) + (4a^2 K_{ex}C_0^f) - \{aK_{ex}(B_0^f)^2\} + (4a^2 K_{ex} B_0^f) - (4a^3 K_{ex}) \\ &= - (4K_{ex})a^3 + \{(4 K_{ex}C_0^f) + (4K_{ex} B_0^f)\}a^2 - \{(4B_0^f K_{ex}C_0^f) + (K_{ex}(B_0^f)^2)\}a + \{K_{ex}C_0^f(B_0^f)^2\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{R.S.} &= \{M_0^f(H_0^f)^2\} + (4aH_0^f M_0^f) + (4a^2 M_0^f) + \{a(H_0^f)^2\} + (4a^2 H_0^f) + (4a^3) \\ &= (4a^3) + (4 M_0^f + 4 H_0^f)a^2 + \{(4H_0^f M_0^f + (H_0^f)^2)\}a + \{M_0^f(H_0^f)^2\} \end{aligned}$$

$$\text{จัดให้อยู่ในรูป : } z^3 + b_2z^2 + b_1z + b_0 = 0$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad b_0 &= [\{M_0^f(H_0^f)^2\} - \{K_{ex}C_0^f(B_0^f)^2\}] / [(4+4K_{ex})] \\ b_1 &= [\{(4H_0^f M_0^f + (H_0^f)^2)\} + \{(4B_0^f K_{ex}C_0^f) + (K_{ex}(B_0^f)^2)\}] / [(4+4K_{ex})] \\ b_2 &= [(4 M_0^f + 4 H_0^f) - \{(4 K_{ex}C_0^f) + (4K_{ex} B_0^f)\}] / [(4+4K_{ex})] \end{aligned}$$

จากนั้นจึงแก้สมการกำลังสาม (cubic equation) โดยใช้วิธีต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ให้} \quad p &= (3b_1 - b_2^2) / 3 & q &= (9 b_1 b_2 - 27 b_0 - 2 b_2^3) / 27 \\ Q &= p / 3 & R &= q / 2 \\ D &= Q^3 + R^2 \end{aligned}$$

และ

$$S = \sqrt[3]{R + \sqrt{D}}$$

$$T = \sqrt[3]{R - \sqrt{D}}$$

ถ้า $D > 0$:

$$z_1 = -\frac{b_2}{3} + (S + T)$$

$$z_2 = -\frac{b_2}{3} - \frac{1}{2}(S + T) + \frac{1}{2}i\sqrt{3}(S - T)$$

$$z_3 = -\frac{b_2}{3} - \frac{1}{2}(S + T) - \frac{1}{2}i\sqrt{3}(S - T)$$

ถ้า $D = 0$:

$$z_1 = -\frac{b_2}{3} + 2T$$

$$z_2 = z_3 = -\frac{b_2}{3} - T$$

ถ้า $D < 0$:

$$z_1 = 2\sqrt{-Q} \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) - \frac{b_2}{3}$$

$$z_2 = 2\sqrt{-Q} \cos\left(\frac{\theta + 2\pi}{3}\right) - \frac{b_2}{3}$$

$$z_3 = 2\sqrt{-Q} \cos\left(\frac{\theta + 4\pi}{3}\right) - \frac{b_2}{3}$$

โดยให้

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{R}{\sqrt{-Q^3}}\right)$$

การคำนวณหาความเข้มข้นของไอออนทองแดงขาออกทั้งในสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปหลังจากผ่านตำแหน่งเซนติเมตรที่ 1 ($dx = 1 \text{ cm}$)

1. คำนวณช่วงที่สารละลายป้อนและสารละลายสตรีปยังไม่ไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

กำหนดสภาวะก่อนการสกัด ดังแสดงในตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข-1 แสดงสภาวะก่อนการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในช่วงที่สารละลายป้อนและสารละลายสตรีปยังไม่ไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

	ข้อกำหนด
C_0^f	100 ppm = $1.5748 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$
C_0^s	0 ppm = 0 mol/l
H_0^f	10^{-7} mol/l
B_0^f, B_0^s	1 %v/v = $3.04348 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$
M_0^f, M_0^s	0 mol/l
Q^f	200 ml/min. = $3.33333 \times 10^{-3} \text{ dm}^3/\text{s}$
Q^s	200 ml/min. = $3.33333 \times 10^{-3} \text{ dm}^3/\text{s}$

1.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมี

ไอออนทองแดงจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA ดังสมการที่ 4.1 และเมื่อแทนค่าต่าง ๆ จากตารางที่ ข-1 ลงในสมการที่ 4.2 จะได้

$$a = 6.91514 \times 10^{-4}$$

ดังนั้น จะสามารถหาความเข้มข้นของไอออนทองแดงและสารอื่น ๆ ที่สภาวะสมดุลด้านสารละลายป้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 C_1^{\text{eq}} &= C_0^f - a \\
 &= 1.5748 \times 10^{-3} - 6.91514 \times 10^{-4} \\
 &= 8.83286 \times 10^{-4} \text{ mol/l}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_1^{\text{eq}} &= B_0^f - 2a \\
 &= 3.04348 \times 10^{-2} - (2 \times 6.91514 \times 10^{-4}) \\
 &= 2.90517 \times 10^{-2} \text{ mol/l}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_1^{\text{eq}} &= M_0^f + a \\
 &= 0 + 6.91514 \times 10^{-4} \\
 &= 6.91514 \times 10^{-4} \text{ mol/l}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_1^{\text{eq}} &= H_0^f + 2a \\
 &= 10^{-7} + (2 \times 6.91514 \times 10^{-4}) \\
 &= 1.38312 \times 10^{-3} \text{ mol/l}
 \end{aligned}$$

1.2 การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

จากสมการที่ 4.7 และ 4.8 จะสามารถหาอัตราการซึมผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนของไฮดรอกซิดและสารสกัด D2EHPA ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 J_M &= k_m (M_1^f - M_2^s) \\
 &= (7.6 \times 10^{-7}) (6.91514 \times 10^{-4} - 0) \\
 &= 5.2555 \times 10^{-10} \text{ mol/dm}^2\text{-s} \\
 &= 5.2555 \times 10^{-12} \text{ mol/cm}^2\text{-s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_B &= k_B (B_1^s - B_2^f) \\
 &= (7.27 \times 10^{-7}) (3.04348 \times 10^{-2} - 2.90517 \times 10^{-2}) \\
 &= 1.00551 \times 10^{-9} \text{ mol/dm}^2\text{-s} \\
 &= 1.00551 \times 10^{-11} \text{ mol/cm}^2\text{-s}
 \end{aligned}$$

1.3 สภาวะสุดท้ายของสารต่าง ๆ หลังจากมีการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

จากสมการที่ 4.9 และ 4.10 จะสามารถหาปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและสารสกัด D2EHPA ที่แพร่ไปผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังอีกฝั่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned} dM_1 &= (5.2555 \times 10^{-12}) (700) (1) / (3.33333 \times 10^{-3}) \\ &= 1.10365 \times 10^{-6} \text{ mol/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dB_1 &= (1.00551 \times 10^{-11}) (700) (1) / (3.33333 \times 10^{-3}) \\ &= 2.11157 \times 10^{-6} \text{ mol/l} \end{aligned}$$

ดังนั้นความเข้มข้นสุดท้ายของสารต่าง ๆ ทั้งฝั่งของสารละลายป้อนและสารละลายสตริป จะสามารถหาได้จากสมการที่ 4.11 – 4.16 ดังนี้

$$\begin{aligned} C_1^f &= C_1^{eq} \\ &= 8.83286 \times 10^{-4} \text{ mol/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_1^f &= H_1^{eq} \\ &= 1.38312 \times 10^{-3} \text{ mol/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1^f &= B_1^{eq} + dB_1 \\ &= 2.90517 \times 10^{-2} + 2.11157 \times 10^{-6} \\ &= 2.90538 \times 10^{-2} \text{ mol/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_1^f &= M_1^{eq} - dM_1 \\ &= 6.91514 \times 10^{-4} - 1.10365 \times 10^{-6} \\ &= 6.9041 \times 10^{-4} \text{ mol/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1^s &= B_0^s - dB_1 \\ &= 3.04348 \times 10^{-2} - 2.11157 \times 10^{-6} \\ &= 3.04326 \times 10^{-2} \text{ mol/l} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_1^s &= M_0^s + dM_1 \\
 &= 0 + 1.10365 \times 10^{-6} \\
 &= 1.10365 \times 10^{-6} \text{ mol/l}
 \end{aligned}$$

2. คำนวณช่วงที่สารละลายป้อนและสารละลายstripperไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

กำหนดสภาวะก่อนการสกัด ดังแสดงในตารางที่ ข-2

ตารางที่ ข-2 แสดงสภาวะก่อนการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในช่วงที่สารละลายป้อนและสารละลายstripperไหลมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

	ข้อกำหนด
C_0^f	100 ppm = 1.5748×10^{-3} mol/l
C_{19}^s	0 ppm = 0 mol/l
H_0^f	10^{-7} mol/l
B_0^f	2.29630×10^{-2} mol/l
B_0^s	3.03596×10^{-2} mol/l
M_0^f	3.64563×10^{-3} mol/l
M_0^s	3.84615×10^{-5} mol/l
Q^f	200 ml/min. = 3.33333×10^{-3} dm ³ /s
Q^s	200 ml/min. = 3.33333×10^{-3} dm ³ /s

2.1 การเกิดปฏิกิริยาเคมี

ไอออนทองแดงจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA ดังสมการที่ 4.1 และเมื่อแทนค่าต่าง ๆ จากตารางที่ ข-2 ลงในสมการที่ 4.2 จะได้

$$a = 2.73891 \times 10^{-4}$$

ดังนั้น จะสามารถหาความเข้มข้นของไอออนทองแดงและสารอื่น ๆ ที่สภาวะสมดุลด้านสารละลายป้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}C_1^{\text{eq}} &= C_0^f - a \\ &= 1.5748 \times 10^{-3} - 2.73891 \times 10^{-4} \\ &= 1.3009 \times 10^{-3} \text{ mol/l}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B_1^{\text{eq}} &= B_0^f - 2a \\ &= 2.29630 \times 10^{-2} - (2 \times 2.73891 \times 10^{-4}) \\ &= 2.24152 \times 10^{-2} \text{ mol/l}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_1^{\text{eq}} &= M_0^f + a \\ &= 3.64563 \times 10^{-3} + 2.73891 \times 10^{-4} \\ &= 3.91952 \times 10^{-3} \text{ mol/l}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}H_1^{\text{eq}} &= H_0^f + 2a \\ &= 10^{-7} + (2 \times 2.73891 \times 10^{-4}) \\ &= 5.47882 \times 10^{-4} \text{ mol/l}\end{aligned}$$

ส่วนด้านสารละลายสตรีป ไอออนทองแดงจะถูกสตรีปออกจากสารประกอบเชิงซ้อนจนหมด และจากสมการที่ 4.17 – 4.19 จะสามารถหาความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ด้านสารละลายสตรีปได้ดังนี้

$$\begin{aligned}C_r^s &= C_{19}^s + M_0^s \\ &= 0 + 3.84615 \times 10^{-5} \\ &= 3.84615 \times 10^{-5} \text{ mol/l}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B_r^s &= B_0^s + 2M_0^s \\ &= 3.03596 \times 10^{-2} + (2 \times 3.84615 \times 10^{-5}) \\ &= 3.04365 \times 10^{-2} \text{ mol/l}\end{aligned}$$

$$M_r^s = 0 \text{ mol/l}$$

2.2 การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

จากสมการที่ 4.7 และ 4.8 จะสามารถหาอัตราการซึมผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและสารสกัด D2EHPA ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 J_M &= k_m (M_1^f - M_2^s) \\
 &= (7.6 \times 10^{-7}) (3.91952 \times 10^{-3} - 0) \\
 &= 2.97883 \times 10^{-9} \text{ mol/dm}^2\text{-s} \\
 &= 2.97883 \times 10^{-11} \text{ mol/cm}^2\text{-s} \\
 J_B &= k_B (B_1^s - B_2^f) \\
 &= (7.27 \times 10^{-7}) (3.04365 \times 10^{-2} - 2.24152 \times 10^{-2}) \\
 &= 5.83148 \times 10^{-9} \text{ mol/dm}^2\text{-s} \\
 &= 5.83148 \times 10^{-11} \text{ mol/cm}^2\text{-s}
 \end{aligned}$$

2.3 สภาวะสุดท้ายของสารต่าง ๆ หลังจากมีการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว

จากสมการที่ 4.9 และ 4.10 จะสามารถหาปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนทองแดงและสารสกัด D2EHPA ที่แพร่ไปผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังอีกฝั่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 dM_1 &= (2.97883 \times 10^{-11}) (700) (1) / (3.33333 \times 10^{-3}) \\
 &= 6.25554 \times 10^{-6} \text{ mol/l} \\
 dB_1 &= (5.83148 \times 10^{-11}) (700) (1) / (3.33333 \times 10^{-3}) \\
 &= 1.22461 \times 10^{-5} \text{ mol/l}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นความเข้มข้นสุดท้ายของสารต่าง ๆ ทั้งฝั่งของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป จะสามารถหาได้จากสมการที่ 4.20 – 4.26 ดังนี้

$$\begin{aligned}
 C_1^f &= C_1^{eq} \\
 &= 1.3009 \times 10^{-3} \text{ mol/l}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_1^f &= H_1^{\text{eq}} \\
 &= 5.47882 \times 10^{-4} \text{ mol/l} \\
 B_1^f &= B_1^{\text{eq}} + dB_1 \\
 &= 2.24152 \times 10^{-2} + 1.22461 \times 10^{-5} \\
 &= 2.24274 \times 10^{-2} \text{ mol/l} \\
 M_1^f &= M_1^{\text{eq}} - dM_1 \\
 &= 3.91952 \times 10^{-3} - 6.25554 \times 10^{-6} \\
 &= 3.91326 \times 10^{-3} \text{ mol/l} \\
 B_1^s &= B_r^s - dB_1 \\
 &= 3.04365 \times 10^{-2} - 1.22461 \times 10^{-5} \\
 &= 3.04242 \times 10^{-2} \text{ mol/l} \\
 M_1^s &= M_r^s + dM_1 \\
 &= 0 + 6.25554 \times 10^{-6} \\
 &= 6.25554 \times 10^{-6} \text{ mol/l} \\
 C_{20}^s &= C_r^s \\
 &= 3.84615 \times 10^{-5} \text{ mol/l}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาร้อยละการสกัดและสตรีปของไอออนทองแดง

จากตารางที่ 5.3 สำหรับการคำนวณหาร้อยละการสกัดและสตรีปของไอออนทองแดงที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 100 ppm

$$\begin{aligned}
 \% \text{Extraction} &= \frac{(C_0^f - C_{20}^f)}{C_0^f} \times 100 \% \\
 &= \frac{(100 - 84.73)}{100} \times 100 \% \\
 &= 15.27 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\% \text{ Recovery} &= \frac{C^s_{20}}{C^f_0} \times 100\% \\ &= \frac{15.27}{100} \times 100\% \\ &= 15.27\%\end{aligned}$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 , 2 และ 4 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว เทียบกับผลการทดลองจริง

สภาวะเริ่มต้น	%D2EHPA (%v/v)	%extraction (dx=1)	%extraction (dx=2)	%extraction (dx=4)	%extraction(อิศรา, 1998) (experiment)
$C_{in}^f = 100 \text{ ppm}$ $PH_{in}^f = 7$ $Q^f = 200 \text{ ml/min.}$ $A = 1.4 \text{ m}^2$ $x = 20 \text{ cm}$ $\epsilon = 1$	1	15.27%	15.02%	14.56%	17.64%
	2	25.80%	25.34%	24.49%	30.26%
	3	34.49%	33.85%	32.67%	33.91%
	4	41.97%	41.17%	39.72%	43.01%
	5	48.54%	47.62%	45.92%	52.02%
	10	72.35%	71.03%	68.59%	74.28%
	15	86.27%	84.91%	82.34%	85.00%
	20	93.93%	92.80%	90.53%	85.06%
	25	97.67%	96.88%	95.14%	89.96%

ตารางที่ ค-2 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 10 ppm

สภาวะเริ่มต้น	%D2EHPA (%v/v)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 10$ ppm $PH_{in}^f = 7$ $Q^f = 200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	2.77	7.23	72.33%	72.33%
	2	0.61	9.39	93.93%	93.93%
	3	0.08	9.92	99.22%	99.22%
	4	0.01	9.99	99.94%	99.94%
	5	0.00	10.00	100.00%	100.00%
	10	0.00	10.00	100.00%	100.00%
	15	0.00	10.00	100.00%	100.00%
	20	0.00	10.00	100.00%	100.00%
	25	0.00	10.00	100.00%	100.00%

ตารางที่ ค-3 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 50 ppm

สภาวะเริ่มต้น	%D2EHPA (%v/v)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 50$ ppm $PH_{in}^f = 7$ $Q^f = 200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	37.10	12.90	25.80%	25.80%
	2	29.02	20.98	41.97%	41.97%
	3	22.81	27.19	54.39%	54.39%
	4	17.84	32.16	64.31%	64.31%
	5	13.83	36.17	72.35%	72.35%
	10	3.03	46.97	93.93%	93.93%
	15	0.39	49.61	99.22%	99.22%
	20	0.03	49.97	99.94%	99.94%
	25	0.00	49.99	100.00%	100.00%

ตารางที่ ค-4 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 100 ppm

สภาวะเริ่มต้น	%D2EHPA (%v/v)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm $PH_{in}^f = 7$ $Q^f = 200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	84.73	15.27	15.27%	15.27%
	2	74.20	25.80	25.80%	25.80%
	3	65.51	34.49	34.49%	34.49%
	4	58.03	41.97	41.97%	41.97%
	5	51.46	48.54	48.54%	48.54%
	10	27.65	72.35	72.35%	72.35%
	15	13.73	86.27	86.27%	86.27%
	20	6.07	93.93	93.93%	93.93%
	25	2.33	97.67	97.67%	97.67%

ตารางที่ ค-5 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 300 ppm

สภาวะเริ่มต้น	%D2EHPA (%v/v)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 300$ ppm $PH_{in}^f = 7$ $Q^f = 200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	281.19	18.82	6.27%	6.27%
	2	266.77	33.23	11.08%	11.08%
	3	254.20	45.80	15.27%	15.27%
	4	242.82	57.18	19.06%	19.06%
	5	232.36	67.64	22.55%	22.55%
	10	188.71	111.29	37.10%	37.10%
	15	154.38	145.62	48.54%	48.54%
	20	126.18	173.82	57.94%	57.94%
	25	102.68	197.32	65.77%	65.77%

ตารางที่ ค-6 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 500 ppm

สภาวะเริ่มต้น	%D2EHPA (%v/v)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 500$ ppm $PH_{in}^f = 7$ $Q^f = 200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	479.70	20.29	4.06%	4.06%
	2	463.51	35.52	7.30%	7.30%
	3	449.12	50.88	10.18%	10.18%
	4	435.95	64.07	12.81%	12.81%
	5	423.66	76.34	15.27%	15.27%
	10	370.92	129.08	25.82%	25.82%
	15	327.53	172.50	34.50%	34.50%
	20	290.10	209.88	41.98%	41.98%
	25	257.29	242.71	48.54%	48.54%

ตารางที่ ค-7 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงเป็น 1000 ppm

สภาวะเริ่มต้น	%D2EHPA (%v/v)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 1000$ ppm $PH_{in}^f = 7$ $Q^f = 200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	977.94	22.06	2.21%	2.21%
	2	959.38	40.58	4.06%	4.06%
	3	942.57	57.40	5.74%	5.74%
	4	926.97	73.04	7.30%	7.30%
	5	912.21	87.80	8.78%	8.78%
	10	847.35	152.74	15.27%	15.27%
	15	791.67	208.44	20.83%	20.83%
	20	741.86	258.16	25.82%	25.82%
	25	696.75	303.26	30.33%	30.33%

ตารางที่ ค-8 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	PH_{in}^f	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm %D2EHPA=1%v/v $Q^f=200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	100.00	0.00	0.00%	0.00%
	2	99.95	0.05	0.05%	0.05%
	3	96.41	3.59	3.59%	3.59%
	4	86.69	13.31	13.31%	13.31%
	5	84.93	15.07	15.07%	15.07%
	6	84.75	15.25	15.25%	15.25%
	7	84.73	15.27	15.27%	15.27%
	8	84.73	15.27	15.27%	15.27%

ตารางที่ ค-9 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 3 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	PH_{in}^f	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm %D2EHPA=3%v/v $Q^f=200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	100.00	0.00	0.00%	0.00%
	2	99.53	0.47	0.47%	0.47%
	3	83.00	17.00	17.00%	17.00%
	4	67.65	32.35	32.35%	32.35%
	5	65.72	34.28	34.28%	34.28%
	6	65.53	34.47	34.47%	34.47%
	7	65.51	34.49	34.49%	34.49%
	8	65.51	34.49	34.49%	34.49%

ตารางที่ ค-10 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 5 %v/v

สถานะเริ่มต้น	PH_{in}^f	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm %D2EHPA=5%v/v $Q^f=200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	99.99	0.01	0.01%	0.01%
	2	98.71	1.29	1.29%	1.29%
	3	70.08	29.92	29.92%	29.92%
	4	53.56	46.44	46.44%	46.44%
	5	51.66	48.34	48.34%	48.34%
	6	51.47	48.53	48.53%	48.53%
	7	51.46	48.54	48.54%	48.54%
	8	51.45	48.55	48.55%	48.55%

ตารางที่ ค-11 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 10 %v/v

สถานะเริ่มต้น	PH_{in}^f	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm %D2EHPA=10%v/v $Q^f=200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	99.95	0.05	0.05%	0.05%
	2	95.07	4.93	4.93%	4.93%
	3	44.67	55.33	55.33%	55.33%
	4	29.39	70.61	70.61%	70.61%
	5	27.83	72.17	72.17%	72.17%
	6	27.67	72.33	72.33%	72.33%
	7	27.65	72.35	72.35%	72.35%
	8	27.65	72.35	72.35%	72.35%

ตารางที่ ค-12 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 15 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	PH_{in}^f	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm %D2EHPA=15%v/v $Q^f=200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	99.88	0.12	0.12%	0.12%
	2	89.58	10.42	10.42%	10.42%
	3	27.26	72.74	72.74%	72.74%
	4	15.00	85.00	85.00%	85.00%
	5	13.86	86.14	86.14%	86.14%
	6	13.74	86.26	86.26%	86.26%
	7	13.73	86.27	86.27%	86.27%
	8	13.73	86.27	86.27%	86.27%

ตารางที่ ค-13 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	C_{in}^f (ppm)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
%D2EHPA=1%v/v $PH_{in}^f = 7$ $Q^f = 200$ ml/min. $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	0.00	1.00	100.00%	100.00%
	5	0.30	4.70	93.92%	93.92%
	7.5	1.32	6.18	82.44%	82.44%
	10	2.77	7.23	72.33%	72.33%
	50	37.10	12.90	25.80%	25.80%
	100	84.73	15.27	15.27%	15.27%
	200	182.46	17.55	8.77%	8.77%
	300	281.19	18.82	6.27%	6.27%
	400	380.34	19.67	4.92%	4.92%
	500	479.70	20.29	4.06%	4.06%
	1000	977.94	22.06	2.21%	2.21%

ตารางที่ ค-14 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 3 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	C_{in}^f	C_{out}^f	C_{out}^s	%extraction	%recovery
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	Calculation	
%D2EHPA=3%v/v	1	0.00	1.00	100.00%	100.00%
$PH_{in}^f = 7$	5	0.00	5.00	100.00%	100.00%
$Q^f = 200$ ml/min.	7.5	0.00	7.50	100.00%	100.00%
$A = 1.4$ m ²	10	0.08	9.92	99.22%	99.22%
$x = 20$ cm	50	22.81	27.19	54.39%	54.39%
$\epsilon = 1$	100	65.51	34.49	34.49%	34.49%
	200	158.33	41.67	20.83%	20.83%
	300	254.20	45.80	15.27%	15.27%
	400	351.31	48.69	12.17%	12.17%
	500	449.12	50.88	10.18%	10.18%
	1000	942.57	57.40	5.74%	5.74%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-15 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 5 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	C_{in}^f	C_{out}^f	C_{out}^s	%extraction	%recovery
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	Calculation	
%D2EHPA=5%v/v	1	0.00	1.00	100.00%	100.00%
$PH_{in}^f = 7$	5	0.00	5.00	100.00%	100.00%
$Q^f = 200$ ml/min.	7.5	0.00	7.50	100.00%	100.00%
$A = 1.4$ m ²	10	0.00	10.00	100.00%	100.00%
$x = 20$ cm	50	13.83	36.17	72.35%	72.35%
$\epsilon = 1$	100	51.46	48.54	48.54%	48.54%
	200	139.33	60.67	30.34%	30.34%
	300	232.36	67.64	22.55%	22.55%
	400	327.44	72.56	18.14%	18.14%
	500	423.66	76.34	15.27%	15.27%
	1000	912.20	87.80	8.78%	8.78%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-16 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 10 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	C_{in}^f	C_{out}^f	C_{out}^s	%extraction	%recovery
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	Calculation	
%D2EHPA=10%v/v	1	0.00	1.00	100.00%	100.00%
$PH_{in}^f = 7$	5	0.00	5.00	100.00%	100.00%
$Q^f = 200 \text{ ml/min.}$	7.5	0.00	7.50	100.00%	100.00%
$A = 1.4 \text{ m}^2$	10	0.00	10.00	100.00%	100.00%
$x = 20 \text{ cm}$	50	3.03	46.97	93.93%	93.93%
$\epsilon = 1$	100	27.65	72.35	72.35%	72.35%
	200	102.92	97.08	48.54%	48.54%
	300	188.71	111.29	37.10%	37.10%
	400	278.70	121.30	30.32%	30.32%
	500	370.92	129.08	25.82%	25.82%
	1000	847.31	152.69	15.27%	15.27%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-17 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 25 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	C_{in}^f	C_{out}^f	C_{out}^s	%extraction	%recovery
	(ppm)	(ppm)	(ppm)	Calculation	
%D2EHPA=25%v/v PH _{in} ^f = 7 Q ^f = 200 ml/min. A = 1.4 m ² x = 20 cm ε = 1	1	0.00	1.00	100.00%	100.00%
	5	0.00	5.00	100.00%	100.00%
	7.5	0.00	7.50	100.00%	100.00%
	10	0.00	10.00	100.00%	100.00%
	50	0.00	50.00	100.00%	100.00%
	100	2.33	97.67	97.67%	97.67%
	200	39.47	160.53	80.27%	80.27%
	300	102.68	197.32	65.77%	65.77%
	400	177.02	222.99	57.75%	57.75%
	500	257.29	242.71	48.54%	48.54%
1000	696.75	303.26	30.33%	30.33%	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-18 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการใช้ของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 1 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	Q^f (ml/min.)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm	1	0.00	100.00	100.00%	100.00%
$PH_{in}^f = 7$	10	47.37	52.63	52.63%	52.63%
%D2EHPA=1%v/v	50	70.00	30.00	30.00%	30.00%
$A = 1.4$ m ²	100	77.96	22.04	22.04%	22.04%
$x = 20$ cm	200	84.73	15.27	15.27%	15.27%
$\epsilon = 1$	300	88.09	11.91	11.91%	11.91%
	400	90.17	9.83	9.83%	9.83%
	500	91.61	8.39	8.39%	8.39%
	1000	95.11	4.89	4.89%	4.89%

ตารางที่ ค-19 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการใช้ของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 2 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	Q^f (ml/min.)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm	1	0.00	100.00	100.00%	100.00%
$PH_{in}^f = 7$	5	14.41	85.59	85.59%	85.59%
%D2EHPA=2%v/v	10	25.51	74.49	74.49%	74.49%
$A = 1.4$ m ²	50	53.32	46.68	46.68%	46.68%
$x = 20$ cm	100	64.32	35.68	35.68%	35.68%
$\epsilon = 1$	200	74.20	25.80	25.80%	25.80%
	500	84.94	15.07	15.06%	15.07%
	1000	90.87	9.15	9.13%	9.15%

ตารางที่ ค-20 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการใช้ของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 3 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	Q^f (ml/min.)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm $PH_{in}^f = 7$ %D2EHPA=3%v/v $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	0.00	100.00	100.00%	100.00%
	5	4.93	95.07	95.07%	95.07%
	10	13.09	86.91	86.91%	86.91%
	50	40.99	59.01	59.01%	59.01%
	100	53.63	46.37	46.37%	46.37%
	200	63.51	34.49	34.49%	34.49%
	500	79.07	20.93	20.93%	20.93%
	1000	86.97	13.06	13.03%	13.06%

ตารางที่ ค-21 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการใช้ของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 5 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	Q^f (ml/min.)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm $PH_{in}^f = 7$ %D2EHPA=5%v/v $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	0.00	100.00	100.00%	100.00%
	5	0.31	99.69	99.69%	99.69%
	10	2.64	97.36	97.36%	97.36%
	50	23.90	76.10	76.10%	76.10%
	100	37.43	62.57	62.57%	62.57%
	200	51.46	48.54	48.54%	48.54%
	500	68.89	31.11	31.11%	31.11%
	1000	79.89	20.21	20.11%	20.21%

ตารางที่ ค-22 แสดงผลการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงโดยใช้โปรแกรมที่คำนวณทุก ๆ 1 เซนติเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการใช้ของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA เป็น 10 %v/v

สภาวะเริ่มต้น	Q^f (ml/min.)	C_{out}^f (ppm)	C_{out}^s (ppm)	%extraction	%recovery
				Calculation	
$C_{in}^f = 100$ ppm $PH_{in}^f = 7$ %D2EHPA=10%v/v $A = 1.4$ m ² $x = 20$ cm $\epsilon = 1$	1	0.00	100.00	100.00%	100.00%
	5	0.00	100.00	100.00%	100.00%
	10	0.01	99.99	99.99%	99.99%
	50	4.79	95.21	95.21%	95.21%
	100	14.02	85.98	85.98%	85.98%
	200	27.65	72.35	72.35%	72.35%
	500	48.99	51.02	51.01%	51.02%
	1000	64.81	35.28	35.19%	35.28%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้วิจัย

นาย เกษม หฤทัยธนาสันต์ เกิดเมื่อวันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2516 กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนแรกในจำนวนบุตรสามคน สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่ โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ต่อมาเข้าศึกษาต่อ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย