

บทที่ 3

กลไกการถ่ายเทมวล

บทนี้จะกล่าวถึงกลไกการถ่ายเทมวลแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว ต่อจากนั้นจะอธิบายกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่โดยอธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเน้นไปที่กรณีถ่ายเทมวลแบบสวนทาง ส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาของการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลว

3.1 กลไกการถ่ายเทมวล

ปกติกระบวนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน (Marr และ Kopp, 1982) ได้แก่

1. การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (film diffusion) ที่ผิวสัมผัสระหว่างวฏภาคสารละลายป้อนกับวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
2. การแพร่เข้าวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
3. การแพร่ผ่านวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
4. การแพร่ออกจากวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
5. การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่ผิวสัมผัสระหว่างวฏภาคสารละลายสตรีปกับวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

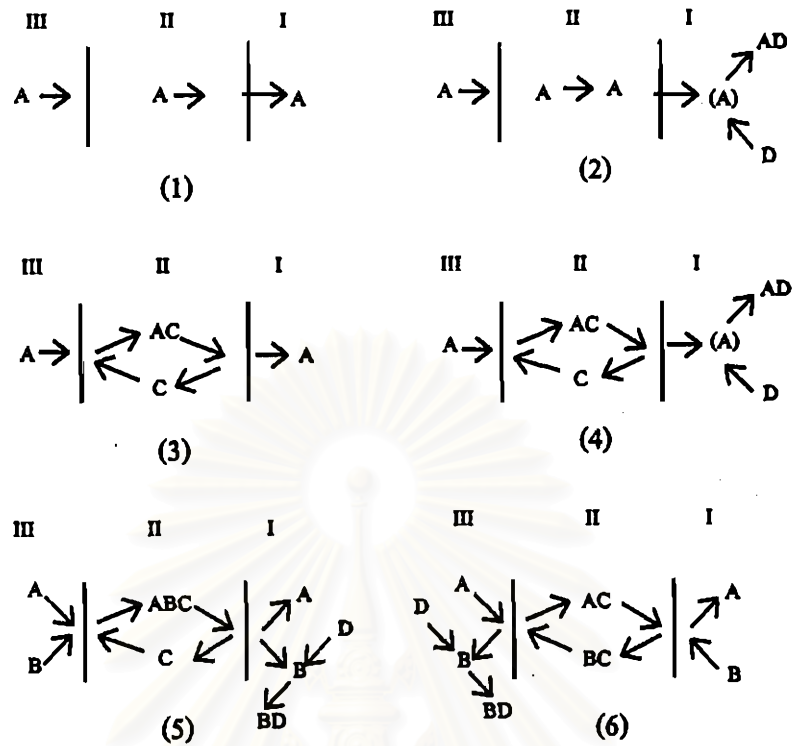
ถ้ากำหนดให้การแพร่ผ่านวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate determining step) กลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้เป็น 6 ประเภท (Marr และ Kopp, 1982) ได้แก่

3.1.1 การถ่ายเทมวลอย่างง่าย (simple permeation) การถ่ายเทมวลแบบนี้อาศัยความสามารถในการละลายขององค์ประกอบที่ต้องการแยกเท่านั้น ในกรณีนี้องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) มีอยู่ทั้งสองฝั่งของวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว และองค์ประกอบนี้สามารถละลายได้ในวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว การถ่ายเทมวลแบบนี้เริ่มโดยองค์ประกอบที่ต้องการแยกที่ละลายอยู่ในวัสดุภาคสารละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาคสารละลายป้อนกับวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้ องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะละลายในวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว แล้วจึงแพร่ผ่านวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัสดุภาคสารละลายศตริป โดยมีผลต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกเป็นแรงขับ ที่ผิวสัมผัสด้านนี้องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะละลายในวัสดุภาคสารละลายศตริป จากนั้นองค์ประกอบที่ต้องการแยกจึงแพร่ไปยังวัสดุภาคสารละลายศตริป ดังแสดงในรูป 3.1 (1)

3.1.2 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายที่มีปฏิกิริยาเคมี (simple permeation with chemical reaction) การถ่ายเทมวลแบบนี้ปรับปรุงมาจากการถ่ายเทมวลแบบแรก กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้เริ่มโดยองค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ที่ละลายอยู่ในวัสดุภาคสารละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาคสารละลายป้อนกับวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะละลายในวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว แล้วจึงแพร่ผ่านวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัสดุภาคสารละลายศตริป โดยมีผลต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกเป็นแรงขับ ที่ผิวสัมผัสด้านนี้องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะละลายในวัสดุภาคสารละลายศตริป และที่วัสดุภาคนี้องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ D เกิดเป็นสารประกอบที่ไม่สามารถละลายได้ในวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว (AD) ดังแสดงในรูป 3.1 (2) การทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกในฝั่งสารละลายศตริปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายได้ในวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวทำให้ผลต่างความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งเป็นแรงขับของการถ่ายเทมวลมีค่าสูงอยู่ตลอดเวลา กลไกแบบนี้ได้รับความสนใจในการนำไปใช้แยกฟีนอลจากน้ำทิ้ง แต่การนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังเป็นเรื่องยากเนื่องจากต้องใช้เวลาานเพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นสุดท้ายตามที่ต้องการ และปัญหาการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

3.1.3 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายโดยอาศัยสารตัวกลาง (simple carrier transport) สารตัวกลางที่ละลายในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวจะช่วยให้เลือกสกัดได้ดีขึ้นและเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล สารตัวกลางนี้ละลายได้เฉพาะในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวและสามารถทำปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้ดังแสดงในรูป 3.1 (3) อธิบายได้ดังนี้ องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ที่ละลายอยู่ในภูมิภาคสารละลายป้อนแพร่ไปยังผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้สารตัวกลาง (C) ที่ละลายอยู่ในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารตัวกลางกับองค์ประกอบที่ต้องการแยก (AC) จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านชั้นของภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายสกัด ที่ผิวสัมผัสด้านนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะแตกตัวให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกไปยังภูมิภาคสารละลายสกัด ขณะที่สารตัวกลางจะแพร่ย้อนกลับไปยังผิวสัมผัสแรกเพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกต่อไป

สารตัวกลางช่วยให้สารที่ต้องการแยกละลายในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทมวลจึงมีได้ขึ้นกับความแตกต่างของความเข้มข้นเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารตัวกลางในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ข้อจำกัดของกลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้คือกระบวนการถ่ายเทมวลจะหยุดเมื่อความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกของภูมิภาคทั้งสองฝั่งของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้การแยกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบให้มีหลายขั้นตอน



รูปที่ 3.1 กลไกการถ่ายเทมวลแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเยื่อเหลว (Marz และ Kopp, 1982)

โดยที่ I หมายถึงภูมิภาคสารละลายสตริป II หมายถึงภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว

III หมายถึงภูมิภาคสารละลายป้อน

3.1.4 การถ่ายเทมวลอย่างง่ายโดยอาศัยสารสกัดที่มีปฏิกิริยาเคมี (simple carrier transport with chemical reaction) กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้ดังแสดงในรูป 3.1 (4) สามารถอธิบายได้ดังนี้ องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ที่ละลายอยู่ในภูมิภาคสารละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้สารสกัด (C) ที่ละลายอยู่ในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับองค์ประกอบที่ต้องการแยก (AC) จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านชั้นของภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายสตริป ที่ผิวสัมผัสด้านนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะแตกตัวให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกไปยังภูมิภาคสารละลายสตริป ขณะ

เดียวกันที่วิทยาศาสตร์ละลายสตริปองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ D เกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายในเยื่อแผ่นเหลว (AD) ดังนั้นจึงสามารถลดความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกในฝั่งวิทยาศาสตร์ละลายป้อนได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับกลไกการถ่ายเทมวลแบบ

3.1.2

กรณีของการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (couple transport) เยื่อแผ่นเหลวจะประกอบไปด้วยสารสกัดซึ่งจะทำหน้าที่ถ่ายเทมวลเมื่อมีองค์ประกอบสองชนิดอยู่ในเวลาเดียวกัน ถ้าการเทมวลของทั้งสององค์ประกอบเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน จะเรียกกลไกนี้ว่า การถ่ายเทมวลแบบไปด้วยกัน (co-transport) ถ้าการถ่ายเทมวลเกิดในทิศทางตรงข้ามกันจะเรียกกลไกนี้ว่า การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (counter transport)

3.1.5 การถ่ายเทมวลแบบไปด้วยกัน (co-transport) องค์ประกอบสองชนิดจะถ่ายเทไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูป 3.1 (5) กลไกการถ่ายเทมวลอธิบายได้ดังนี้ องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) และองค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกัน (B) ที่ละลายอยู่ในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้สารสกัด (C) ที่ละลายอยู่ในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยกและองค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างองค์ประกอบที่ต้องการแยกและองค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกันกับสารสกัด (ABC) สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายสตริปเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับ ที่ผิวสัมผัสด้านนี้จะมีการปลดปล่อยองค์ประกอบทั้งสองไปยังวิทยาศาสตร์ละลายสตริปขณะที่สารสกัดทำการแพร่ย้อนกลับไปยังผิวสัมผัสแรก ถ้าองค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกัน (B) มีปริมาณมากเกินไปในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) จะยังคงถ่ายเทผ่านชั้นเยื่อแผ่นเหลวไปได้ แม้ว่าความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกในด้านวิทยาศาสตร์ละลายสตริปมากกว่าด้านวิทยาศาสตร์ละลายป้อน กระบวนการถ่ายเทมวลในทิศทางตรงข้ามกับผลต่างของความเข้มข้นเรียกว่า การสูบ (pumping) นอกจากนี้ยังสามารถลดความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกัน (B) ในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจนเป็นศูนย์ได้โดยเลือกใช้ปฏิกิริยาที่

เหมาะสมในวิทยาศาสตร์ละลายสตริป ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากด้าน
 วิทยาศาสตร์ไปยังด้านวิทยาศาสตร์ได้เกือบหมด แรงขับของกลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้คือ
 ผลต่างความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถ่ายเทไปด้วยกัน (B) ระหว่างสารละลายสองด้าน

3.1.6 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (counter transport) องค์ประกอบสองชนิดจะถ่ายเท
 ไปในทิศตรงข้ามกันดังแสดงในรูป 3.1 (6) กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ องค์
 ประกอบที่ต้องการแยก (A) ที่ละลายอยู่ในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์
 วิทยาศาสตร์กับวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้สารสกัด (C) ที่ละลายอยู่ในวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลว
 จะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการแยก เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับองค์
 ประกอบที่ต้องการแยก (AC) จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นแพร่ผ่านชั้นของวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่น
 เหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังผิวสัมผัสระหว่าง
 วิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายสตริป ที่ผิวสัมผัสด้านนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยา
 กับองค์ประกอบที่ถ่ายเทสวนทางได้สารสกัดและองค์ประกอบที่ต้องการแยกไปยังวิทยาศาสตร์
 วิทยาศาสตร์ป้อนขณะที่สารสกัดทำการแพร่ย้อนกลับไปยังผิวสัมผัสแรก

ถ้าองค์ประกอบที่ถ่ายเทสวนทางในวิทยาศาสตร์ละลายสตริป (B) มีปริมาณมากพอ จะช่วยให้
 การถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนไปยังวิทยาศาสตร์ละลายสตริปเกิด
 ได้อย่างสมบูรณ์

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ทางวิศวกรรมพบว่า (Marr และ Kopp, 1982)
 กลไกชนิดที่ 1 ไม่ได้รับความสนใจเพราะขาดประสิทธิภาพ
 กลไกชนิดที่ 2 เหมาะสำหรับใช้แยกไฮโดรคาร์บอนออกจากน้ำเสีย
 กลไกชนิดที่ 3 และ 4 ยังคงมีใช้ในกรณีเฉพาะ
 กลไกชนิดที่ 5 และ 6 ได้รับความสนใจมากเช่น นำมาใช้ในการนำไอออนโลหะกลับมาใช้ใหม่จาก
 น้ำเสียและน้ำที่ได้จากกระบวนการสกัดโลหะด้วยสารละลายของน้ำ (hydrometallurgical process)
 ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป

3.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่

การถ่ายเทมวลแบบควบคู่คือ กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากวัสดุภาวสารละลายไปยังวัสดุภาวสารละลายสตริป โดยมีผลต่างความเข้มข้นขององค์ประกอบอีกชนิดหนึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวล เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ในกรณีนี้ประกอบไปด้วยของเหลวที่ไม่ละลายน้ำ (วัสดุภาวสารละลายอินทรีย์) ที่มีสารสกัดซึ่งเลือกทำปฏิกิริยาเฉพาะกับไอออนที่ต้องการแยกเท่านั้น โดยวัสดุภาวสารละลายอินทรีย์จะถูกเคลื่อนที่ไปไว้ในรูพรุนของตัวรองรับพอลิเมอร์เกิดเป็นวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวกั้นระหว่างวัสดุภาวสารละลายของน้ำสองวัสดุภาว

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในกระบวนการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ที่แสดงในรูป 3.2 สำหรับกรณีไอออนทองแดง (Cu^{2+}) ไฮโดรเนียมไอออน (H^+) และสารสกัด (RH) สมดุลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวกับวัสดุภาวสารละลายของน้ำทั้งสองฝั่ง คือ

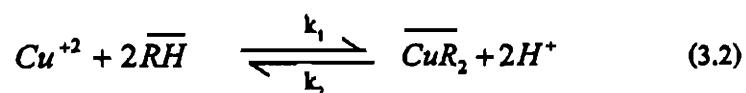


โดยการเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปในทิศทางใดขึ้นกับสถานะของระบบ

กระบวนการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวเกิดขึ้นโดย

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

ดังสมการสมดุล



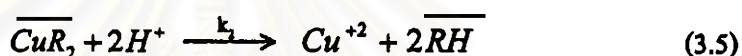
โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และ k_2 คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ไอออนทองแดง (Cu^{2+}) ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะถูกสกัดโดยปฏิกิริยาไปข้างหน้าระหว่าง ไอออนทองแดงและสารสกัด



ดังนั้นอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนคือ

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

สำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออน



อัตราการเกิด ไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนจะเป็น

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

ถ้าคูณสมการนี้ทั้งสองฝั่งด้วย -1 จะได้สมการแสดงอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนสำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับ

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

ดังนั้นอัตราการหายไปของไอออนทองแดงจากวัฏภาคสารละลายป้อนสุทธิ คือ

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

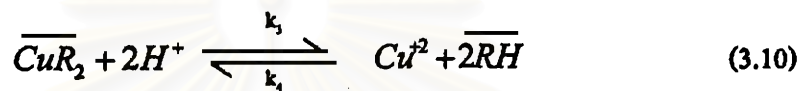
$$-r_c = k_1[\text{Cu}^{2+}][\text{RH}]^2 - k_2[\overline{\text{CuR}_2}][\text{H}^+]^2 \quad (3.9)$$

3. สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นซึ่งละลายได้ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์เท่านั้นจะแพร่ผ่านชั้นของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไป

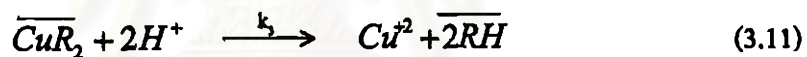
ยังผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาสารถายสตริปกับวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัส 2 ของรูปที่ 3.2) ขณะเดียวกันไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นจะแพร่จากผิวสัมผัส 1 ไปยังวัสดุภาสารถายป้อน เนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน

4. สารประกอบเชิงซ้อนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนได้ไอออนทองแดงและสารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัสดุภาสารถายสตริป (ผิวสัมผัส 2 ของรูป 3.2)

ดั่งสมการสมดุล



โดยที่ k_3 คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และ k_4 คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ไอออนทองแดงจะถูกนำกลับโดยปฏิกิริยาไปข้างหน้าระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออน



อัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัสดุภาสารถายสตริปจะเป็น

$$r_{c,forward} = k_3 [CuR_2] [H^+]^2 \quad (3.12)$$

สำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับระหว่างไอออนทองแดงและสารสกัด



อัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัสดุภาสารถายสตริปคือ

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

ถ้าคูณสมการนี้ทั้งสองฝั่งด้วย -1 จะได้สมการที่แสดงอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัสดุภาสารถายสตริปสำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับ

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

ดังนั้นอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสตริปสุทธิคือ

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

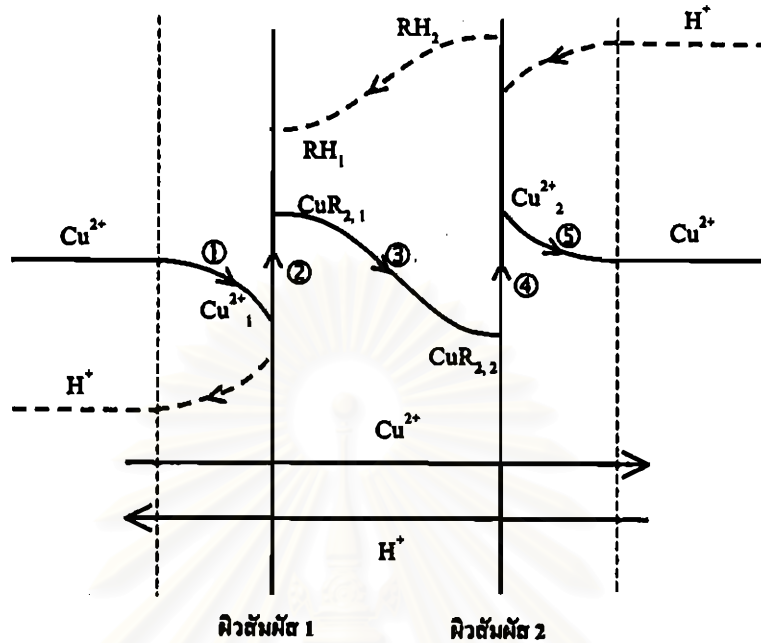
$$r_c = k_3 [CuR_2] [H^+]^2 - k_4 [Cu^{2+}] [RH]^2 \quad (3.17)$$

5. สารสกัดที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะแพร่ย้อนกลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อน ขณะเดียวกันไอออนทองแดงที่เกิดขึ้นจะแพร่จากผิวสัมผัส 2 ไปยังวัฏภาคสารละลายสตริป เนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไอออนทองแดง

ดังนั้นไอออนของทองแดงจึงเคลื่อนที่จากฝั่งสารละลายป้อนไปยังฝั่งสารละลายสตริป และไฮโดรเนียมไอออนเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามช่วยรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบ โดยมีผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายสตริปเป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวล (Mar และ Kopp, 1982; Schultz, 1988; O' Hara, 1989)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยาศาสตร์ละลายป้อน วิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว วิทยาศาสตร์ละลายตทวีป



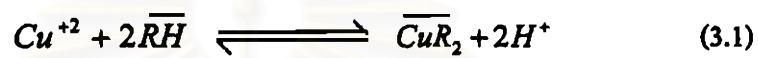
รูป 3.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในกระบวนการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ของการถ่ายเทไอออนทองแดง (Komasawa et al., 1993)

3.2.1 ทฤษฎี

นักวิจัยหลายท่าน (Smith et al., 1973; Schultz et al., 1974) พยายามหาทฤษฎีทั่วไปของการถ่ายเทแบบควบคู่ วิธีการที่นิยมใช้คือ การสมมุติให้เกิดสมดุลระหว่างองค์ประกอบชนิดต่าง ๆ ที่ทำปฏิกิริยากันในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว แล้วเชื่อมโยงความสัมพันธ์เหล่านั้นโดยใช้ค่าคงที่ของสมดุล (equilibrium constant) ที่เหมาะสม จากนั้นสร้างแบบจำลองของการแพร่สำหรับทุก องค์ประกอบ โดยอาศัยกฎของฟิคส์ (Fick's law) สมการที่ได้เหล่านั้นจะถูกอินทิเกรตระหว่างค่าเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดโดยค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย (distribution coefficients) และค่าความเข้มข้นของไอออนที่ถ่ายเทในสารละลายที่แวกล้อมอยู่ ผลที่ได้จะเป็นสมการค่าฟังก์ชัน (η_{max}) ของไอออนที่ถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งประกอบไปด้วยสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (diffusion coefficient) ค่าคงที่

ของสมดุค และสัมประสิทธิ์ของการกระจายของไอออนที่ซึมผ่าน สมการเหล่านี้ซับซ้อนและนำมาใช้ประโยชน์จริงได้น้อย

วิธีคิดที่ง่ายกว่า (Baker et al., 1980; Babcock et al., 1979; Babcock et al., 1980 อ้างถึงใน Baker and Blume, 1990) คือ ตัดผลขององค์ประกอบที่มีจำนวนน้อยในวิฤภาคเยื่อแผ่นเหลว และวิฤภาคสารละลายของน้ำออกไป ตัวอย่างเช่น จากปฏิกิริยาการถ่ายเทมวลแบบสวนทาง



พิจารณากรณีทั่วไปที่องค์ประกอบ M ซึ่งมีประจุ n ทำปฏิกิริยากับสารสกัด RA เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n โดยมี A เป็นไอออนที่ถ่ายเทมวลแบบสวนทางภายในเยื่อแผ่นเหลว



มีค่าคงที่สมดุคเป็น

$$K = \frac{[\overline{MR_n}][A]^n}{[RA]^n[M]} \quad (3.19)$$

ค่าคงที่สมดุคของสมดุคนี้สามารถเขียนได้ทั้งฝั่งวิฤภาคเยื่อแผ่นเหลวและฝั่งวิฤภาคสารละลายของน้ำ โดยหลักการองค์ประกอบทั้งสี่จะสมดุคกันในวิฤภาคสารละลายของน้ำ และในวิฤภาคเยื่อแผ่นเหลว แต่ในทางปฏิบัติ MR_n และ RA จะถูกจำกัดอยู่ในวิฤภาคเยื่อแผ่นเหลวเท่านั้น ส่วน M และ A จะถูกจำกัดอยู่ในวิฤภาคสารละลายของน้ำ ทำให้สมดุคระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวิฤภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวิฤภาคสารละลายของน้ำเท่านั้น เนื่องจาก [A] และ [M] ในวิฤภาคเยื่อแผ่นเหลวจึงมีค่าน้อยมาก เช่นเดียวกัน $[MR_n]$ และ [RA] ในวิฤภาคสารละลายของน้ำจึงมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการที่ 3.19 ได้ใหม่ดังนี้

$$K' = \frac{[MR_n]' [A]'^n}{[RA]'^n [M]'} = \frac{k_m}{k_a} \cdot K \quad (3.20)$$

โดยตัวยก (superscript) ' หมายถึงวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ส่วนตัวยก '' หมายถึงวัฏภาคสารละลายของน้ำ k_m และ k_a คือค่าสัมประสิทธิ์ของการแบ่งส่วน (partition coefficients) ของ M และ A ระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและวัฏภาคสารละลายของน้ำ สมการที่ 3.20 สะดวกและง่ายในการนำมาใช้งาน เนื่องจากค่าต่าง ๆ สามารถวัดได้จากการทดลอง ตัวอย่างเช่น $[MR_n]'/[M]'$ ก็คือค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจาย (distribution coefficient) ของไอออนของโลหะระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายของน้ำ

ค่าคงที่สมดุลในลักษณะเดียวกันนี้ เกิดขึ้นที่ทั้งสองฝั่งของผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายของน้ำ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 3.20 ได้ใหม่ในลักษณะดังนี้

$$K' = \frac{[MR_n]'_1 [A]_1'^n}{[RA]_1'^n [M]_1'} = \frac{[MR_n]'_2 [A]_2'^n}{[RA]_2'^n [M]_2'} \quad (3.21)$$

เมื่อ ตัวห้อย 1 และ 2 หมายถึงผิวสัมผัสทั้งสองฝั่งของเยื่อแผ่นเหลว

พิจารณากรณีที่ไอออนที่ถ่ายเทสวนทางถูกถ่ายเทมาในทิศทางตรงข้ามกับไอออนโลหะจนถึงจุดสมดุลระหว่างไอออนที่ถ่ายเทสวนทางกับไอออนของโลหะ ดังนั้นจึงไม่มีฟลักซ์ของไอออนโลหะในการถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลว ภายใต้สถานการณ์แบบนี้จะได้ว่า $[MR_n]'_1 = [MR_n]'_2$

และ $[RA]_1'^n = [RA]_2'^n$ และสามารถเขียนสมการที่ 3.21 ได้เป็น

$$\frac{[M]_1'}{[M]_2'} = \left(\frac{[A]_1'}{[A]_2'} \right)^n \quad (3.22)$$

ดังนั้นค่าแฟคเตอร์ของความเข้มข้น (concentration factor) สูงสุดของไอออนของโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะแปรผันตามค่าสัดส่วนความเข้มข้นของไอออนที่ถ่ายเทสวนทางยกกำลัง n

เมื่อกลับมาพิจารณาสมการของฟลักซ์ ที่สภาวะสมดุลค่าฟลักซ์ J_{MR_n} ของไอออนโลหะในรูป MR_n ที่ถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลว แสดงได้ตามสมการ

$$J_{MR_n} = \frac{\bar{D}_{MR_n} ([MR_n]'_1 - [MR_n]'_2)}{l} \quad (3.23)$$

โดยที่ \bar{D}_{MR_n} คือค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนในเยื่อแผ่นเหลวที่มีความหนา l ในทางทฤษฎีสามารถวัดค่า J_{MR_n} ได้จากการทดลองการซึมผ่าน (permeation experiment) และสามารถวัด $[MR_n]$ ได้จากสัมประสิทธิ์ของการกระจายที่สมดุล (equilibrium distribution coefficient) ดังนั้นสามารถวัดค่า \bar{D}_{MR_n} ได้จากความเข้มข้น ความเป็นกรด-ด่าง และเงื่อนไขสภาวะอื่น ๆ

เพื่ออธิบายการถ่ายเทแบบควบคู่ เราจะพิจารณาสมการที่ 3.23 และกำจัดพจน์ $[MR_n]$ โดยนำสมการที่ 3.20 มาใช้ ผลที่ได้จะเป็นสมการซึ่งซับซ้อนเกี่ยวข้องกับค่า $[M]$ และ $[A]$ แต่ยังคงมีพจน์ $[RA]$ อยู่ อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาสมดุลจะให้ความสัมพันธ์

$$n[MR_n] + [RA] = \gamma \quad (3.24)$$

เมื่อ γ คือความหนาแน่นเชิงโมล (molar density) ของสารสกัด RA บริสุทธิ์โดยเราตั้งสมมุติฐานว่าปริมาตรของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อสารสกัด RA จำนวน n โมลทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n หนึ่งโมล

สามารถแทนสมการที่ 3.20 และ 3.21 ลงในสมการที่ 3.23 เพื่อหาสมการที่แสดงค่าฟลักซ์ของไอออนโลหะในรูปของค่าคงที่และความเข้มข้นของไอออนโลหะกับความเข้มข้นของไอออนที่ถ่ายเทสวนทางในสารละลายของน้ำที่สองฝั่งของเยื่อแผ่นเหลวเท่านั้น (วิธีทำโดยละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก จ) คำตอบที่ได้จะมีรูปแบบง่ายในกรณีที่ $n = 1$ ซึ่งในกรณีนี้

$$J_{MRn} = \frac{\bar{D}_{MRn} \gamma}{l} \left[\left(\frac{1}{[A]''/[M]''K' + 1} \right)_1 - \left(\frac{1}{[A]''/[M]''K' + 1} \right)_2 \right] \quad (3.25)$$

สมการนี้แสดงถึงปรากฏการณ์การถ่ายเทแบบควบคู่ ดังนั้นค่าฟลักซ์ของไอออนโลหะจะมีค่าเป็นบวกในทิศทางการเคลื่อนที่จากผิวสัมผัสที่ 1 ไปยังผิวสัมผัสที่ 2 ตรงเท่าที่

$$\left(\frac{[M]''}{[A]''} \right)_1 > \left(\frac{[M]''}{[A]''} \right)_2 \quad (3.26)$$

แต่เมื่อเครื่องหมาย $>$ ในสมการที่ 3.26 กลับทิศทางการเคลื่อนที่ ฟลักซ์ของไอออนโลหะจะเกิดในทิศทางตรงกันข้าม

3.3 งานวิจัยที่ผ่านมา

A.B. de HAAN, P.V. BARTELS และ J. de GRAAUW (1989) ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงออกจากสารละลายน้ำทิ้งโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber contained liquid membrane) ซึ่งในกระบวนการนี้ประกอบด้วยโมดูลของเส้นใยกลวง 2 โมดูล สำหรับขั้นตอนสกัดและขั้นตอนสกัดตามลำดับ การดำเนินการจะทำในลักษณะที่ให้วิทยาศาสตร์ละลายป้อนและวิทยาศาสตร์ละลายสกัดไหลผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงในฝั่งท่อ ส่วนวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวไหลผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงในฝั่งเปลือก โดยให้วิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวไหลเวียน เนื่องจากเส้นใยกลวงที่ใช้จะเป็นพอลิเมอร์ชนิดไม่ชอบน้ำ ดังนั้นขณะดำเนินการจึงต้องควบคุมความดันของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดซึ่งเป็นสารละลายของน้ำให้สูงกว่าความดันของวิทยาศาสตร์

เยื่อแผ่นเหลวเพื่อที่จะกักเก็บเยื่อแผ่นเหลวไว้ในรูปพุนของเส้นใยกลวง ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการสกัดไอออนทองแดงด้วยสารสกัด LIX84 มีการวัดผลกระทบของความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนและความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่มีต่อค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลว นอกจากนี้ยังพบอีกว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนสตริปเกิดในอัตราที่ช้ากว่าเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาในขั้นตอนสกัด

J. DRAXLER, W. FURST และ R. MARR (1988) ได้รวบรวมและนำเสนอการใช้เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเพื่อแยกไอออนโลหะหลายชนิดได้แก่ สังกะสี ทองแดง นิกเกิล แคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียมจากสารละลายน้ำทิ้ง จากการศึกษาสรุปได้ว่าปัญหาสำคัญในการนำระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันไปใช้งานคือ การเลือกสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม ซึ่งวิธีเลือกสารลดแรงตึงผิวจะพิจารณาจากความสามารถในการถ่ายเทน้ำ (capability of transporting water) การสลายตัวของสารสกัด (decomposition of extractant) และความต้านทานต่อแบคทีเรีย (resistance to bacteria) นอกจากนี้การพัฒนาสารสกัดชนิดใหม่เป็นหนทางหนึ่งในการพัฒนากระบวนการนี้

O. LIACONO, E. DRIOLI และ R. MOLINARI (1986) ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงออกจากสารละลายผสมของไอออนทองแดงและไอออนสังกะสีด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับโดยใช้ตัวรองรับที่มีรูปแบบแตกต่างกัน (แผ่นแบนและทรงกระบอกหรือเส้นใยกลวง) สารละลายป้อนที่ใช้เป็นสารละลายของคอปเปอร์ซัลเฟต (copper sulphate) และซิงค์ซัลเฟต (zinc sulphate) ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนถูกควบคุมให้คงที่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ประกอบด้วยสารสกัด LIX 64 N ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน (kerosene) ส่วนสารละลายสตริปเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ตัวรองรับที่ใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านพอลิเอทิลีนชนิดไม่ชอบน้ำที่มีความพรุน (porosity) ร้อยละ 70 หนา 150 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย 0.4 ไมโครเมตร นอกจากนี้ได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับกรณีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่มีการไหลเวียนกลับทั้ง

สารละลายป้อนและสารละลายศตริป จากการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด ไอออนทองแดงออกจากสารละลายผสมของไอออนทองแดงและไอออนสังกะสีด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ โดยพิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองได้แก่ ค่า pH ของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ และความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ต้องการสกัดในสารละลายป้อน โดยพิจารณาจากร้อยละของการสกัดและค่าฟลักซ์ของการซึมผ่าน ทำให้สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการสกัด ไอออนทองแดงโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับได้ และเมื่อมีการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกรณีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง พบว่ามีความสอดคล้องกันมาก จากการศึกษาทั้งหมดนำไปสู่ข้อสรุปที่ว่า การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับเป็นเทคนิคที่แสดงถึงความสำเร็จของการนำกลับมาใช้ใหม่ (recovery) และแยกไอออนโลหะจากสารละลายป้อนแม้กระทั่งเมื่อสารละลายป้อนมีความเข้มข้นสูง

O. TUTKUN และ R.A. KUMBASA (1994) ศึกษาการใช้เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน ในการแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายของไอออนโลหะหลายชนิด (Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} และ Zn^{2+}) โดยทดลองในบีกเกอร์ที่มีกรวย (baffle) และปั่นกวนด้วยใบกวนชนิดกังหัน (turbine-type) ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้มีปริมาตร 25 มิลลิลิตรซึ่งเตรียมขึ้นจากสารลดแรงตึงผิว Span80 ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก สารสกัด LIX 860 ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และเคโรซีน (kerosene) ร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก วัฏภาคภายในหรือวัฏภาคสารละลายศตริปมีปริมาตร 25 มิลลิลิตรเป็นสารละลายของกรดซัลฟิวริก วัฏภาคภายนอกหรือวัฏภาคสารละลายป้อนมีปริมาตร 250 มิลลิลิตรเป็นสารละลายเกลือซัลเฟตของโลหะหลายชนิดโดยใช้กรดซัลฟิวริกเพื่อปรับค่าความเป็นกรดต่าง จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคภายนอกจะตกลงอย่างรวดเร็วขณะที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะอื่น ๆ เกือบจะมีค่าคงที่ และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคภายในพบว่า ความเข้มข้นของไอออนทองแดงสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 5 เท่าในการสกัดเพียงครั้งเดียวด้วยการปรับค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณวัฏภาคสารละลายป้อนกับปริมาณวัฏภาคสารละลายศตริป นอกจากนี้ภายใต้สภาวะของการทดลองนี้

แสดงให้เห็นว่าการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่มี LIX 860 เป็นสารสกัด เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการเลือกสกัดแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายผสมของไอออนโลหะต่าง ๆ ที่พิจารณา

P.A. O' HARA และ M.P. BOHRER (1989) ศึกษาการใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนเพื่อถ่ายเทไอออนทองแดงจากสารละลายของแอมโมเนีย (ammonical etching solution) ในกระบวนการผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้า สารสกัดที่ใช้ได้แก่ สารละลายของ LIX54-100 ในตัวทำละลายเคโรซีน (kerosene) มีการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ของระบบได้แก่ อัตราเร็วของการปั่นกววนสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด และความหนาของชั้นเยื่อแผ่นเหลว หลังจากทดลองเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขต่าง ๆ แล้วพบว่า สามารถวัดค่าฟลักซ์ได้ในช่วง $0.15-0.32 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ และมีค่าคงที่ตลอดการทดลองในช่วง 3-14 วัน นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนสูง เมื่อให้มีการปั่นกววนสารละลายของน้ำทั้งสองฝั่งของเยื่อแผ่นเหลวด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสม ค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงจะถูกจำกัดโดยการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนทองแดงกับสารสกัดผ่านเยื่อแผ่นเหลว ค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเนื่องจากการลดลงของสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนทองแดงกับสารสกัด ซึ่งมีสาเหตุจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นของเยื่อแผ่นเหลว เมื่อพิจารณาการคัดเลือกสกัด (selectivity) จะพบว่าสามารถคัดเลือกสกัดไอออนทองแดงได้ดีกว่าไอออนนิกเกิล สังกะสี และดีบุก อย่างน้อยที่สุด 100 เท่า

P.R. DANESI และ P.G. RICKERT (1986) ศึกษาถึงประสิทธิภาพในการใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยถลุงเพื่อแยกไอออนโคบอลต์และไอออนนิกเกิลโดยใช้สารสกัดกรดไดอัลคิลฟอสฟินิก (dialkyl phosphinic acid) ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายผสมของไดไอโซโพรพิลเบนซีน (diisopropyl benzene) ร้อยละ 33 โดยปริมาตร และเดคาลิน (decalin) ร้อยละ 67 โดยปริมาตร เป็นเยื่อแผ่นเหลว เยื่อแผ่นเหลวนี้อาจถูกใช้ในรูปแบบของเส้นใยถลุงพอลิโพรพิลีน (Accurel[®] polypropylene fibers) ที่มีความพรุนร้อยละ 75 สำหรับสารละลายป้อนที่ใช้ประกอบด้วยไอออน

โคบอลต์และไอออนนิกเกิล 10^{-3} โมลต่อลิตร กรดอะซิติก (CH_3COOH) และ โซเดียมอะซิเตต (CH_3COOK) รวมกันเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 ส่วนสารละลายสตรีป เป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร การตรวจสอบทำได้โดยวัดค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะที่เปลี่ยนแปลงไปที่เวลาต่าง ๆ แล้วนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่าน (permeability coefficient) ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการใช้งานของโมดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบข้อมูลทางภาคปฏิบัติเพื่อใช้คอกำหนดอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวพุงด้วยเส้นใยกลวง โดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางเฉลี่ยของรูพรุนในเส้นใยกลวง ขนาดของเส้นใยกลวง การเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในตัวรองรับ การออกแบบโมดูลเป็นพิเศษเพื่อให้เติมเยื่อแผ่นเหลวได้อย่างต่อเนื่อง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนในโมดูล การทดลองทั้งหมดสรุปผลได้ดังนี้

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านของไอออนโคบอลต์มีค่าคงที่ในช่วงเวลา 15-30 วัน
- 2) ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงกับขนาดของรูพรุน และขนาดของเส้นใยกลวง
- 3) ประสิทธิภาพในการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ลดลงเนื่องมาจากการสูญเสียวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจากรูพรุนของเส้นใยกลวง
- 4) กระบวนการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในตัวรองรับอย่างง่าย ช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าเริ่มต้นของการดำเนินการได้
- 5) การออกแบบโมดูลเป็นพิเศษเพื่อให้มีบริเวณสำหรับเก็บกักเยื่อแผ่นเหลวไว้ในการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปในรูพรุนอย่างต่อเนื่อง สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวพุงด้วยเส้นใยกลวงเป็นมากกว่า 38 วัน
- 6) การปฏิบัติการโดยให้สารละลายป้อนไหลเวียนด้านนอกของเส้นใยกลวง (shell side) เมื่อเปรียบเทียบกับการให้สารละลายป้อนไหลเวียนด้านในของเส้นใยกลวง (tube side) สำหรับโมดูลที่ประกอบด้วยเส้นใยกลวงจำนวนมาก พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่าน

จะลดลงเล็กน้อยสำหรับกรณีให้ไหลด้านนอกของเส้นใยกลางแต่สามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากันได้เมื่อเพิ่มอัตราไหลให้สูงขึ้น

R.M. IZATT และ J.D. LAMB (1988) ศึกษาข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการนำสารสกัดชนิดแมโครไซเคิล (macrocycle – mediate) มาใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววนแบบอิมัลชัน แบบพุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน และแบบพุงด้วยเส้นใยกลาง มีการศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทมวลสัมพัทธ์ของไอออนของโลหะอัลคาไลน์ และของ Zn (II) , Cd (II) และ Hg (II) ทั้งแบบที่มีองค์ประกอบเดียวและมีหลายองค์ประกอบในระบบเยื่อแผ่นเหลวทั้งสี่ชนิด ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ระบบเยื่อแผ่นเหลวทั้งสี่ชนิดมีค่าการเลือกสกัดที่ใกล้เคียงกันเมื่อใช้สารสกัดชนิดเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าพังก์ชันของไอออนของโลหะและอัตราการถ่ายเทมวลมีความสัมพันธ์อย่างมากกับตัวทำละลายในเยื่อแผ่นเหลว และพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางมีศักยภาพสูงในการพัฒนาไปสู่ระดับอุตสาหกรรม

RUEY-SHIN JUANG (1993) ศึกษาการซึมผ่านของไอออนทองแดงและสังกะสีจากสารละลายของเกลือซัลเฟต ด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับซึ่งมีกรดบิส-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (bis(2-ethylhexyl) phosphoric acid) หรือ D2EHPA เป็นสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายป้อนที่ใช้เป็นสารละลายของซิงค์ซัลเฟตและคอปเปอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้นโดยโมลเท่ากันละลายในน้ำกลั่นซึ่งเติม NaSO_4 หรือ H_2SO_4 จำนวน $5 \times 10^2 \text{ mol/m}^3$ เพื่อรักษาค่าคงที่ของกำลังไอออนิก (ionic strength) สำหรับสารละลายสตรีปประกอบไปด้วย NaSO_4 หรือ H_2SO_4 จำนวน $5 \times 10^3 \text{ mol/m}^3$ เช่นกัน การทดลองควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 25°C นอกจากนี้มีการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณาจากการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปกับเยื่อแผ่นเหลวทั้งขณะแพร่เข้าและแพร่ออกจากเยื่อแผ่นเหลว รวมไปถึงการแพร่ผ่านชั้นเยื่อแผ่นเหลวของสารสกัดและสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะกับสาร

สกัด จากการศึกษาพบว่าค่าอัตราการซึมผ่านที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความสอดคล้องกันดีกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวัด นอกจากนี้ค่าการเลือกสกัด (selectivity) ในการสกัด ไอออนทองแดงกับไอออนสังกะสีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความต้านทานของการแพร่ (diffusional resistance) ของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย