



บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 ตัวพาที่สนับสนุนการถ่ายเทมวล (Carrier facilitated transport) (W.Baker, 2004)

ตัวพาเป็นตัวที่ทำปฏิกิริยาและช่วยในการถ่ายเทองค์ประกอบหนึ่งของสารละลายป้อนข้ามผ่านเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปตัวพาที่สนับสนุนการถ่ายเทมวลนี้จะเป็นสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ถูกยึดด้วยแรงแคปิลลารีในรูพรุนขนาดจุลภาคของเส้นใยกลวง

รูปแบบของการถ่ายเทมวลที่พบในเยื่อแผ่นเหลว ได้แก่

1) การแพร่ที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี (Passive Diffusion)

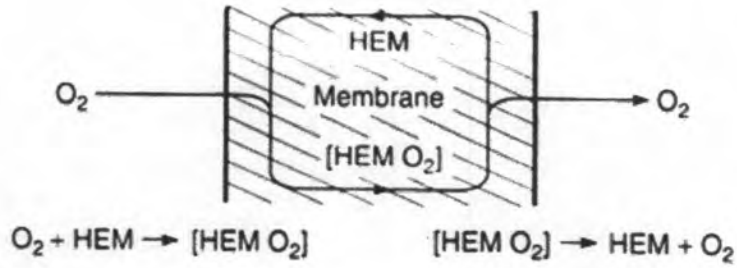
การแพร่นี้จะเคลื่อนที่จากภูมิภาคที่มีความเข้มข้นสูงไปต่ำ ซึ่งปกติในกระบวนการนี้จะไม่มีการคัดเลือกและเกิดก่อนข้างช้า ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแพร่ที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมี

2) การสนับสนุนการถ่ายเทมวล (Facilitated Transport)

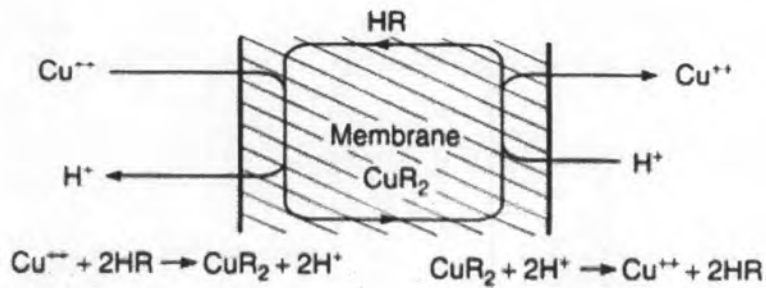
ภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะมีสารตัวพาซึ่งจะเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันและจะเกิดการซึมผ่านทำให้เกิดการถ่ายเทมวลขึ้น ดังตัวอย่างที่ตัวพาคือฮีโมโกลบินเกิดการถ่ายเทมวลกับออกซิเจนที่ด้านทางเข้าของเยื่อแผ่น และจะแพร่ผ่านมายังผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่น สุดท้ายออกซิเจนก็จะถูกคัดเลือกออกจากเยื่อแผ่น โดยที่ก๊าซตัวอื่น เช่น ไนโตรเจนจะไม่เกิดปฏิกิริยากับฮีโมโกลบิน แต่จะอยู่ที่ด้านทางเข้าเท่านั้น ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสนับสนุนการถ่ายเทมวล (W.Baker, 2004)

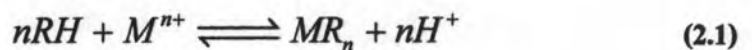
3) การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (Coupled Transport)

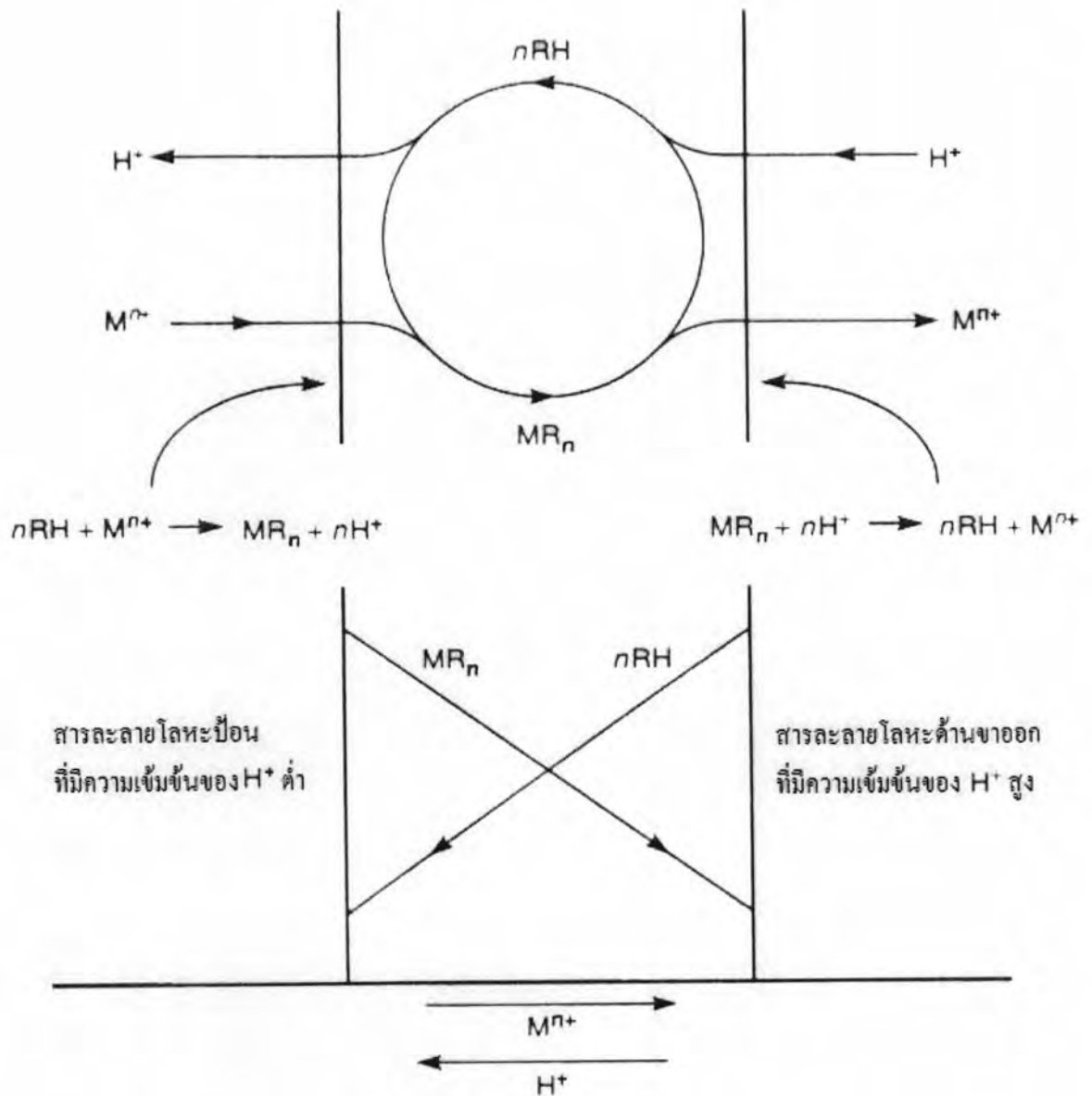
คล้ายกับการสนับสนุนการถ่ายเทมวล คือ มีสารตัวพาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว รูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ซึ่งมีการไหลของสาร 2 ชนิด คือ ไอออนทองแดงและไอออนไฮโดรเนียม โดยสารที่หนึ่งจะเคลื่อนที่ได้เนื่องจากความเข้มข้นของสารนั่นเอง แต่มีข้อแม้ว่าความเข้มข้นของสารที่สองจะต้องสูงพอ ตัวอย่าง ตัวพาเป็นสารประกอบของตัวทำละลายอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับกับไอออนของทองแดงเกิดสารประกอบของทองแดงและจะแพร่ผ่านจากผิวสัมผัสด้านสารละลายไปยังผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลว และจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจากความเข้มข้นสูงของไอออนไฮโดรเนียม



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (W.Baker, 2004)

รูปที่ 2.4 แสดง กลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ระหว่างตัวพา (RH) กับไอออนโลหะ (Mⁿ⁺) และไอออนไฮโดรเนียม (H⁺) ดังสมการที่ 2.1

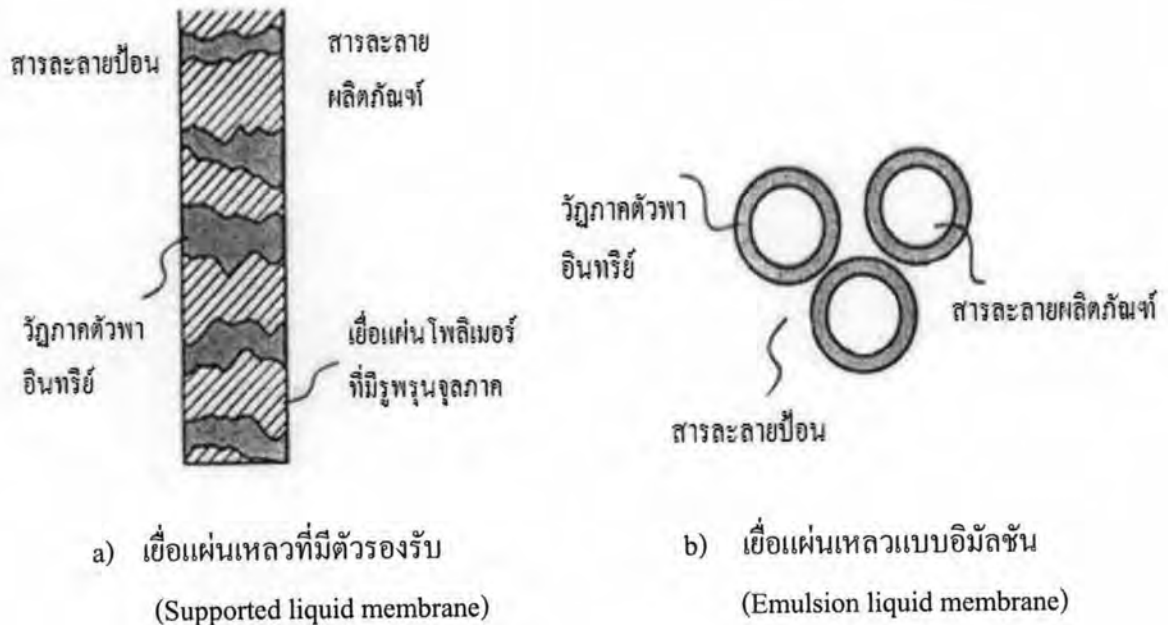




รูปที่ 2.4 กลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (W.Baker, 2004)

ลักษณะของเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ทั่วไปนั้นจะให้วิฤภาคของเหลวที่เป็นตัวพาฝังตัวอยู่ที่รูพรุนจุลภาคของตัวรองรับ โดยอาศัยแรงแคปิลลารีดังรูปที่ 2.5(a) แต่ปัญหาหลักคือความไม่เสถียรของวิฤภาคของเหลวที่เป็นตัวพา ดังนั้นจะใช้ตัวพาชนิดที่เป็นเยื่อแผ่นแบบอิมัลชัน (Emulsion Membrane) หรือเยื่อแผ่นแบบฟองอากาศ (Bubble Membrane) ดังรูปที่ 2.5(b) โดยเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดอิมัลชันที่เสถียร ซึ่งวิฤภาคของตัวพาอินทรีย์นั้นคือส่วนที่เป็นผนังของฟองอากาศ และผลิตภัณฑ์จะอยู่ในของฟองอากาศ เยื่อแผ่นแบบอิมัลชันจะเสถียรในระหว่างขั้นตอนการสกัดเพื่อป้องกันไม่ให้วิฤภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวและวิฤภาคสารละลายป้อนผสมกัน

แต่การที่จะควบคุมระดับให้อิมัลชันเสถียรนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงใช้การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) หรือการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของวิธีการถ่ายเทมวลแบบควบคู่



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเยื่อแผ่นเหลว (W.Baker, 2004)

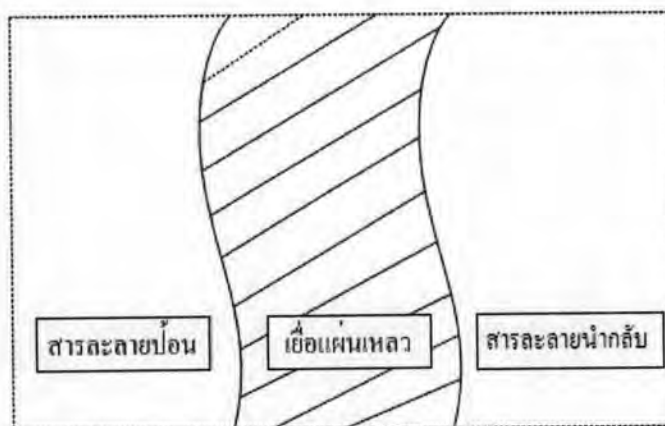
2.1.1 รูปแบบของเยื่อแผ่น (Membrane Module) (W.Baker, 2004)

เยื่อแผ่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อการแยกสารนั้นต้องมีขนาดพื้นที่การถ่ายเทมวลตั้งแต่หลายร้อยจนถึงหลายพันตารางเมตร ดังนั้นก่อนที่จะนำเยื่อแผ่นไปใช้ในอุตสาหกรรมจะต้องมีกรรมวิธีที่จะบรรจุให้เยื่อแผ่นมีพื้นที่สูง เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการแยกสูง ในช่วงปี ค.ศ.1960 และค.ศ. 1970 ได้มีการพัฒนาเทคนิคในการผลิตรูปแบบของเยื่อแผ่นที่มีประสิทธิภาพในการแยกสูงอย่างกว้างขวาง ในยุคแรกจะมีรูปแบบธรรมดาที่เป็นแบบแผ่น (Flat Sheet) และต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีรูปแบบเป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 ถึง 3 เซนติเมตร ซึ่งปัจจุบันรูปแบบเหล่านี้ยังคงมีอยู่ แต่จะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตเยื่อแผ่นที่ค่อนข้างสูง ทำให้ถูกแทนที่ด้วยเยื่อแผ่นแบบแผ่นม้วน (Spiral Wound) และแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber)

2.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

องค์ประกอบของเยื่อแผ่นเหลว ดังรูปที่ 2.6 ประกอบด้วย 3 ส่วน

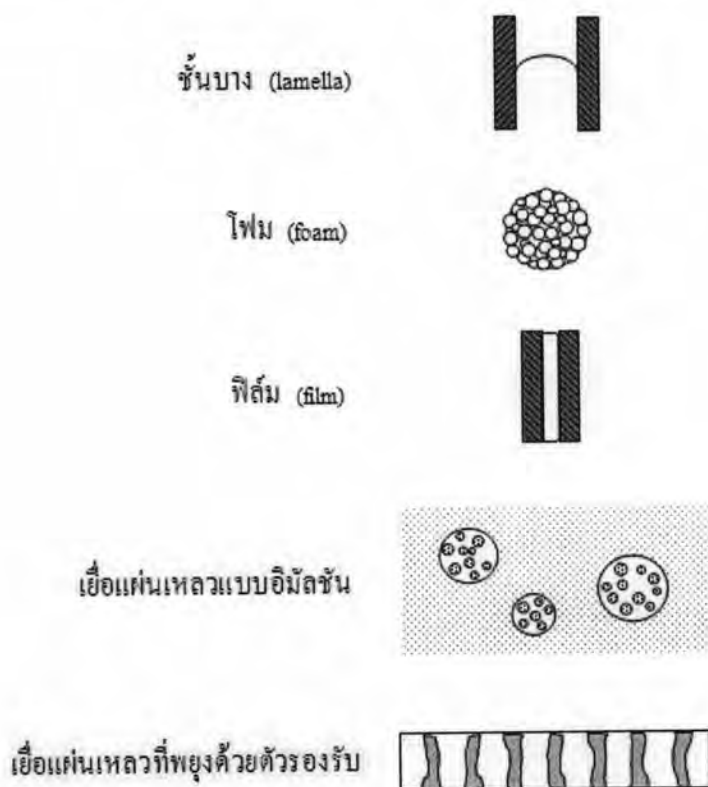
1. ภูมิภาคของสารละลายป้อน (Feed Phase) ซึ่งมีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่
2. ภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Phase) ซึ่งในที่นี้จะเป็นสารสกัด (Extractant) ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยทั่วไปสารสกัดจะเป็นสารอินทรีย์ ทำหน้าที่แยกองค์ประกอบที่ต้องการแยกออกจากภูมิภาคของสารละลายป้อนเข้ามายังภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลว
3. ภูมิภาคของสารละลายนำกลับหรือสารละลายสตริป (Stripping Phase) จะทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกที่อยู่ในภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลวออกมายังภูมิภาคของสารละลายนำกลับ



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของเยื่อแผ่นเหลว

ส่วนของสารละลายป้อนกับสารละลายสกัดจะต้องไม่ละลายเข้าด้วยกัน และส่วนของสารละลายสกัดกับสารละลายนำกลับก็ต้องไม่ละลายเข้าด้วยกันเช่นกัน ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวมีลำดับดังนี้ องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งส่วนใหญ่เป็นไอออนของโลหะจะละลายอยู่ในสารละลายป้อนและทำปฏิกิริยากับสารละลายสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของสารละลายป้อนกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในสารสกัดและแพร่เข้าไปในภูมิภาคของเยื่อแผ่นเหลวและทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับทำให้องค์ประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะขององค์ประกอบที่ต้องการแยกในภูมิภาคของสารละลายนำกลับ

ดังนั้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจึงต้องสร้างเยื่อแผ่นเหลวมากขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในรูปแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.7 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับนั้นมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่าเยื่อแผ่นเหลวแบบอื่น ๆ (G. Schulz, 2005)

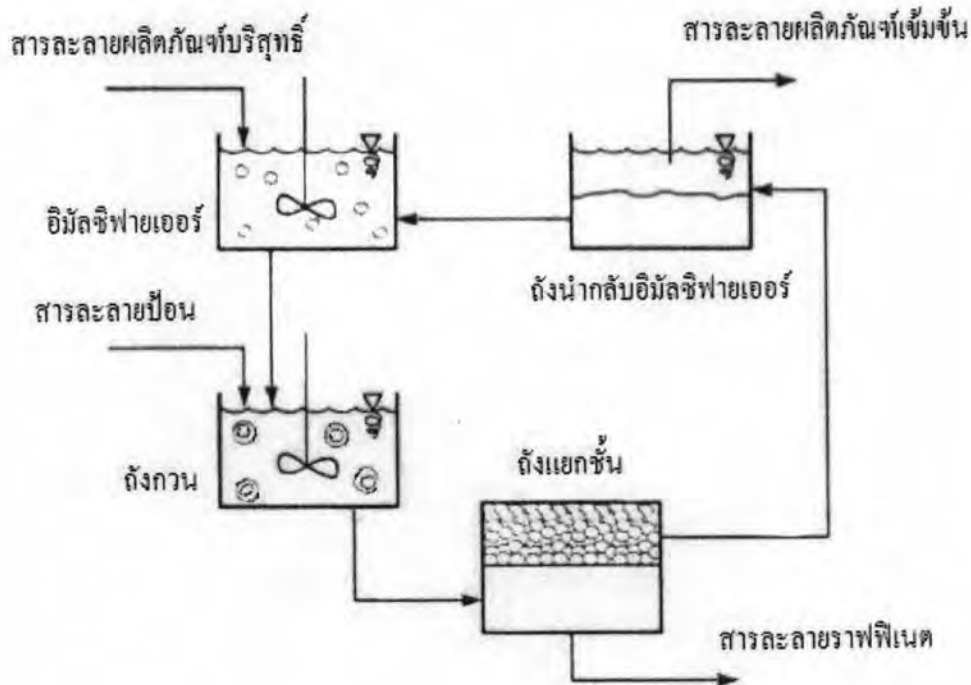


รูปที่ 2.7 ประเภทของเยื่อแผ่นเหลว (G. Schulz, 2005)

2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane) (W.Baker, 2004)

เยื่อแผ่นเหลวแบบฟองอากาศหรือแบบอิมัลชันเป็นรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับความนิยมมากในช่วงปี ค.ศ.1970 – 1980 รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันดังนี้ ชั้นแรก สารละลายผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ (Fresh Product Solution) ทำปฏิกิริยากับตัวกระทำอิมัลชันหรืออิมัลซิฟายเออร์ (Emulsifier) เพื่อให้เป็นสารละลายอิมัลชัน จากนั้นนำไปผสมกับไอออนของโลหะในสารละลายป้อน ทำให้ไอออนของโลหะเกิดการแพร่แบบควบคุมผ่านผนังของฟองอากาศหรือฟองอิมัลชัน และเกิดการเรียงวัฏภาคใหม่เป็น 3 ชั้น จากด้านในเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันไปด้านนอก

ตามลำดับดังนี้ วิทยาศาสตร์ละลายผลิตภัณฑ์ วิทยาศาสตร์ละลายเชื้อแผ่นเหลว และวิทยาศาสตร์ละลายป้อน สารละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกส่งไปยังถังแยกชั้น ชั้นของน้ำมันจะแยกกับสารละลายราฟฟิเนต (สารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว) ส่วนอิมัลชันเข้มข้นจะถูกส่งกลับไปทำให้เป็นตัวกระทำอิมัลชันเพื่อนำมาใช้อีกครั้ง



รูปที่ 2.8 กระบวนการเชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (W.Baker, 2004)

เชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) เชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (Water in Oil (W/O) Emulsion) คือ เชื้อแผ่นเหลวที่มีวิทยาศาสตร์ภายในเป็นน้ำ (แรงตึงผิวน้ำมากกว่าน้ำมัน)
- 2) เชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (Oil in Water (O/W) Emulsion) คือ เชื้อแผ่นเหลวที่มีวิทยาศาสตร์ภายในเป็นน้ำมัน (แรงตึงผิวน้ำมันมากกว่าน้ำ)

ในกรณีที่สารละลายนำกลับเป็นน้ำ เมื่อนำอิมัลชันของน้ำในน้ำมันมากระจายในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนที่เป็นสารละลายของน้ำ ระบบจะเรียงจากวิทยาศาสตร์ด้านในไปยังวิทยาศาสตร์ด้านนอกคือ น้ำ - น้ำมัน - น้ำ (w/o/w) แต่ถ้าสารละลายนำกลับเป็นสารละลายน้ำมันก็จะกลับกันคือจะเรียงจากน้ำมัน - น้ำ - น้ำมัน (o/w/o) ดังนั้นจึงมีสารลดแรงตึงผิว 2 ประเภท ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดที่

ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) สำหรับอิมัลชันน้ำมันในน้ำมัน และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) สำหรับอิมัลชันน้ำมันในน้ำ

2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

ในเยื่อแผ่นเหลวแบบที่มีตัวรองรับนี้จะประกอบด้วยตัวรองรับที่มีรูพรุนที่อิมัลต์ด้วยสารละลายเยื่อแผ่นเหลว การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวเป็นแบบควบคุม โดยที่ของไหลทั้งสองด้านของเยื่อแผ่นเหลวจะต้องไหลเวียนอยู่ตลอด และความเข้มข้นด้านหนึ่งจะต้องสูงกว่า เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat Sheet Supported Liquid Membrane) ที่ใช้ทั่วไปจะต้องมีการกวนสารละลายทั้งสองด้านของเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเหมาะสมกับการปฏิบัติงานในระดับที่ใหญ่กว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน

2.2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน

ตัวรองรับชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นแบน มีความพรุน (Porosity) สูง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เช่น พอลิพรอพิลีน (Polypropylene: PP) พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) พอลิเตตราฟลูออโรเอทิลีนหรือเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene: PTFE) เป็นต้น ลักษณะของรูพรุนของตัวรองรับชนิดแผ่นแบนแสดงดังรูปที่ 2.9

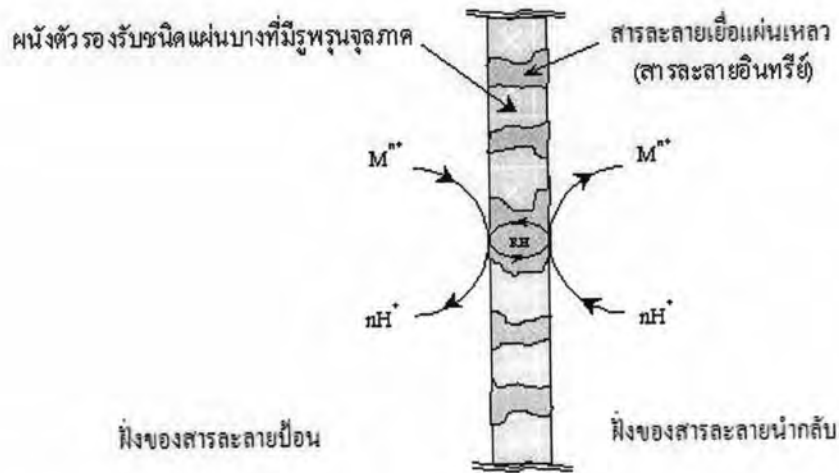


รูปที่ 2.9 รูพรุนของตัวรองรับชนิดแผ่นแบนที่ทำจาก PTFE

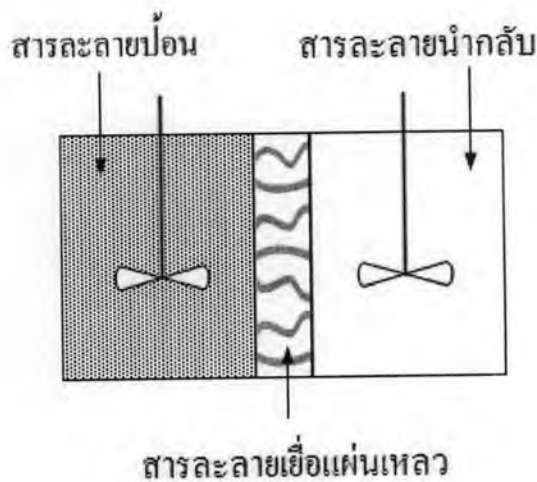
จากรูปที่ 2.9 รูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นแบนนี้จะเป็นแหล่งรองรับและยึดเยื่อแผ่นเหลวไว้ด้วยสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน (Electron Affinity) แรงแคปิลลารี และชนิดของรูพรุน (Hydrophilic or Hydrophobic Micro-porous) ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิตตัวรองรับ โดยตัว

รองรับแบบแผ่นแบนซึ่งพองเชื้อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างวัฏภาคของสารละลายป้อนและวัฏภาคของสารละลายนำกลับ กลไกการสกัดจะเกิดดังรูปที่ 2.10

ระบบเชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนแสดงดังรูปที่ 2.11 เชื้อแผ่นเหลวชนิดนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายเทมวลเนื่องจากมีลักษณะของตัวรองรับที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเชื้อแผ่นเหลวชนิดนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อย



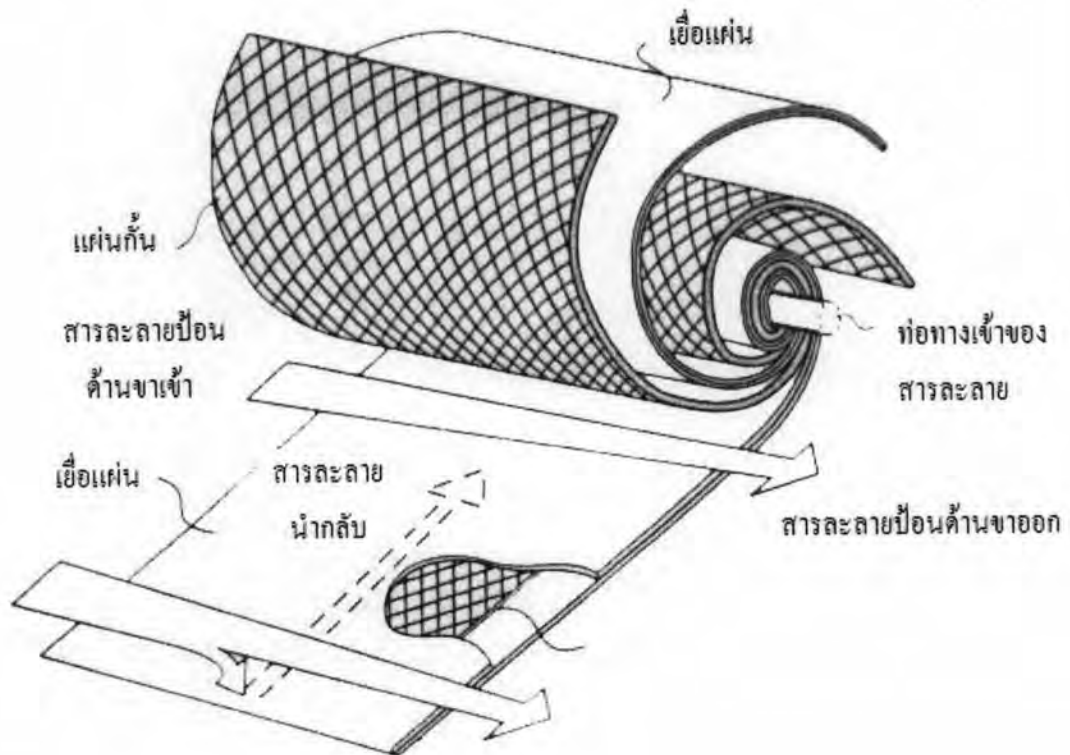
รูปที่ 2.10 กลไกการสกัดด้วยเชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นแบน



รูปที่ 2.11 ระบบเชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน

2.2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Spiral-type Supported Liquid Membrane) (W.Baker, 2004)

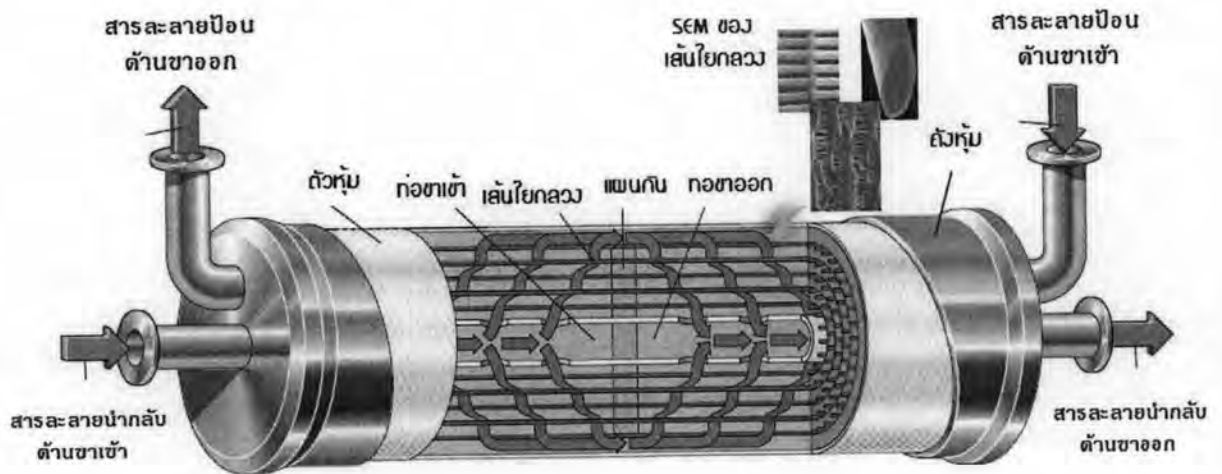
รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วนดังรูปที่ 2.12 ประกอบด้วย แผ่นกั้น และ เยื่อแผ่น โดยทั้งสองส่วนนี้จะหุ้มรอบท่อที่อยู่ตรงกลาง โดยสารละลายป้อนจะไหลผ่านเข้าทางช่องระหว่างแผ่นกั้นกับเยื่อแผ่น ส่วนสารละลายนำกลับจะไหลเข้าอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่น สุดท้ายสารที่ถูกสกัดแล้วจะไหลผ่านออกทางด้านขาออก เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ที่ใช้ในห้องทดลองส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ของเยื่อแผ่น 0.2 ถึง 1.0 ตารางเมตร และที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีพื้นที่ของเยื่อแผ่น 1 ถึง 2 ตารางเมตร จุดเด่นของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้คือ มีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน



รูปที่ 2.12 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (W.Baker, 2004)

2.2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane : HFSLM)

ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงนี้จะเป็นเส้นใยที่มีลักษณะเป็นท่อ โดยจะนำเส้นใยเหล่านี้จำนวนมากมาเรียงกันในแนวนานแล้วบรรจุลงในถังหุ้มทรงกระบอก ซึ่งในการทำการสกัดนั้น สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลอยู่ในเส้นใยกลวงที่เรียกว่าด้านท่อ (Tube Side) และด้านเปลือก (Shell Side) แล้วแต่ผู้ใช้งานจะให้สารใดอยู่ด้านไหน ในรูปของเส้นใยจะมีเยื่อแผ่นเหลวที่ทำหน้าที่เป็นสารสกัดฝังตัวอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังรูปที่ 2.13 ส่วนลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับนั้นสามารถทำได้ 2 แบบ คือ การไหลแบบทางเดียวกันและแบบสวนทาง รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับภายในมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง

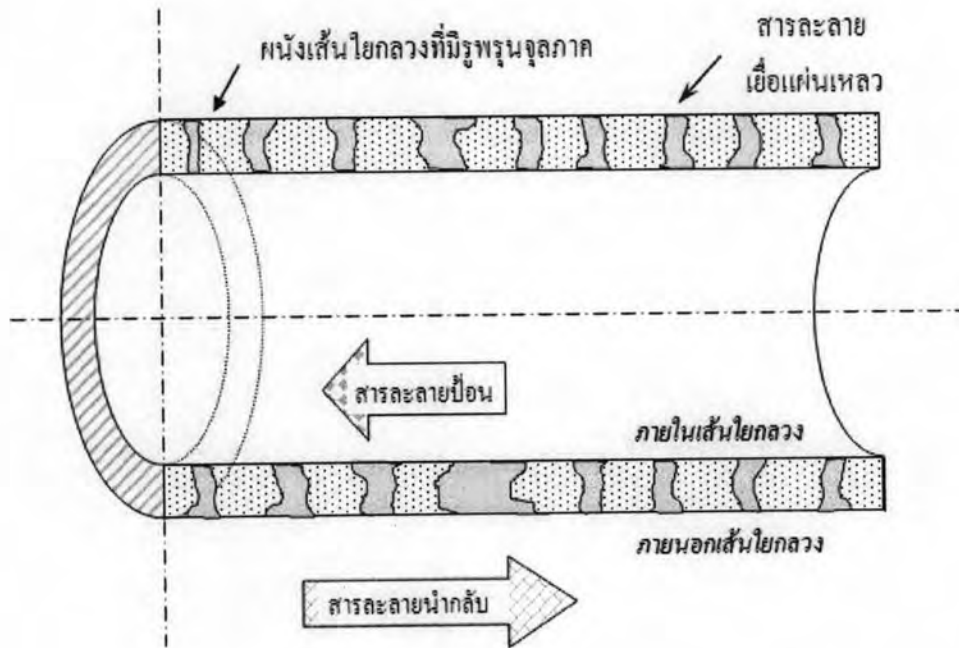


รูปที่ 2.13 ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับภายในมอดูล

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (www.liqui-cel.com)

ในกระบวนการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงนั้นทำโดยนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวมาฝังตัวในรูปของตัวรองรับ ซึ่งจะเกิดเป็นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลวพองด้วยตัวรองรับ และเมื่อนำตัวรองรับนี้มาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ไม่ละลายกับเยื่อแผ่นเหลวแล้ว ตัวรองรับนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวพาเพื่อถ่ายเทไอออนโลหะจากสารละลาย

ป้อนไปยังสารละลายนำกลับ ตัวรองรับที่ใช้นั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาฝังตัวที่รูพรุนชนิดนี้จะเป็นวัสดุภาคสารละลายอินทรีย์ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาฝังตัวที่รูพรุนชนิดนี้จะเป็นวัสดุภาคสารละลายของน้ำ

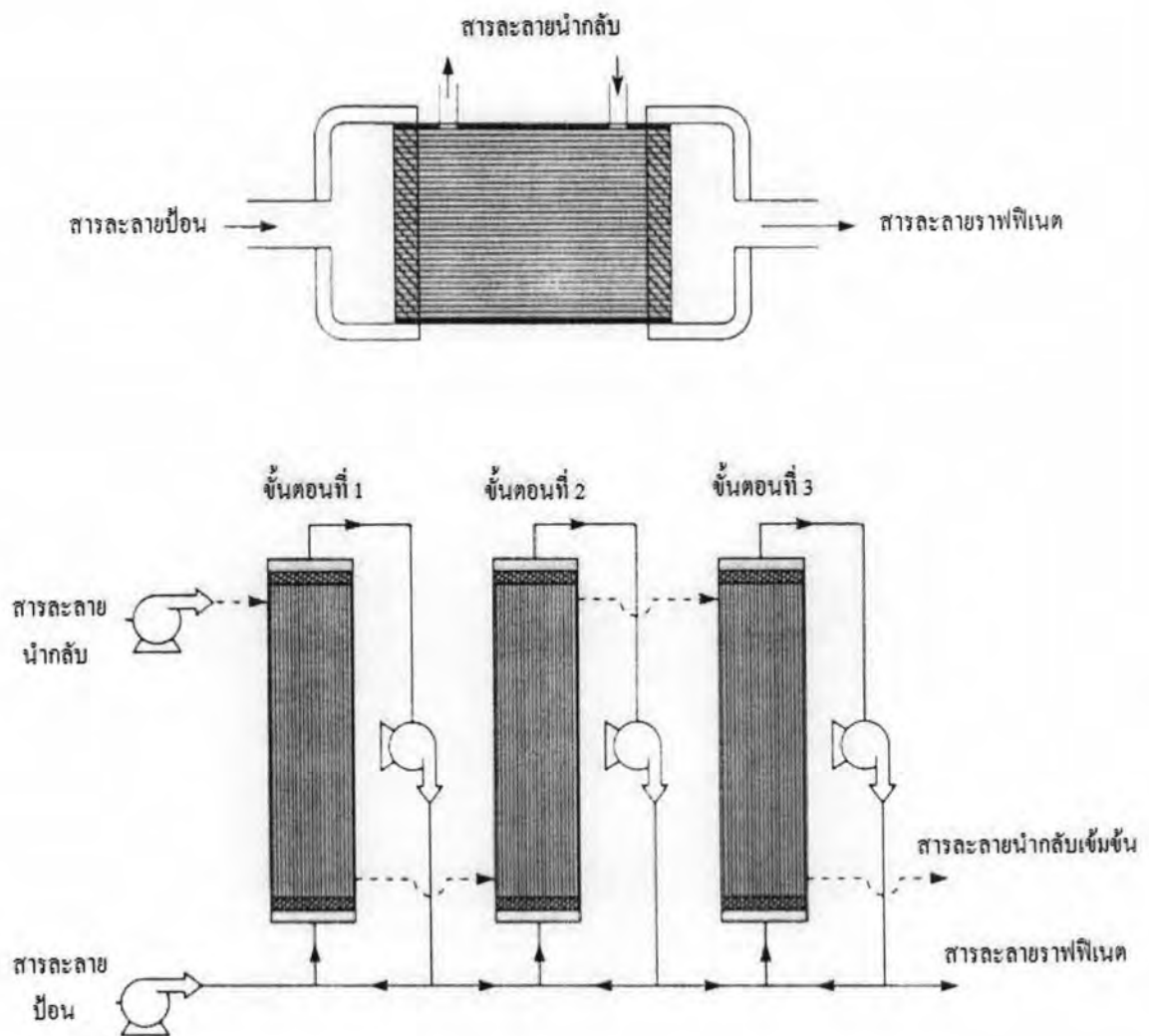


รูปที่ 2.14 ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารป้อนและสารละลายนำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลอง

ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง

- มีค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูง
- มีค่าอัตราการถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- มีค่าการคัดเลือกลูกสูง
- สามารถเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าสูง
- มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ
- สามารถดัดแปลงและขยายขนาดได้ง่าย

ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่าตัวรองรับลักษณะอื่นเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และสามารถฟื้นฟูสภาพเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ และสามารถเชื่อมต่อให้มีหลายมอดูล/ขั้นตอนได้ตามต้องการ ดังรูปที่ 2.15 (W.Baker, 2004) งานวิจัยนี้เลือกใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงแยกไอออนยูเรเนียมออกจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต



รูปที่ 2.15 กระบวนการสกัดหลายขั้นตอนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (W.Baker, 2004)

2.3 กลไกการถ่ายเทมวล

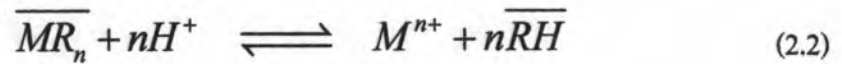
ประกร รามกุล (2544) เสนอกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของไอออนสองชนิดพร้อมกัน ซึ่งไอออนที่ต้องการแยกออกจากสารละลายป้อนนั้นจะเคลื่อนที่จากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ ทั้งนี้แรงขับในการถ่ายเทมวลคือผลต่างของความเข้มข้นของไอออนอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ใช่ไอออนของโลหะที่ต้องการแยก ดังนั้นทำให้สามารถที่จะแยกไอออนที่ต้องการได้ แม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ต้องการแยกในด้านสารละลายนำกลับจะมีค่าสูงกว่าก็ตาม (Porter, 1990) โดยเยื่อแผ่นเหลวที่คั่นอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับนั้นจะทำปฏิกิริยากับ ไอออนของโลหะที่ต้องการแยกเท่านั้น

การถ่ายเทมวลแบบควบคู่กันจะมีการถ่ายเทไอออนอยู่ 2 ลักษณะคือ การถ่ายเทแบบสวนทางกัน (Counter-transport) และการถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (Co-transport) ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนกับสารสกัด

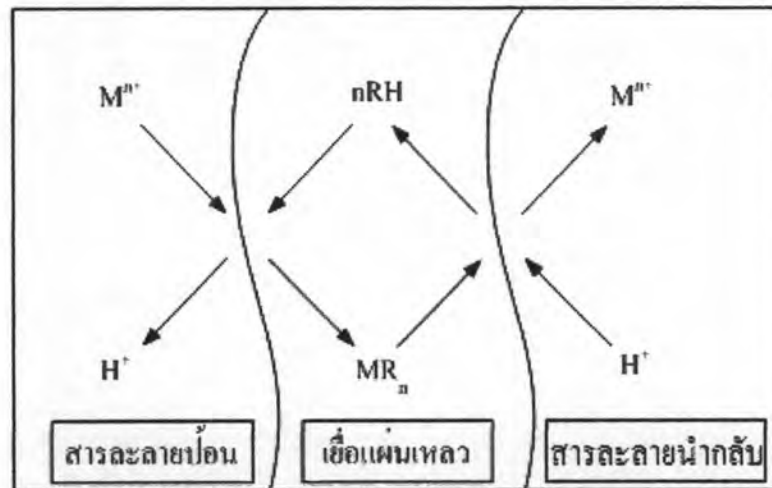
2.3.1 การถ่ายเทมวลแบบสวนทางกัน (Counter-transport)

การถ่ายเทมวลแบบสวนทางกันเป็นการถ่ายเทมวลที่ไอออนสองชนิดเคลื่อนที่สวนทางกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว ไอออนโลหะ M^{n+} ที่อยู่ในสารละลายป้อนจะทำปฏิกิริยากับสารสกัด RH ที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n และไอออนไฮโดรเนียม H^+ ดังสมการที่ 2.1 ที่ได้กล่าวแล้ว

การแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นไปยังอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลว เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อน MR_n จะทำปฏิกิริยาย้อนกลับกับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายนำกลับ เกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด RH กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้ง และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังสมการที่ 2.2



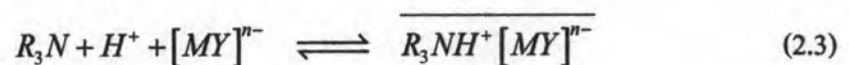
ทิศทางการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกันของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ทิศทางการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกันของไอออนของโลหะและไอออนไฮโดรเนียม

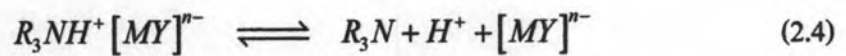
2.3.2 การถ่ายเทมวลแบบทางเดียวกัน (Co-transport)

การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกันเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของไอออนโลหะประจุลบ $[MY]^{n-}$ และไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายป้อน ไอออนโลหะประจุลบและไอออนไฮโดรเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดที่เป็นเบส (R_3N) ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+ [MY]^{n-}$) ในเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ 2.3

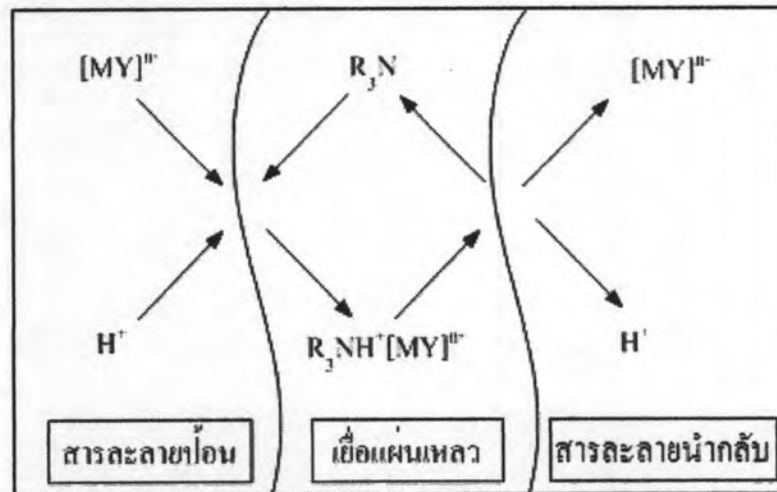


การแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น ไปยังอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด (R_3N) กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้งและ

แพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังสมการที่ 2.4



ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเจนแบบไปทางเดียวกันแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ทิศทางการถ่ายเทมวลแบบทางเดียวกันของไอออนของโลหะและไอออนไฮโดรเจน

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน [ประกร รามกุล, 2544]

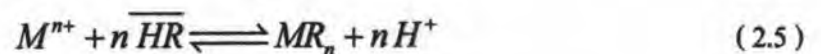
- 1) การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
- 2) การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารละลายสกัดที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน
- 3) การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ
- 4) การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารละลายสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ
- 5) การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ

2.4 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเชื้อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด (Tavlarides, 1987) ดังนี้

2.4.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant) และสารสกัดชนิดคีเลต (Chelate Extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-\text{COOH}$ $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$ $-\text{SO}_3\text{H}$ ส่วนสารสกัดประเภทหลังจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรด เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ดังสมการที่ 2.5

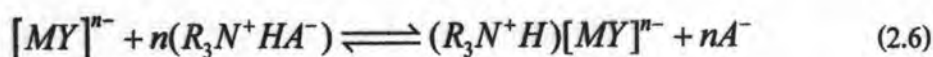


เครื่องหมายขีดด้านบนบทความว่าสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารอินทรีย์ สมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนไฮโดรเจนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคสารละลายและธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ (Tavlarides, 1987) สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Derivatives of Phosphorous Acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic Acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric Acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (Di-2-Ethylhexyl Phosphoric Acids, D2EHPA) สารสกัดประเภทคีเลต ได้แก่ สารสกัดที่ประกอบด้วย คอนเนอร์กรุป (Donor Groups) ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate Complexes) กับไอออนโลหะ สารสกัดประเภทคีเลตเชิงพาณิชย์มี 2 ประเภท ได้แก่ (ก) กลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-Hydroxy Benzophenone Oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical

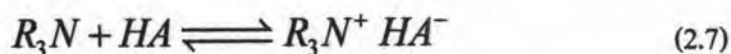
USA (ข) กลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมา โดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic leach liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline)

2.4.2. สารสกัดชนิดเบส (Basic Extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเป็นเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดชนิดเบสที่ใช้กันมากเป็นพวกเอมีน และแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary Ammonium Halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary, RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary, R_2NH) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary, R_3N) และชนิดจตุภูมิ (Quaternary Ammonium Salts, R_3N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะประจุลบ (Anionic Species) ที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบนี้จะถูกสกัดได้ด้วยเอมีน ดังสมการที่ 2.6



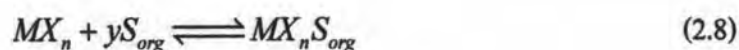
เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจวบกับไอออนโลหะ ดังสมการที่ 2.7



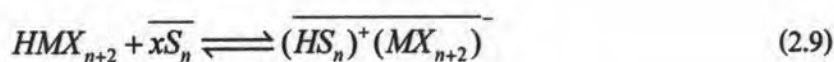
นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว $R_3N^+ HA^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ $[MY]^{n-}$ จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจูดังสมการที่ 2.6

2.4.3. สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral Extractant)

สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral) หรือชนิดโซลเวท (Solvating Extractant) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะคอนเนอร์กรุ๊ปจึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ดังนั้น สารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนของโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถของไอออนโลหะในการที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดเบส การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมของโลหะที่อยู่ตรงกลางของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดเป็นกลาง ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดเป็นกลางดังสมการที่ 2.8 และ 2.9



2.5 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction)

การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ หมายถึง การสกัดแยกไอออนของโลหะโดยใช้สารสกัดผสมสองชนิดแล้วได้ประสิทธิภาพสูงกว่าผลรวมของการสกัดด้วยสารสกัดเพียงชนิดเดียวที่อยู่ในสารสกัดผสมนั้น ประสิทธิภาพสูงกว่าผลรวมที่ได้จากการใช้สารสกัดเพียงชนิดเดียวที่อยู่ในสารสกัดผสมนั้น

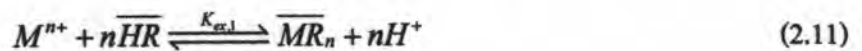
ประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับการนำสารสกัดทั้งสองชนิดนั้นมาแยกกันสกัดแล้วนำผลการสกัดมารวมกัน (Mathur, 1983) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการเสริมฤทธิ์ (Synergistic Coefficient, S.C.) Taube และ Sikierski ได้ให้นิยามไว้ดังนี้ ใช้สารสกัดผสมสารสกัดของ

$$S.C. = \log \left(\frac{D_{(1,2)}}{D_{(1)} + D_{(2)}} \right) \quad (2.10)$$

- เมื่อ $D_{(1)}$ คือ อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนโดยใช้สารสกัดชนิดเดียว
- $D_{(2)}$ คือ อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนเมื่อใช้สารสกัดชนิดเดียวอีกชนิดหนึ่ง
- $D_{(1,2)}$ คือ อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนเมื่อใช้สารสกัดสองชนิดผสมกัน

D หมายถึง Distribution Ratio คือ อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน ถ้าค่า S.C. มากกว่า 0 หมายความว่าเกิดการสกัดแบบ Synergistic แต่ถ้าค่า S.C. น้อยกว่า 0 หมายความว่าชนิดของสารสกัดที่นำมาผสมกันนี้ทำให้ความสามารถในการสกัดด้อยลงเรียกว่า Antagonistic

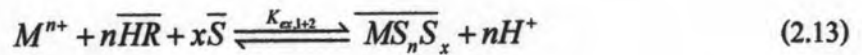
สารสกัดทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันเพื่อที่จะให้เกิดการสกัดแบบ Synergistic นั้นจะต้องมีสารสกัดชนิดหนึ่งทำหน้าที่สกัดหลักซึ่งโดยมากจะใช้ HTTA เป็นสารสกัดหลักและสารสกัดอีกชนิดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นคอปเปอร์คอยเสริมการสกัด สารสกัดจำพวกคอปเปอร์นี้จะเป็นสารสกัดที่ไม่สามารถแตกโปรตอนได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวไว้เกิดปฏิกิริยาซึ่งคอปเปอร์พวกนี้จะไปทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักเกิดเป็น adduct และไปจับโลหะอีกทีหนึ่ง (Peppard, 1977) สารสกัดที่เป็นพวกคอปเปอร์ เช่น Tri-n-octylamine (TOA) , Tri-n-butylphosphate (TBP) , Tri-n-octylphosphineoxide (TOPO), Aliquat Chloride ฯลฯ ปฏิกิริยาของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์จะเริ่มจากปฏิกิริยาดังนี้



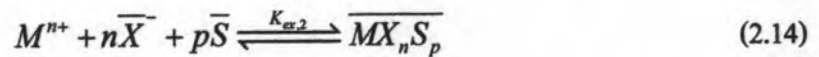
$$K_{ex,1} = \frac{[H^+]^n [\overline{MR}_n]}{[M^{n+}] [\overline{HR}]^n} \quad (2.12)$$

ซึ่งสมการ 2.11 เป็นการสกัดของสารสกัดหลักซึ่งเป็นสารสกัดชนิดกรดโดยทั่วไป เมื่อ R คือสารสกัดหลัก และ $K_{ex,1}$ คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาในกรณีที่สารสกัดหลักทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะโดยตรง ส่วนปฏิกิริยาของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic) คือ สารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นคอปเปอร์

(S) จะทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลัก HR แล้วไปทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะในสารละลายป้อนเกิดเป็นสารประกอบอีกชนิดคือ MR_nS_x เรียกว่า Adduct ดังสมการ 2.13 ทำให้สกัดโลหะได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้สารสกัดที่เป็นคอนเนอร์เองยังสามารถไปจับโลหะเองโดยไม่ต้องทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลัก ก่อนดังสมการ 2.14 ซึ่งจะยิ่งทำให้สกัดโลหะได้มากยิ่งขึ้นและเกิดเป็น Adduct คือ MX_nS_p เมื่อ X คือ ไอออนประจุลบที่อยู่ในสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของน้ำ



และสารสกัดที่มีหมู่คอนเนอร์นี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะได้โดยตรงดังสมการ



จากสมการ 2.13 และ 2.14 จะได้ว่า

$$K_{ex,1+2} = \frac{[H^+][\overline{MX_nS_x}]}{[M^{n+}][\overline{S}]^x[\overline{HR}]^n} \quad (2.15)$$

$$K_{ex,2} = \frac{[\overline{MX_nS_p}]}{[M^{n+}][\overline{X}]^n[\overline{S}]^p}$$

(2.16)

เมื่อ $K_{ex,1+2}$ และ $K_{ex,2}$ คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดแบบ Synergistic และค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดโดยสารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นคอนเนอร์โดยตรง ตามลำดับ และ Distribution Ratio คือ

$$D_{(1)} = \frac{[\overline{MR_n}]}{[M^{n+}]} = \frac{K_{ex,1}[\overline{HR}]^n}{[H^+]}$$

(2.17)

$$D_{(2)} = \frac{[MX_n S_p]}{[M^{n+}]} = K_{ex,2} [X^-] [S]^p \quad (2.18)$$

$$D_{(1+2)} = D_{(1)} + D_{(2)} + \frac{[\overline{MR_n S_x}]}{[M^{n+}]} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.17, 2.18, 2.19 จะได้

$$D_{(1+2)} = \frac{K_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-] [\overline{S}]^p + K_{ex,1+2} \frac{[\overline{S}]^x [\overline{HR}]^n}{[H^+]} \quad (2.20)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.10 จะได้

$$S.C. = \log \left(\frac{\frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-] [\overline{S}]^p + K_{ex,1+2} \frac{[\overline{S}]^x [R]^n}{[H^+]}}{\frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-] [\overline{S}]^p}} \right) \quad (2.21)$$

เนื่องจากค่าของ $K_{ex,2}$ นั้นมีค่าน้อยมากเพราะสารสกัดที่เป็นคอเนอร์นั้นสามารถจับโลหะที่เป็นไอออนบวกได้น้อยมากจึงให้พจน์ที่มี $K_{ex,2}$ นั้นเป็นศูนย์ จากสมการ 2.21 จะได้ว่า

$$S.C. = \log \left(1 + \frac{K_{ex,1+2} [\overline{S}]^x}{K_{ex,1}} \right) \quad (2.22)$$

$$S.C. = \log (1 + \beta_{n,x} [S]^x) \quad (2.23)$$

$$\text{โดยที่} \quad \beta_{n,x} = \frac{K_{ex,1+2}}{K_{ex,1}} \quad (2.24)$$

$\beta_{n,x}$ หมายถึงค่าคงที่ความเสถียรของปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ที่เกิดในวัฏภาคน้ำมันหรือในเยื่อแผ่น จะเห็นได้ว่า $\beta_{n,x}$ คืออัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดผสมกันกับค่าคงที่

ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดหลักเพียงชนิดเดียว นั่นคืออัตราส่วนของค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2.13 กับสมการที่ 2.11 ดังนั้น $\beta_{n,x}$ ก็คือค่าคงที่สมดุลของสมการที่ 2.13 ลบด้วยสมการที่ 2.11 คือ

$$\overline{MR}_n + x\bar{S} \xrightleftharpoons{\beta_{n,x}} \overline{MR}_n S_x \quad (2.25)$$

ซึ่งสมการที่ 2.15 นี้เป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ที่เกิดในเมมเบรน โดยมี $\beta_{n,x}$ เป็นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ถ้า $\beta_{n,x}$ มีค่ามากหมายถึงมีการเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ มาก และถ้าสารสกัดที่เป็นคอเนอร์นั้นมีการทำปฏิกิริยาเป็น Adduct หลายตัว สามารถเขียนเป็นปฏิกิริยารวมได้ เป็น

$$S.C. = \left(1 + \sum_{i=1}^{i=x} \beta_{n,i} [\bar{S}]^i \right) \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.26 จะเห็นได้ว่าไอออนที่อยู่ในสารละลายป้อน เช่น M^{n+} , X^- , H^+ นั้นไม่มีผลต่อค่า $\beta_{n,x}$ นั่นคือไม่มีผลต่อการสกัดแบบเสริมฤทธิ์