

บทที่ 2

ทฤษฎี

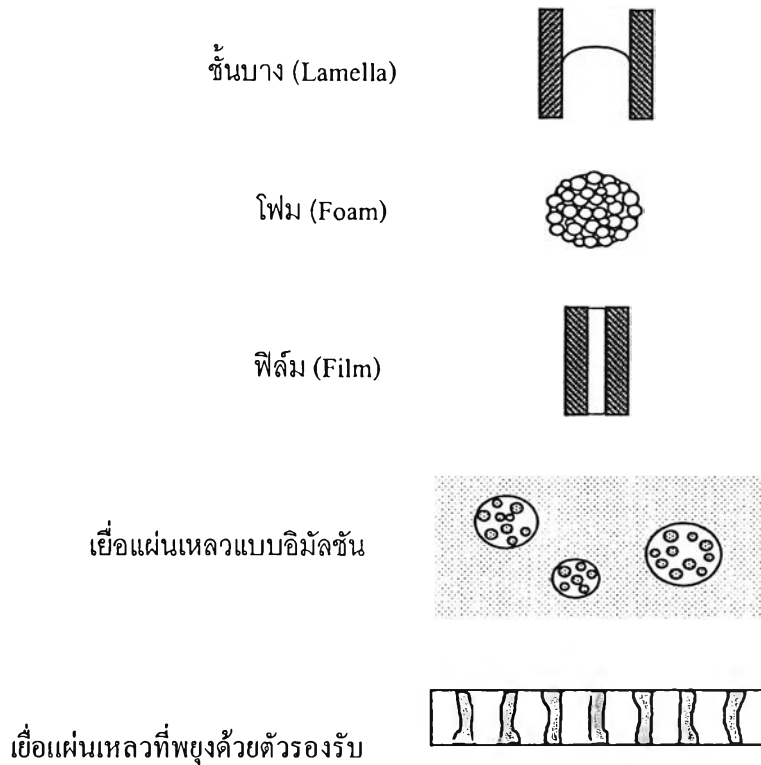
2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Process) ประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่

1. ส่วนของสารละลายป้อน (Feed Phase) เป็นส่วนที่มีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ในตัวทำละลาย ส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายของน้ำมัน
2. ส่วนเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Phase) ประกอบด้วยสารสกัด (Extractant) ที่ละลายในตัวทำละลาย ส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายของน้ำมัน
3. ส่วนของสารละลายนำกลับ (Stripping Phase) ทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากสารละลายป้อนซึ่งถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว

ส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมาคั่นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ (Stripping Solution) องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับและแยกตัวออกมาละลายอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับได้

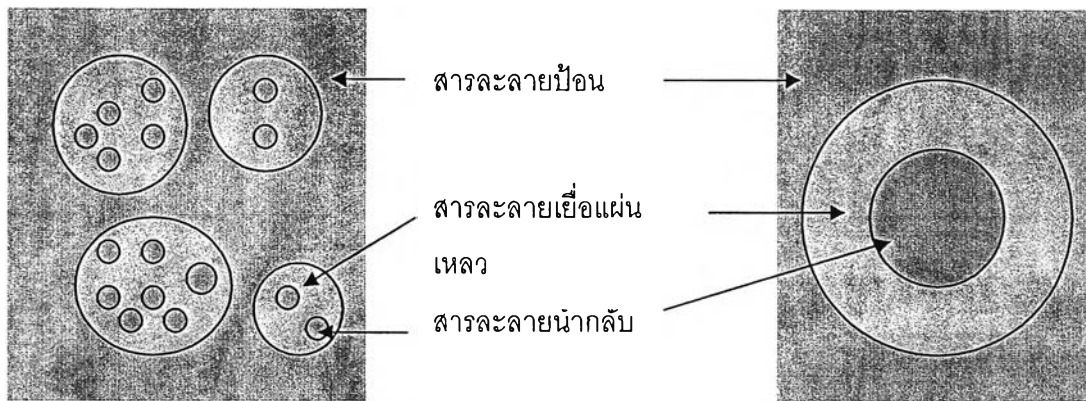
ดังนั้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจึงต้องมีการสร้างเยื่อแผ่นเหลวมาคั่นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่าชนิดอื่นๆ (Schultz, 1988)



รูปที่ 2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (Schultz, 1988)

2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน คือ การนำระบบเยื่อแผ่นเหลวที่อธิบายในหัวข้อ 2.1 มาจัดเรียงให้อยู่ในรูปอิมัลชัน สารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์อยู่ภายในซึ่งเป็นวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (Dispersion Phase) และจะเกิดกระบวนการถ่ายเทองค์ประกอบตั้งที่จะได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.2 ส่วนสารละลายนำกลับจะอยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอีกที่ดังรูปที่ 2.2 การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน สามารถเตรียมได้โดยนำสารละลายที่จะทำเป็นสารละลายนำกลับมาผสมกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะต้องไม่ละลายกัน แล้วนำมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงเพื่อให้วัฏภาคสารละลายนำกลับมีขนาดเป็นเม็ดเล็กๆ อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ได้จะมีความเสถียรต่ำจึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียร



รูปที่ 2.2 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (ประกร รามกุล, 2544)

เมื่อเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเสร็จแล้วจึงนำไปลงในสารละลายป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ทำให้เกิดการการเรียงวัฏภาคใหม่เป็น 3 ชั้น เรียงจากด้านในไปด้านนอก คือ สารละลายน้ำกลับ สารละลายเยื่อแผ่นเหลว และสารละลายป้อน ตามลำดับ เรียกว่าอิมัลชันเชิงซ้อน (Double Emulsion) กระบวนการแยกจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการแยกที่อยู่ในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและโปรตอน สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับ ไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายน้ำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้ สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายน้ำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายน้ำกลับ และได้สารสกัดกลับมาอีกครั้งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยาขององค์ประกอบที่ต้องการแยกต่อไปเมื่อเกิดการแยกแล้วองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจะไปอยู่ในสารละลายน้ำกลับ สารละลายป้อนที่แยกองค์ประกอบที่ต้องการสกัดออกไปในสารละลายป้อนขาออกหรือราฟฟินेट (Raffinate) จะถูกแยกออกจากเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน สุดท้ายจึงนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ผ่านกระบวนการสกัดแล้วไปแยกไอออนโลหะออกได้เป็นสารละลายผลิตภัณฑ์ สารละลายเยื่อแผ่นเหลวจะถูกนำกลับไปใช้ได้อีก

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- ก. เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (Water in Oil (W/O) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ
- ข. เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (Oil in Water (O/W) Emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน

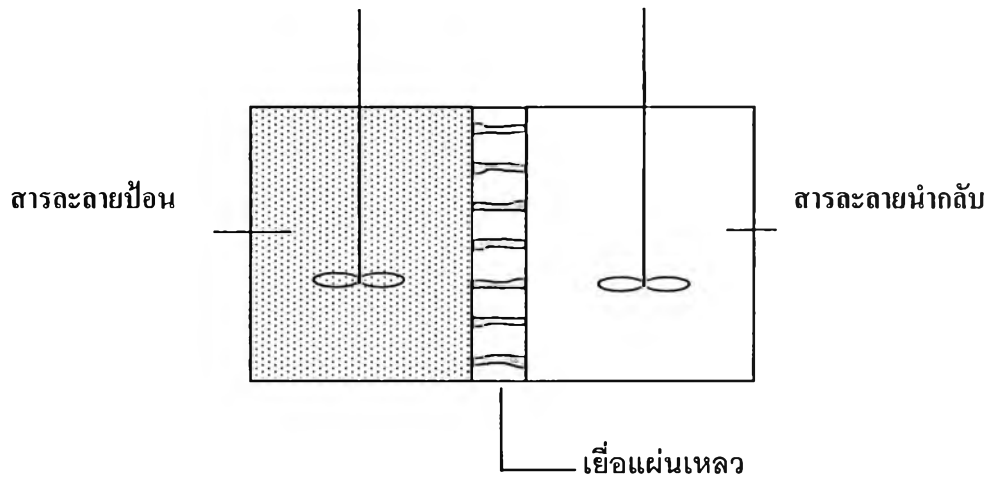
ในกรณีที่สารละลายนำกลับเป็นสารละลายของน้ำ เมื่อนำอิมัลชันของน้ำในน้ำมันมากระจายในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เป็นสารละลายของน้ำ ระบบจะเรียงวัฏภาคจากด้านในไปยังด้านนอก คือ น้ำ-น้ำมัน-น้ำ (w/o/w) แต่ถ้าสารละลายนำกลับเป็นสารละลายของน้ำมันก็จะกลับกันคือจะเรียงจาก น้ำมัน-น้ำ-น้ำมัน (o/w/o) ดังนั้นเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันจึงมีสารลดแรงตึงผิวสองประเภท ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) สำหรับอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) สำหรับอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ

2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้จะใช้พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนเป็นตัวยึดเยื่อแผ่นเหลวเอาไว้ในรูพรุนด้วยแรงแคปิลลารี (Capillary Force) (Mar และ Kopp, 1989; Schultz, 1988) เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวไม่มีการเคลื่อนที่และมีความเสถียรมากขึ้น เรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้อีกชื่อหนึ่งว่า Immobilize Liquid Membrane (Schultz, 1988) และสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสานซึ่งเป็นปัญหาของกระบวนการสกัด (Fernandez et al., 1987) รูพรุนจุลภาคที่ใช้เป็นตัวรองรับนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติดอยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น และอีกชนิดคือรูพรุนจุลภาคชนิดไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคที่มีน้ำมันเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติดอยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น ตัวรองรับมีหลายชนิด ได้แก่ ชนิดแผ่นบาง (Flat Sheet) ชนิดแผ่นม้วน (Spiral Wound) และชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber) ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ คือ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและสารสกัดที่ใช้มีปริมาณน้อย (O' Hara และ Bohrer, 1989; Shiau และ Chen, 1993)

2.1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นแบน (Flat-sheet Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ใช้ตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่มีความพรุน (Porosity) สูงส่วนใหญ่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ เช่น polypropylene (PP) polyethylene (PE) polytetrafluoroethylene (PTFE) เป็นต้น เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายเทมวลเนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่ไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อย รูปที่ 2.3 แสดงระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นแบน

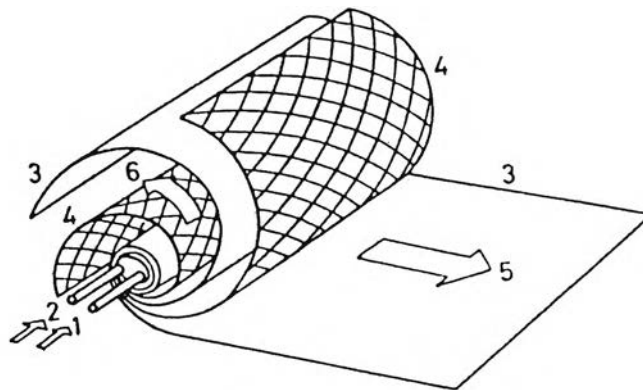


รูปที่ 2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นแบน (Komasawa et al., 1983)

2.1.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Spiral-wound Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วนแสดงดังรูปที่ 2.4 ตัวรองรับชนิดแผ่นม้วนผลิตขึ้นโดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และแผ่นตาข่าย (Mesh Spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อ นำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของมอดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้วและสารละลายนำกลับที่ได้จะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของมอดูล

จุดเด่นของกระบวนการนี้ คือ มอดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน

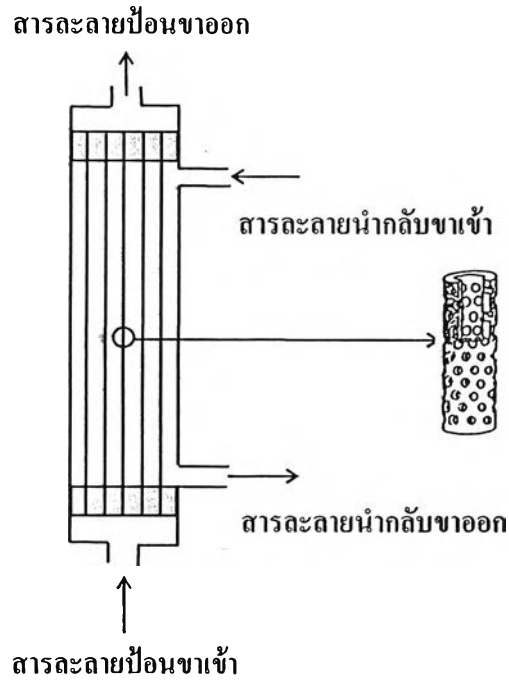


รูปที่ 2.4 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Teramoto et al., 1987)

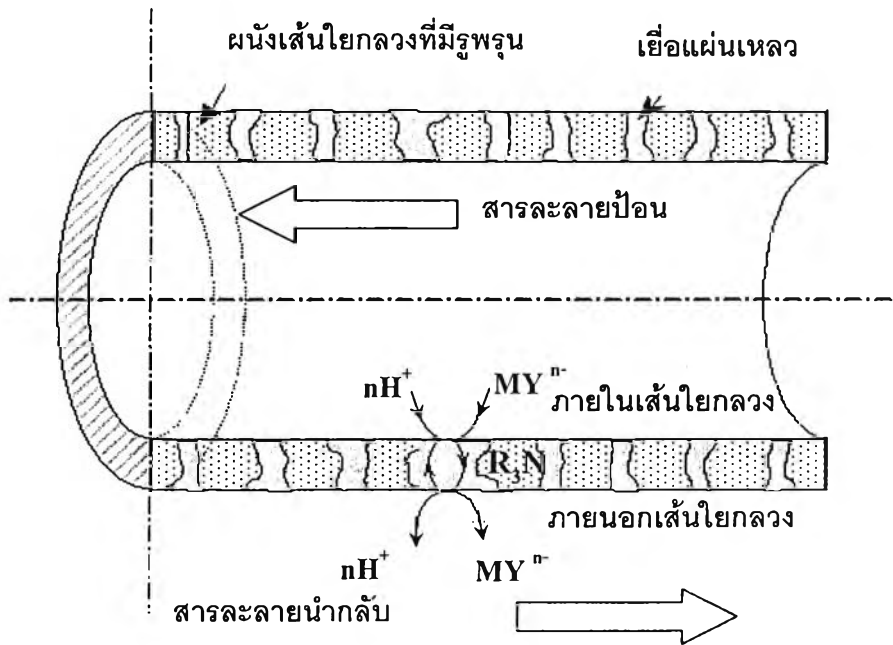
หมายเลขที่ 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน	หมายเลขที่ 2 ทางเข้าของสารละลายนำกลับ
หมายเลขที่ 3 เยื่อแผ่นเหลว	หมายเลขที่ 4 แผ่นกั้น
หมายเลขที่ 5 สารละลายป้อน	หมายเลขที่ 6 สารละลายนำกลับ

2.1.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane: HFSLM)

เป็นรูปแบบที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงจะนำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงในมอดูลรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของมอดูลด้วยเรซิน (Resin) ในการสกัดสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในเส้นใยกลวงที่เรียกว่าฝั่งท่อ (Tube Side) และฝั่งเปลือก (Shell Side) ซึ่งถูกกำหนดโดยผู้วิจัยว่าจะให้สายเคอยู่ฝั่งไหน ในงานวิจัยนี้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในฝั่งท่อและฝั่งเปลือกของมอดูลตามลำดับ สำหรับเยื่อแผ่นเหลวจะฝังอยู่ในเส้นใยกลวงซึ่งอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบไหลทางเดียวกันและแบบสวนทางกัน รูปที่ 2.6 แสดงการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับแบบสวนทางกัน



รูปที่ 2.5 เชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับเส้นใยกลวง (Izatt, 1988)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเชื้อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (ประกร รามกุล, 2544)

การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเส้นใยกลางทำโดยนำเยื่อแผ่นเหลวมาเคลือบฝั่งไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับเมื่อนำตัวรองรับนี้มาขึ้นระหว่างสารละลายสองชนิดที่ไม่ละลายกับเยื่อแผ่นเหลวตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทไอออนโลหะจากสารละลายชนิดแรกไปยังสารละลายอีกชนิดหนึ่ง ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝั่งจะเป็นสารละลายอินทรีย์ และพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝั่งต้องเป็นวิทยาศาสตร์ละลายของน้ำ

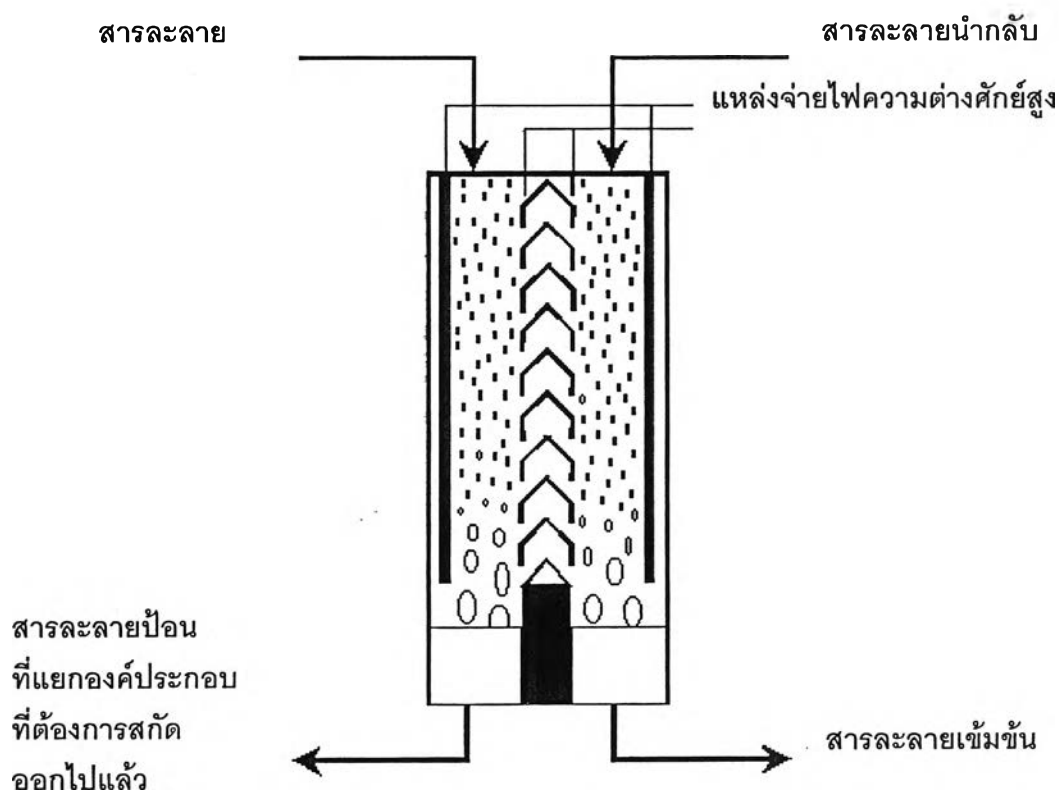
ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ (ประกร รามกุล, 2544)

- มีสัมประสิทธิ์การแยกสูง
- มีอัตราการถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- มีการคัดเลือกลสูง
- สามารถเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์
- สามารถที่จะใช้แยกสารที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ได้
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าสูง
- สามารถใช้กับระบบที่มีของแข็งแขวนลอยได้
- มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ
- สามารถดัดแปลงได้
- สามารถที่จะขยายขนาดได้ง่าย

ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลางเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง (Yang และ Cussler, 1986; Dahuron และ Cussler, 1988) และเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ (Danesi และ Rickert, 1986; Nakano et al., 1987; Tanikaki et al., 1988) จึงใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้

2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo-liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตพัฒนาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลัมน์ชนิดหอสกัดแบบหยด หลักไฟฟ้าสถิต และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว จึงสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้ เช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายและระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ความเสถียรของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น ลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตแสดงดังรูปที่ 2.7 (ประกร รามกุล, 2544)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (ประกร รามกุล, 2544)

จากรูปที่ 2.7 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์นำกลับ มีแผ่นกั้น (Baffle Plate) เป็นโลหะซึ่งใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า มีลักษณะเป็นตัวอักษรรูปตัว V คว่ำเรียงต่อกันแต่ละแผ่นเว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันเท่ากัน โดยมีลวดโลหะร้อยยึดแผ่นกั้นแต่ละแผ่นเอาไว้ ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะทึบสำหรับกั้นระหว่างวัฏภาค สารละลายป้อนที่แยกองค์ประกอบที่ต้องการสกัดออกไปในราฟไฟเนต กับสารละลายนำกลับขา

ออก ในเซลล์สกัดและเซลล์การนำกลับมีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวขั้นตอนทำงานเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวิภาคของสารอินทรีย์จนได้ระดับปริมาตรที่ต้องการ

เยื่อแผ่นเหลวนี้อาจเป็นวิภาคต่อเนื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต จากนั้นป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของวิภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับวิภาคของเยื่อแผ่นเหลว และเกิดการสกัดแยกและนำกลับสารที่ต้องการสกัดออกตามกลไกการสกัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตเป็นปัจจัยเสริมให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อนผสมกันของวิภาคต่างๆ ถ้าหากมีหยดของสารละลายป้อนหรือสารละลายนำกลับหลุดเข้าไประหว่างแผ่นกั้น หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดวิภาคของสารละลายมีรูปทรงยืดยาวออกเป็นรูปทรงรีที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของวิภาคสารละลาย และตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของวิภาคของสารละลายกับวิภาคของเยื่อแผ่นเหลวดังกล่าว (Gu, 1990)

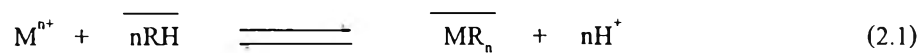
ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตจะมีข้อดีอยู่มากเช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวิภาคต่างๆ ค่าเยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและด้านทานการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นขนาดและการกระจายตัวของหยดวิภาคของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรไม่สูง วิภาคของสารอินทรีย์เยื่อแผ่นเหลว ต้องมีความเป็นขั้วต่ำและใช้กับกระบวนการที่เป็นวิภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวิภาคต่างๆ ในกระบวนการต่ำจึงเป็นข้อจำกัดด้านเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง เป็นต้น

2.2 ชนิดของสารสกัด

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

2.2.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant) และ สารสกัดชนิดคีเลต (Chelate Extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-COOH$, $=P(O)OH$, $-SO_3H$ ส่วนสารสกัดชนิดคีเลตสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลางและสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ดังสมการ 2.1



เครื่องหมายขีดด้านบนหมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ สมการนี้แสดงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างโปรตอนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคสารละลายอินทรีย์และธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ ความสามารถในการสกัดสูงเมื่อวัฏภาคสารละลายอินทรีย์เป็นกรดและไอออนโลหะมีประจุบวก (Tavlarides et al., 1987)

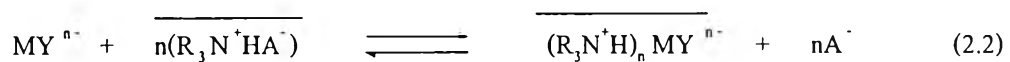
สารสกัดชนิดกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์อินทรีย์ของกรดฟอสฟอรัส (Organic Derivatives of Phosphorous Acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic Acids) ซึ่งในสารสกัดชนิดนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric Acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acids: D2EHPA)

สารสกัดชนิดคีเลต ได้แก่ สารสกัดที่ประกอบด้วยหมู่ที่ให้ไอออนลบ (Donor Groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate Complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดชนิดคีเลตเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียง 2 ประเภท คือ (ก) ประเภทกลุ่ม 2-ไฮดรอกซีเบน

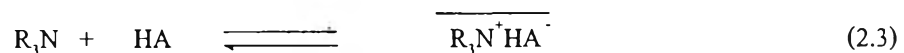
โซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) ประเภทกลุ่ม 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic Leach Liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์

2.2.2 สารสกัดชนิดเบส (Basic Extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดชนิดเบสที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary Ammonium Halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary: RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary: R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary: R_3N) และชนิดจตุภูมิ (Quaternary: R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นกับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะประจุลบ (Anionic Species) ที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำ ปฏิกริยาการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดชนิดเบสแสดงดังสมการที่ 2.2

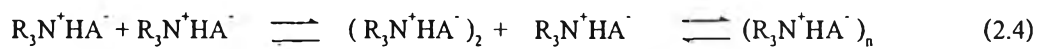


เพื่อให้การแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะเกิดขึ้นเอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสม ดังสมการที่ 2.3



จากสมการที่ 2.3 เอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว $\text{R}_3\text{N}^+\text{HA}^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ MY^{n-} จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการที่ 2.2

ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยใช้สารสกัดเอมีนคือการรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นกับสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ (Ammonium Cation และ Ammonium Anion) การรวมตัวของเกลือเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการที่ 2.4



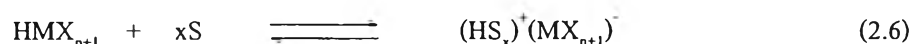
วัฏภาคที่สามจะทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifier) เช่น long-chain aliphatic alcohol (Tavlarides et al., 1987)

2.2.3 สารสกัดชนิดขอลเวท (Solvating Extractant)

สารสกัดชนิดขอลเวทหรือสารสกัดชนิดกลาง (Neutral Extractant) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะหมู่ที่ให้ไอออนลบ ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดเบส การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (Central Metal Atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังสมการที่ 2.5



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดขอลเวท ความสามารถในการละลายของสารอินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการเข้าทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดขอลเวทดังสมการที่ 2.6



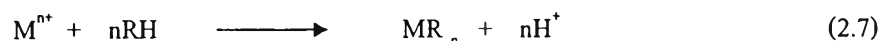
2.3 กลไกการถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวลในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ คือ กระบวนการถ่ายเทมวลของไอออนสองชนิดพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว เพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ ซึ่งแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลคือผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการได้เรื่อยๆ แม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านของสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อน

การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบ่งเป็น 2 แบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโปรตอน (H^+) ในสารละลายป้อนและสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะในเยื่อแผ่นเหลว

2.3.1 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (Counter-Transport)

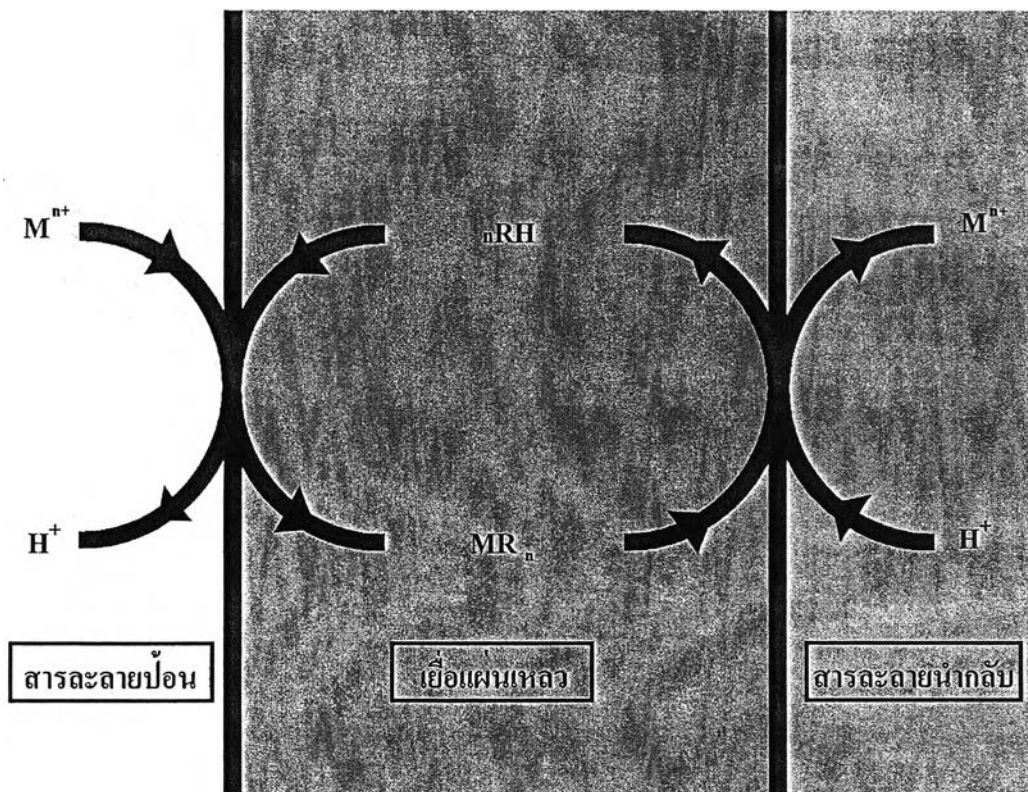
การถ่ายเทมวลแบบสวนทางเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบสวนทางของสารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) ที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลวจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนโลหะ (M^{n+}) ในสารละลายป้อนและสารสกัดกรด (RH) บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อน ดังสมการที่ 2.7



การแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นไปยังอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) จะทำปฏิกิริยาย้อนกลับกับโปรตอนที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด (RH) กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้ง และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังสมการที่ 2.8



ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและโปรตอนแบบสวนทาง แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและโปรตอนแบบสวนทาง (ประกร รามกุล, 2544)

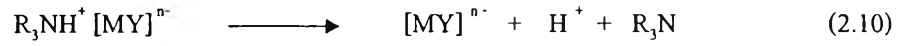
2.3.2 การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport)

การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกันเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของไอออนโลหะประจุลบ $[MY]^{n-}$ และโปรตอนที่อยู่ในสารละลายป้อน ไอออนโลหะประจุลบและโปรตอนจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดที่เป็นเบส (R_3N) บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+ [MY]^{n-}$) ในเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ 2.9



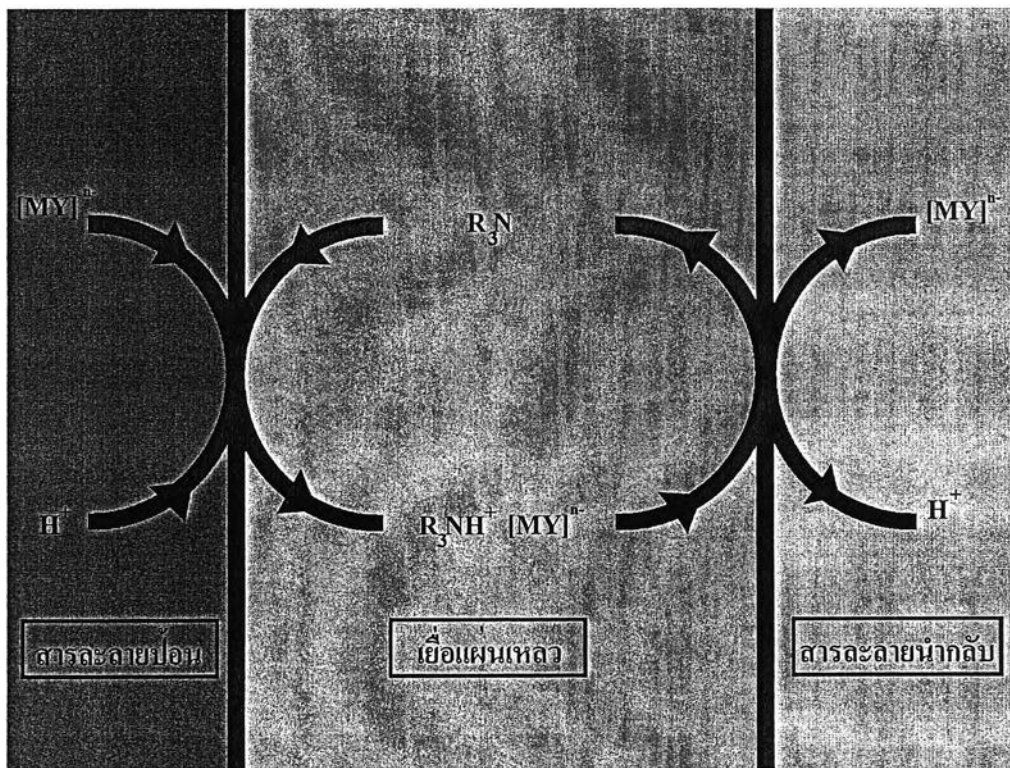
การแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นไปยังอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดเป็น

ไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด (R_3N) กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้ง และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังสมการที่ 2.10



ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและโปรตอนแบบไปทางเดียวกันแสดงดังรูปที่

2.9



รูปที่ 2.9 ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและโปรตอนแบบไปทางเดียวกัน

(ประกร รามกุล, 2544)

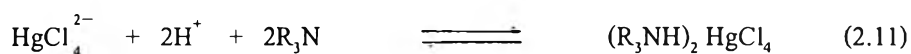
ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

1. การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
2. การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
3. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
4. การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
5. การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ ส่วนสารสกัดจะแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนเพื่อไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะอีก

2.4 ทฤษฎีการคำนวณแบบจำลองการถ่ายเทมวล

2.4.1 การหาค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant: K_{ex}) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท

การศึกษาการสกัดไอออนปรอทผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้ TOA ซึ่งละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ทอสูอื่นเป็นสารสกัด ปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทแสดงดังสมการที่ 2.11



จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเขียนความสัมพันธ์ค่าคงที่สมดุลได้ดังสมการที่ 2.12

$$K_{ex} = \frac{[(\text{R}_3\text{NH})_2\text{HgCl}_4]}{[\text{HgCl}_4^{2-}][\text{H}^+]^2[\text{R}_3\text{N}]^2} \quad (2.12)$$

2.4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient: D)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient) หรืออัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของไอออนโลหะที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลาย (Seader and Ernest, 1984; Rathore et al., 2001) ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการสกัดไอออนปรอทแสดงได้ดังสมการที่ 2.13

$$D = \frac{[(R_3NH)_2HgCl_4]}{[HgCl_2^+]} = K_{ex} [H^+]^2 [R_3N]^2 \quad (2.13)$$

2.4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, P)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านใช้สมมติฐานที่ว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) ของการสกัดไอออนปรอททางด้านสารละลายป้อนไปยังเยื่อแผ่นเหลวมากกว่าทางด้านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับเป็นอย่างมาก (Danesi, 1984) โดยใช้สมการ

$$V_f \ln \left(\frac{C_f}{C_{f,0}} \right) = -AP \frac{\phi}{\phi + 1} t \quad (2.14)$$

โดยที่

$$\phi = \frac{Q_f}{PL\epsilon\pi Nr_i} \quad (2.15)$$

เมื่อ

P	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	(เซนติเมตรต่อวินาที)
$C_{f,0}$	=	ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาเริ่มต้น	(โมลต่อลิตร)
C_f	=	ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลา t	(โมลต่อลิตร)
A	=	พื้นที่การถ่ายเทมวล	(ตารางเซนติเมตร)
V_f	=	ปริมาตรของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตร)
Q_f	=	อัตราการไหลของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
L	=	ความยาวของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)

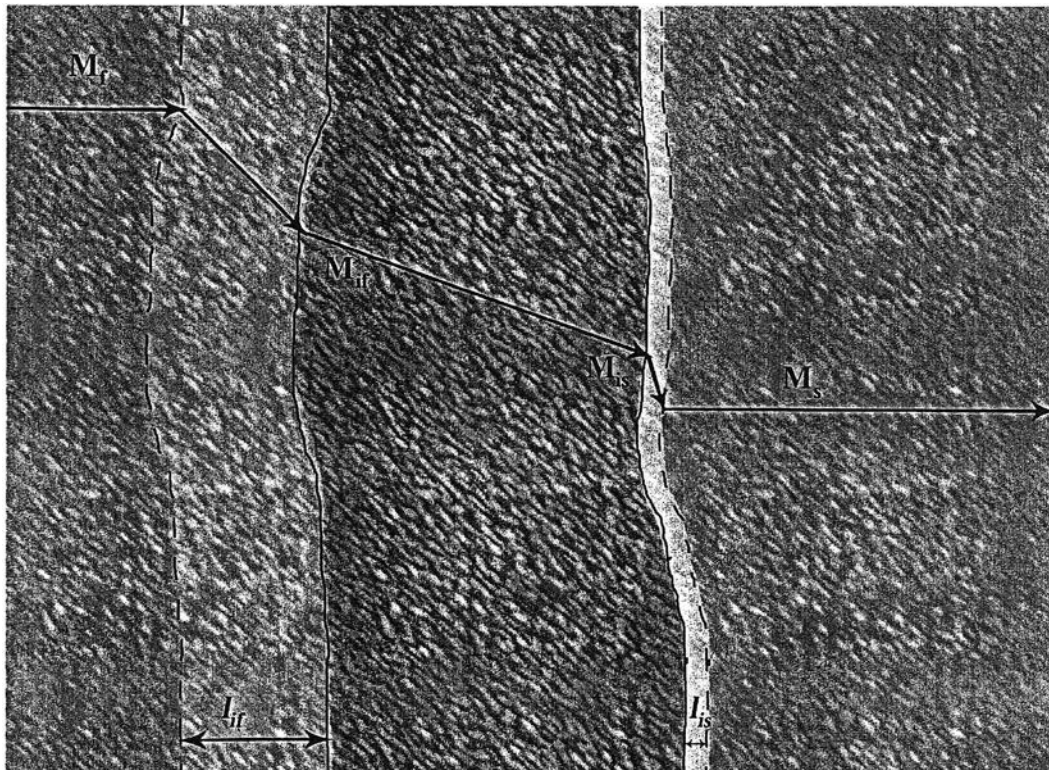
N	=	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล	(เส้น)
r_i	=	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
ε	=	ความพรุนของเส้นใยกลวง	
π	=	3.1416	

การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านทำโดยสร้างกราฟระหว่าง $-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right)$ กับเวลา (t) จะได้ความชันของกราฟ คือ $AP \frac{\phi}{\phi+1}$ ซึ่งทำให้หาค่า P หรือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

2.4.4 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass Transfer Coefficient: k)

แบบจำลองการถ่ายเทมวลของการแยกไอออนโปรทโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนโปรท (P) ในการหาค่าอื่นๆ ต่อไป ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านขึ้นอยู่กับความต้านทานการถ่ายเทมวลโดยที่ขั้นตอนของกลไกการถ่ายเทมวลมี 3 ขั้นตอน (Kumar et al., 2000) ดังรูปที่ 2.10 ได้แก่

1. ไอออนโลหะถ่ายเทจากชั้นฟิล์มมายังผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มกับเยื่อแผ่นเหลว
2. ไอออนสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากไอออนโลหะทำปฏิกิริยากับสารสกัดและถ่ายเทมวลจากด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวไปยังอีกด้านหนึ่ง
3. ไอออนโลหะที่นำกลับซึ่งถ่ายเทมวลจากผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มกับเยื่อแผ่นเหลวไปยังชั้นฟิล์มของสารละลายนำกลับ



รูปที่ 2.10 แผนผังการถ่ายเทมวลผ่านเชื่อแผ่นเหลว (ประกร รามกุล, 2544)

เมื่อ

- M_r = ความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายป้อน (โมลต่อลิตร)
- M_{ir} = ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเชื่อแผ่นเหลว (โมลต่อลิตร)
- M_{is} = ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเชื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ (โมลต่อลิตร)
- M_s = ความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายนำกลับ (โมลต่อลิตร)
- l_{ir} = ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนกับเชื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตร)
- l_{is} = ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างเชื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ (เซนติเมตร)

และในแต่ละขั้นตอนจะเกิดความต้านทานการถ่ายเทมวลขึ้น ได้แก่

1. ความต้านทานเมื่อของเหลวไหลผ่านเข้าไปในรูพรุนของเส้นใยกลวง
2. ความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของไอออนสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนปรอทกับสารสกัดผ่านเข้าไปในเยื่อแผ่นเหลวที่ถูกต้องไว้ในผนังรูพรุนของเส้นใยกลวง
3. ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายนำกลับและสารละลายอินทรีย์ที่บริเวณผิวด้านนอกของเส้นใยกลวง

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของการถ่ายเทมวลกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.16 (Rathore et al., 2001)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{P_m} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{k_s} \quad (2.16)$$

โดยที่

$$r_{lm} = \frac{r_o - r_i}{\ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)} \quad (2.17)$$

เมื่อ

r_{lm} = รัศมี Log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

r_o = รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

k_i = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน
(เซนติเมตรต่อวินาที)

k_s = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายนำกลับ
(เซนติเมตรต่อวินาที)

P_m = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว
(เซนติเมตรต่อวินาที)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (P_m) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, D) ดังสมการที่ 2.18 (Rathore et al., 2001)

$$P_m = Dk_m \quad (2.18)$$

รวมสมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.18 จะได้

$$P_m = K_{ex} k_m [R_3N]^2 [H^+]^2 \quad (2.19)$$

โดยที่ k_m = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว

ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลในสารละลายน้ำกลับสามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายน้ำกลับ (k_s) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_i) อยู่มากซึ่งมีสาเหตุมาจาก (ประกร รามกุล, 2544)

1. ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวมีค่ามากกว่าความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายน้ำกลับมาก ดังรูปที่ 2.10 เนื่องจากที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อนจะมีการรวมตัวกันของไอออน โลหะและกรดที่ละลายอยู่ในสารละลายป้อน ในขณะที่ด้านการนำกลับนั้นไม่มีเพียงสารละลายน้ำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียวจึงไม่เกิดการรวมตัวกันของตัวทำละลายที่จะทำให้เพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มทำให้สารละลายน้ำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์สัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวได้โดยตรงตามสมการ (Bird et al., 1960)

$$k_i = \frac{D}{l_f} \quad (2.20)$$

และ

$$k_s = \frac{D}{l_{is}} \quad (2.21)$$

โดยที่ D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)

จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_i) มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายน้ำกลับ (k_s) อย่างมาก

2. จากสมการ

$$\text{Flux} = k_i (M_i - M_{if}) = k_s (M_{is} - M_s) \quad (2.22)$$

ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายป้อน (M_i) กับความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว (M_{if}) มีค่ามากกว่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ (M_{is}) กับความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายนำกลับ (M_s) (Porter, 1990)

3. เนื่องจากที่ด้านการนำกลับจะมีการใช้สารละลายนำกลับเพียงชนิดเดียวคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะสัมผัสโดยตรงกับเยื่อแผ่นเหลวทำให้เกิดการละลายขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเราสามารถตัดเทอมสุดท้ายของสมการที่ 2.16 ทิ้งได้ และเมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (P_m) จากสมการที่ 2.19 ในสมการที่ 2.16 จะได้

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m [R_3 N]^2 [H^+]^2} \quad (2.23)$$

ดังนั้นเมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\frac{1}{P}$ กับ $\frac{1}{[R_3 N]^2 [H^+]^2}$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มี

ความชันเท่ากับ $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m}$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่น

เหลว (k_m) ได้ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_i) สามารถคำนวณได้จาก

จุดตัดแกน $\frac{1}{P}$