

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ กระบวนการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง การถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

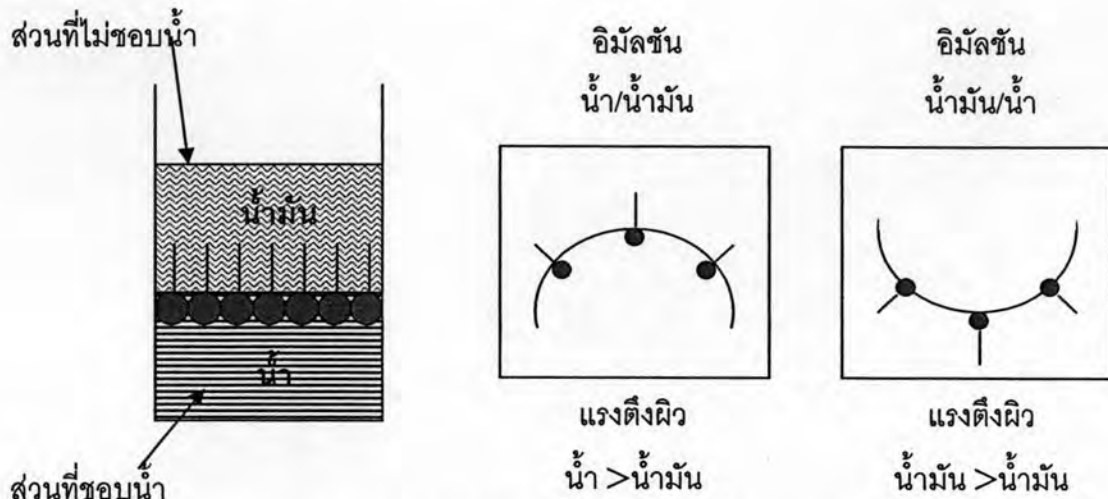
เทคโนโลยีการแยกสารแต่ละวิธีใช้หลักการที่แตกต่างกัน เช่น การเปลี่ยนเฟส การใช้ตัวกลาง และการแยกโดยเชิงกล เป็นต้น การแยกสารโดยใช้เทคโนโลยีเยื่อแผ่นสังเคราะห์หรือเมมเบรน (Membrane) เป็นวิธีการแยกสารโดยอาศัยตัวกลางซึ่งอาจเป็นฟิล์มบางๆ หรือฟองขนาดเล็กมากๆ ทำหน้าที่กั้นระหว่างเฟสของสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารอินทรีย์กับเฟสของสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เมมเบรนสามารถเลือกสกัดและนำกลับไอออนโลหะจากสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนโลหะในปริมาณน้อย โดยทั่วไปเมมเบรนจะเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ เมมเบรนที่เป็นของเหลว เรียกว่า เยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane) ซึ่งแบ่งตามโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภท คือ เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ (Supported liquid membrane) และเยื่อแผ่นเหลวแบบไม่มีตัวรองรับ (Unsupported liquid membrane) ของเหลวหรือสารละลายสกัดจะถูกพองไว้ในรูพรุนของตัวรองรับ จึงทำให้เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับใช้ปริมาณสารสกัดน้อยแต่ได้พื้นที่ในการสกัดสูงมาก (อูรา ปานเจริญ, 2551; สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์, 2544) และจากข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวที่ดีกว่าเทคนิคการแยกสารอื่นทำให้มีงานวิจัยและการพัฒนาเพื่อลดข้อจำกัดทางด้านเทคนิคของเยื่อแผ่นเหลวอย่างต่อเนื่องเพื่อประโยชน์ทั้งด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

ประเภทของเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้งานทั่วไป

2.1.1 เยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน (Emulsion liquid membrane: ELM)

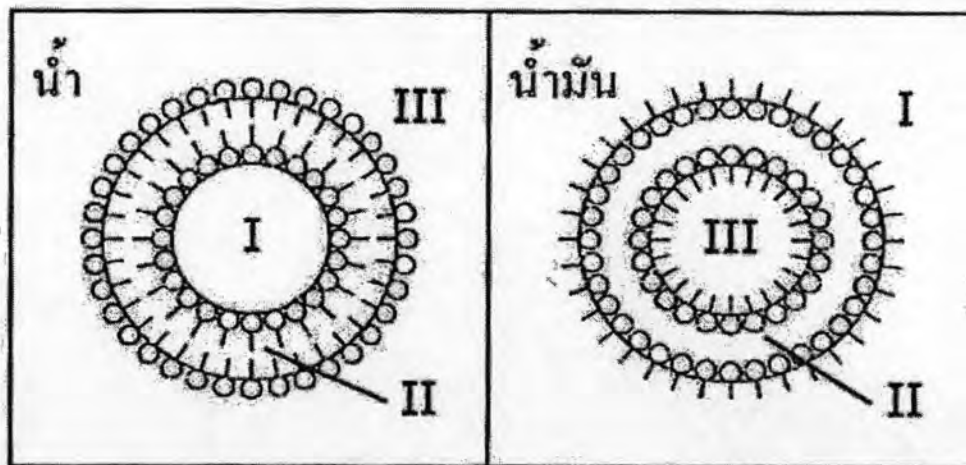
เยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชันเป็นเยื่อแผ่นเหลวแบบไม่มีตัวรองรับ สามารถเตรียมขึ้นได้ง่ายด้วยของเหลวที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน (Immiscible) คือ ส่วนของน้ำกับน้ำมันและใสสารลดแรงตึงผิว (Surface-active agent หรือ Surfactant หรือ Emulsifier) ซึ่งทำหน้าที่ประสานน้ำกับน้ำมันเกิดเป็นอิมัลชัน เยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชันมีพื้นที่ในการสกัดต่อหน่วยปริมาตรสูงถึง $1,000-3,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Winston Ho., 1992) ซึ่งมากกว่าเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ สารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะเกาะกับน้ำหรือ

สารที่มีขั้ว และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะเกาะกับน้ำมันหรือสารที่ไม่มีขั้ว การเกิดอิมัลชันมี 2 ลักษณะ คือ 1) น้ำ/น้ำมัน เกิดขึ้นเมื่อแรงตึงผิวน้ำมากกว่าน้ำมัน และ 2) น้ำมัน/น้ำ เกิดขึ้นเมื่อแรงตึงผิวน้ำมันมากกว่าน้ำ ส่วนใหญ่อิมัลชันที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะน้ำ/น้ำมัน (Marr and Kopp, 1982; รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดอิมัลชัน (Marr and Kopp, 1982; รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

ถ้าสิ่งที่ต้องการสกัดอยู่ในเฟสน้ำจะใช้อิมัลชัน น้ำ/น้ำมัน และเรียงลำดับเฟสเป็น น้ำ-น้ำมัน-น้ำ เรียกว่า เยื่อแผ่นน้ำมัน ถ้าสิ่งที่ต้องการสกัดอยู่ในเฟสน้ำมันจะใช้อิมัลชัน น้ำมัน/น้ำ และเรียงลำดับเฟสเป็น น้ำมัน-น้ำ-น้ำมัน เรียกว่า เยื่อแผ่นน้ำ ดังรูปที่ 2.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) เยื่อแผ่นน้ำมัน

(ข) เยื่อแผ่นน้ำ

รูปที่ 2.2 ลำดับของเฟสในเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน

(Marr and Kopp, 1982; รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

จากที่กล่าวเยื่อแผ่นน้ำมัน แบ่งออกเป็น 3 เฟส คือ น้ำ-น้ำมัน-น้ำ ดังนี้

III เฟสนอก (External phase) เป็นเฟสน้ำที่อยู่นอกสุด ซึ่งเป็นเฟสสารป้อนที่มีไอออนโลหะที่ต้องการสกัด และหลังจากที่สกัดไอออนโลหะแล้ว

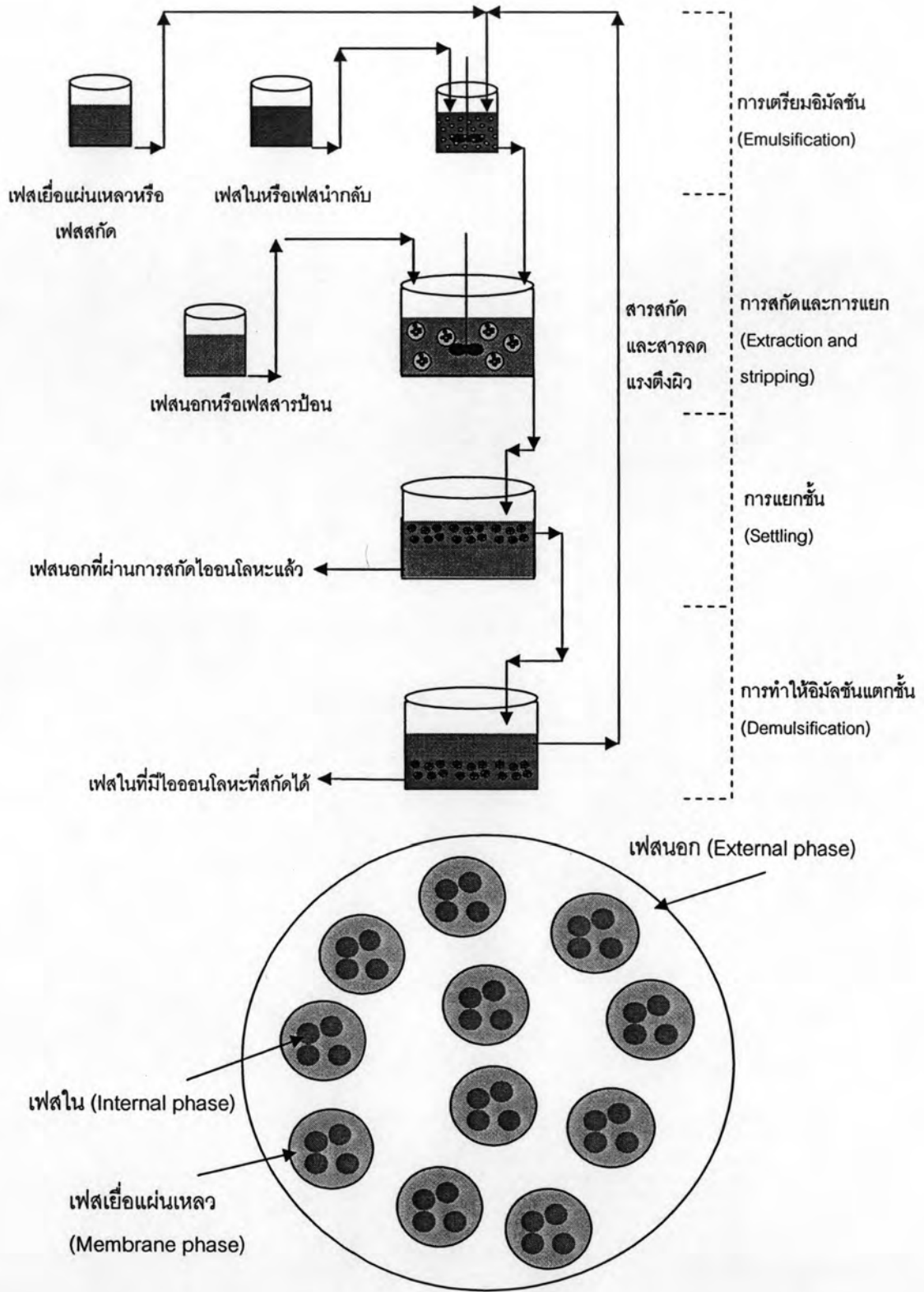
II เฟสเยื่อแผ่นเหลว หรือเฟสเมมเบรน หรือเฟสสกัด (Membrane phase หรือ Extraction phase) ประกอบด้วย สารลดแรงตึงผิวกับตัวทำละลายอินทรีย์

I เฟสใน (Internal phase) หรือเฟสรับ ทำหน้าที่แยกไอออนโลหะที่ต้องการสกัดออกจากเฟสสกัด จึงอาจเรียกว่าเฟสนำกลับ (Stripping phase) ซึ่งจะมีไอออนโลหะที่สกัดได้

สำหรับเยื่อแผ่นน้ำ แบ่งออกเป็น 3 เฟส เช่นกัน คือ น้ำมัน-น้ำ-น้ำมัน ดังนั้น เฟส I และ III จึงเป็นน้ำมัน ส่วนเฟส II เป็นน้ำ

กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชันมีขั้นตอนดังรูปที่ 2.3 ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543; อูรา ปานเจริญ, 2551)

- 1) การเตรียมอิมัลชัน (Emulsification)
- 2) การสกัดและการแยก (Extraction and stripping)
- 3) การแยกชั้น (Settling)
- 4) การทำให้อิมัลชันแตกชั้น (Demulsification)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการแยกด้วยเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชันและลักษณะของเฟสเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชันชนิดเยื่อแผ่นน้ำมัน (อุรา ปานเจริญ, 2551)

2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ (Supported liquid membrane: SLM)

เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ หมายถึง เยื่อแผ่นเหลวที่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวเป็นเฟสที่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary phase) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Immobilize liquid membrane (Schultz, 1988) สารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งคือสารสกัดจะถูกยึดตรึงไว้ในรูพรุนจุลภาค (Micro pore) ของเยื่อแผ่น (Solid membrane) ด้วยแรงคาпилลารี (Capillary force) และสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electron affinity) (Schultz, 1988; Huang, 1987) ตัวรองรับซึ่งยึดพุงเยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างเฟสของสารละลายป้อนและเฟสของสารละลายนำกลับ วัสดุที่ใช้ทำเป็นตัวรองรับแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มวัสดุอินทรีย์ ได้แก่ เซรามิก แก้ว เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) อนุพันธ์ของคาร์บอน (Derivative carbon) ออกไซด์ของอะลูมิเนียม ออกไซด์ของไทเทเนียม และอื่นๆ และกลุ่มวัสดุพอลิเมอร์ ได้แก่ Polysulfone (PSO), Poly(vinylidene fluoride) (PVDF) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) และอื่นๆ ส่วนใหญ่ตัวรองรับทำจากวัสดุพอลิเมอร์เนื่องจากพอลิเมอร์มีสมบัติทนต่อสารเคมีและความร้อน (อุรา ปานเจริญ, 2551) รูพรุนจุลภาคในตัวรองรับแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ รูพรุนจุลภาคที่ชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้เฟสที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติดอยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น และอีกชนิดคือรูพรุนจุลภาคที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้เฟสที่มีน้ำมันเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติดอยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น

ข้อดีของเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ (วิวัฒน์ บัตทวิคองคา, 2541; รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543; Ramakul, 2004)

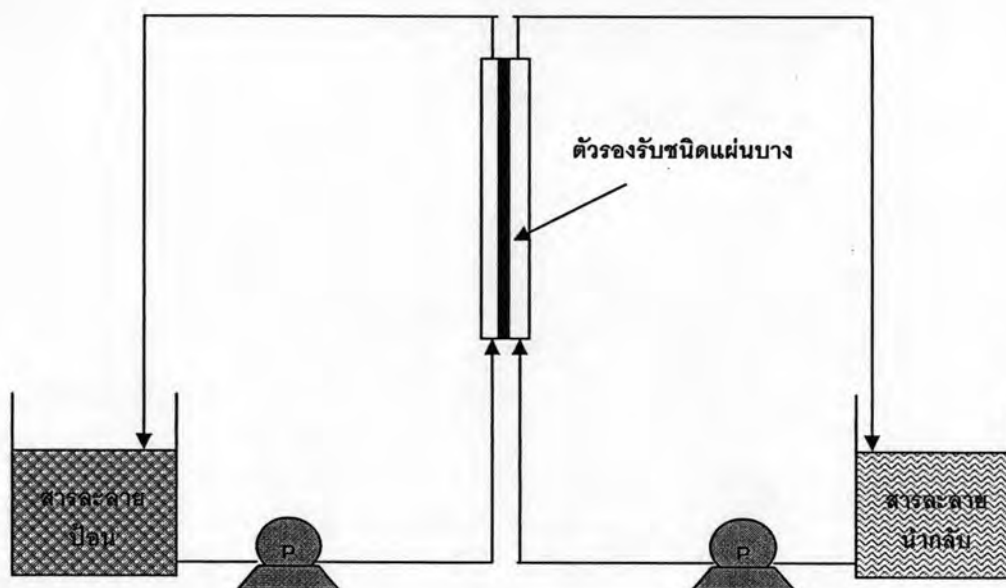
- มีเสถียรภาพสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน
- มีค่าแฟกเตอร์การแยก (Separation factor) สูง เพราะหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นตัวประสานให้ของเหลวที่ไม่ละลายกันเกิดเป็นอิมัลชัน เพราะสารลดแรงตึงผิวจะขวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวล
- มีค่าอัตราการถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- มีค่าการคัดเลือกสูง
- สามารถเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์
- ใช้สารสกัดในปริมาณน้อย
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับสูง
- สามารถดัดแปลงและขยายขนาดได้ง่าย

แม้ว่าเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับจะมีความเสถียรสูง แต่ข้อจำกัดคือไม่สามารถทนต่อความดันหรืออัตราการไหลที่สูงได้

ถ้าแบ่งเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับตามลักษณะของตัวรองรับจะแบ่งได้ 3 แบบ คือ ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat sheet) ตัวรองรับชนิดแผ่นม้วนหรือชนิดเกลียววน (Spiral wound) และตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow fiber)

2.1.2.1 ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat sheet)

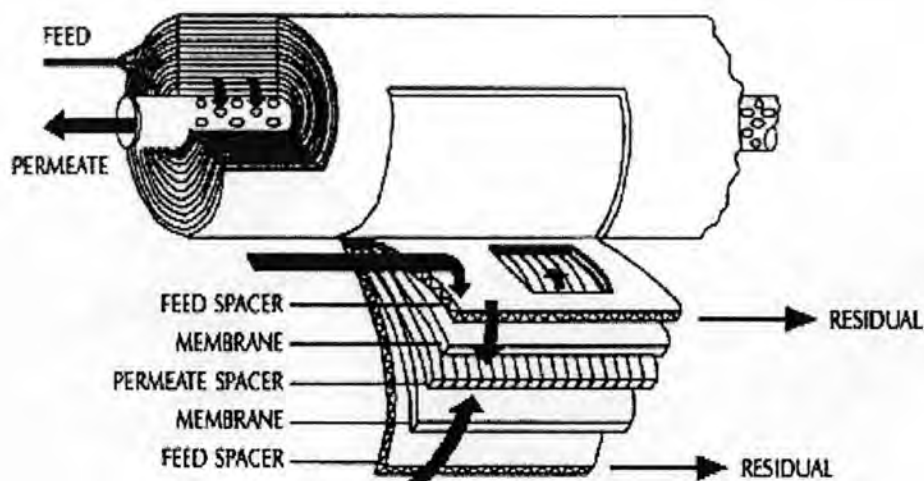
ตัวรองรับชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ มีรูพรุนขนาดเล็กมาก มีความพรุน (Porosity) สูง ทำให้พื้นที่ในการถ่ายเทมวลสูง แต่ยังน้อยกว่าเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับชนิดอื่น ตัวรองรับชนิดนี้ประกอบด้วย 3 เฟส คือ เฟสสารละลายป้อน เฟสเมมเบรน และเฟสสารละลายนำกลับ รูปที่ 2.4 แสดงระบบของเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับชนิดแผ่นบาง



รูปที่ 2.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง

2.1.2.2 ตัวรองรับชนิดแผ่นม้วนหรือชนิดเกลียววน (Spiral wound)

ตัวรองรับชนิดนี้พัฒนามาจากตัวรองรับชนิดแผ่นบางโดยการม้วนตัวรองรับเพื่อเพิ่มอัตราส่วนของพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตร และลดการตีทวนโดยเปลี่ยนทิศทางการไหลของสารละลายป้อนหรือสารละลายนำกลับที่ไหลในช่องระหว่างแผ่นกันกับเยื่อแผ่นเหลวให้ขนานไปกับผิวสัมผัสของตัวรองรับ แรงจากการไหลจึงไม่ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีอายุการใช้งานนานขึ้น (Masaaki, 1987; Schulz, 1988) ลักษณะของตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน

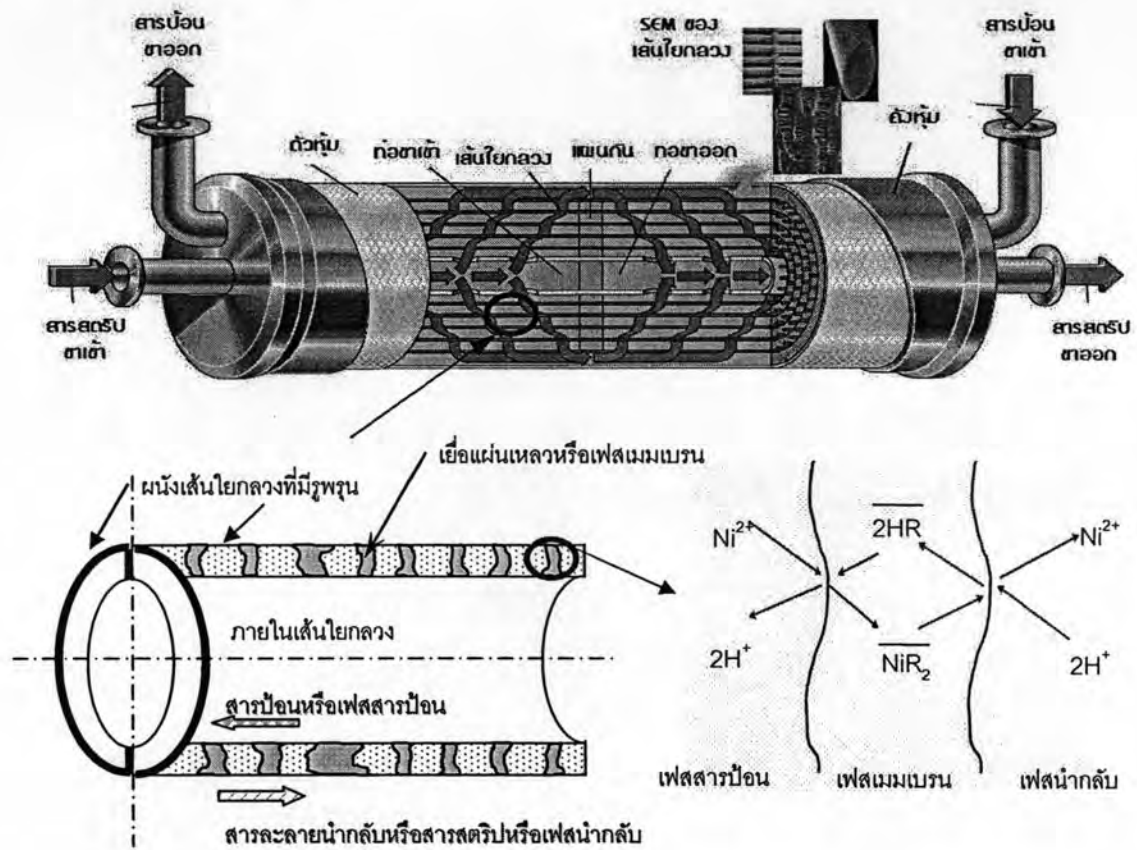
(www.kochmembrane.com/prod_spiral.html)

รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นม้วนดังรูปที่ 2.5 ประกอบด้วย แผ่นกั้น (Spacer) และเยื่อแผ่นเหลว (Membrane) ทั้งสองส่วนนี้จะหุ้มรอบท่อที่อยู่ตรงกลาง โดยสารละลายป้อนจะไหลผ่านเข้าทางช่องระหว่างแผ่นกั้นกับเยื่อแผ่นเหลว ส่วนสารละลายนำกลับจะไหลเข้าอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลว สุดท้ายสารละลายป้อนที่ได้สกัดไอออนโลหะแล้วจะไหลผ่านทางด้านขาออก เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ที่ใช้ในห้องทดลองส่วนใหญ่จะมีพื้นที่ของเยื่อแผ่นเหลว 0.2 ถึง 1.0 ตารางเมตร และที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีพื้นที่ของเยื่อแผ่นเหลว 1 ถึง 2 ตารางเมตร จุดเด่นของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ คือ มีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน

2.1.2.3 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow fiber)

ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นตัวรองรับอีกชนิดหนึ่ง que พัฒนามาจากตัวรองรับชนิดแผ่นบางให้เป็นเส้นใยกลวงขนาดเล็กจำนวนมากประกอบเป็นหน่วยเดียวกัน ทำให้มีอัตราส่วนของพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงส่วนใหญ่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ซึ่งมีความพรุนสูง รูปที่ 2.6 แสดงมอดูลของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับภายในเส้นใยกลวง และกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนนิกเกิล รูปพจนานุกรมของเส้นใยกลวงจะยึดพวงสารสกัดไว้ในเยื่อแผ่นเหลว โครงสร้างของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงถูกนำไปใช้สำหรับกับกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse osmosis) ซึ่งเป็นกระบวนการทำน้ำสะอาดที่แพร่หลายในปัจจุบัน (เอกพิชญ์ ทรงคุณ, 2548) เส้นใยกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับเส้นผมของมนุษย์คือ 80 μm และมีผนังท่อหนา

20 μm มอดูลของตัวรองรับชนิดนี้มีอัตราส่วนของพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูงกว่ามอดูลของตัวรองรับชนิดแผ่นบางและชนิดแผ่นม้วนที่มีขนาดมอดูลเท่ากัน ทำให้เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นที่นิยมใช้มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงยังมีข้อจำกัดคือสารละลายป้อนที่ไหลเข้ามาในมอดูลจะต้องไม่มีตะกอนหรือสิ่งแขวนลอยเพราะจะทำให้รูพรุนอุดตันได้ ดังนั้นถ้าสารละลายป้อนมีตะกอนหรือสิ่งแขวนลอยจึงต้องมีกระบวนการกรองแยกขั้นต้นก่อนส่งเข้าสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบมีชนิดเส้นใยกลวง (Tanigaki, 1988)



รูปที่ 2.6 เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงและกลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้น

(www.liqui-cel.com; ประกร รามกุล, 2544; DeKetelaere, 2004)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ (วีรวัดมน ปัททวิคงศา, 2542)

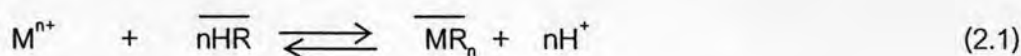
เยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - มีอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูงกว่า - มี capacity สูง - กระบวนการไม่ซับซ้อน 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารสกัดปริมาณสูงกว่า - ใช้พลังงานในการสกัดสูง - การใช้สารลดแรงตึงผิวจะขวางกั้นและต้านทานการถ่ายเทมวล 	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าการคัดเลือกสูง - ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว - ใช้สารสกัดปริมาณต่ำกว่า - ขยายขนาดง่าย - อัตราการถ่ายเทมวลสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - มีอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรต่ำกว่า - มีประสิทธิภาพต่ำกว่า - มีการสูญเสียเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากสารสกัดหลุดจากรูพรุน

2.2 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัดดังนี้

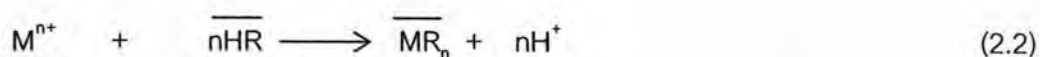
2.2.1 สารสกัดที่เป็นกรด

สารสกัดที่เป็นกรดใช้ในการสกัดสารละลายไอออนบวก สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทย่อย คือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractant) และสารสกัดชนิดคีเลต (Chelate extractant) สารสกัดชนิดกรดประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-\text{COOH}$, $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ เป็นต้น ส่วนสารสกัดชนิดคีเลตจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดที่เป็นกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในเฟสของสารละลายอินทรีย์หรือเฟสเยื่อแผ่นเหลวหรือเฟสเมมเบรน ดังสมการที่ 2.1

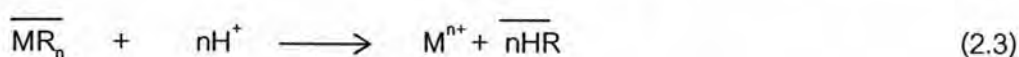


ปฏิกิริยาการสกัดเป็นปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้า (สมการที่ 2.2) ที่เกิดขึ้นระหว่าง M^{n+} คือ ไอออนโลหะที่ต้องการสกัดในเฟสสารละลายป้อนกับ $\overline{\text{HR}}$ คือ สารสกัดในเฟสเยื่อแผ่นเหลวหรือเฟส

เมมเบรนได้ \overline{MR}_n คือ สารประกอบเชิงซ้อนในเฟสเยื่อแผ่นเหลว (ในการวิจัยนี้ ได้แก่ \overline{NiR}_2) และ H^+ คือ ไอออนไฮโดรเนียมในเฟสสารละลายป้อน สารที่ขีดเส้นด้านบนหมายถึงสารที่อยู่ในเฟสเยื่อแผ่นเหลว ส่วนที่ไม่ได้ขีดเส้นด้านบนหมายถึงสารที่อยู่ในเฟสสารละลายป้อน



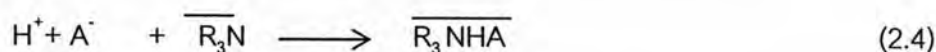
สารประกอบเชิงซ้อน \overline{MR}_n ในเฟสเยื่อแผ่นเหลวจะเคลื่อนที่ไปยังผิวสัมผัสระหว่างเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับเฟสน้ำกลับเพื่อเกิดปฏิกิริยากลับ (สมการที่ 2.3) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับกับไอออนไฮโดรเนียมจากสารละลายน้ำกลับที่เป็นกรด (ในการวิจัยนี้ ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟิวริก) ในเฟสน้ำกลับได้ไอออนโลหะประจุบวกในสารละลายน้ำกลับ และสารสกัดในเฟสเยื่อแผ่นเหลววนกลับไปสกัดไอออนโลหะ สารที่ขีดเส้นด้านบนหมายถึงสารที่อยู่ในเฟสเยื่อแผ่นเหลวหรือเฟสเมมเบรน ส่วนที่ไม่ได้ขีดเส้นด้านบนหมายถึงสารที่อยู่ในเฟสสารละลายน้ำกลับ



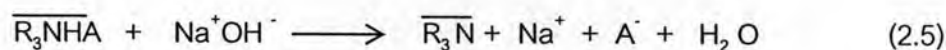
การแลกเปลี่ยนประจุบวกของไอออนโลหะกับไอออนไฮโดรเนียมเป็นการเคลื่อนที่แบบสวนทางกัน และเกิดการถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (Counter-transport mass transfer) สารสกัดชนิดกรดในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic acids) สารสกัดที่เป็นกรดที่นำมาใช้งานมากที่สุดคือ กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric acids) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (Di-2-ethylhexyl phosphoric acid, D2EHPA) และสารสกัดชนิดคีเลทที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดชนิดคีเลทเชิงพาณิชย์มี 2 ประเภท ได้แก่ (ก) กลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Cognis Ltd. ภายใต้ชื่อการค้า LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical Industries (Plc.) และสารสกัดชื่อการค้า SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemicals Ltd., USA (ข) กลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน (8-hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Co., USA) ภายใต้ชื่อการค้า Kelex มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาการสกัดไอออนนิกเกิล โคบอลต์ และทองแดงด้วยเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชันซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดคล้ายกับสมการที่ 2.1 โดยใช้สารสกัดที่เป็นกรดและมีการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกัน (Kasaini et al., 1998; Vande Voorde et al., 2004; Ramakul et al., 2004; Sengupta et al., 2006; Lurdes et al., 2007)

2.2.2 สารสกัดที่เป็นเบส

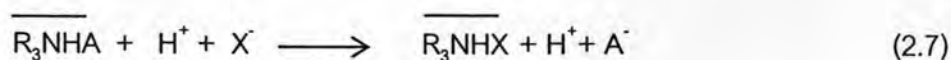
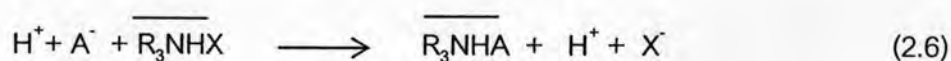
สารสกัดที่เป็นเบสส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบเอมีน (Amines) ที่มีมวลโมเลกุลสูง เช่น Primene IMT, Amberlite LA-2 และ Alamine 336 เป็นต้น สารสกัดเหล่านี้จะใช้สกัดไอออนโลหะจากสารละลายของกลุ่มไอออนที่มีประจุลบ เช่น ไอออนแคดเมียมไซยาเนต ($\text{Cd}(\text{CN})_4^{2-}$) และ ไอออนโครเมต (CrO_4^{2-}) (ไพศาล อภินพพัฒน์, 2541) ในกรณีที่ใช้สารสกัดที่เป็นเบส สารละลายนำกลับที่นิยมใช้จะเป็นสารละลายเบส ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ก็มีสารสกัดที่ใช้สารละลายนำกลับเป็นสารละลายกรด ปฏิกริยาการสกัดที่ใช้สารสกัดที่เป็นเบสและสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน (Co-transport mass transfer) ของไอออนไฮโดรเนียมและโลหะที่ต้องการสกัดในกลุ่มไอออนที่มีประจุลบกับสารสกัด และเกิดปฏิกริยาการสกัดดังสมการที่ 2.4 และปฏิกริยาการนำกลับดังสมการที่ 2.5 (รัตนจิระรัตนานนท์, 2543)



A^- คือ กลุ่มไอออนที่มีประจุลบประกอบด้วยโลหะที่ต้องการสกัดในเฟสสารละลายป้อน ส่วน $\overline{\text{R}_3\text{N}}$ และ $\overline{\text{R}_3\text{NHA}}$ คือ สารสกัดและสารประกอบเชิงซ้อนในเฟสเยื่อแผ่นเหลวหรือเฟสเมมเบรนตามลำดับ

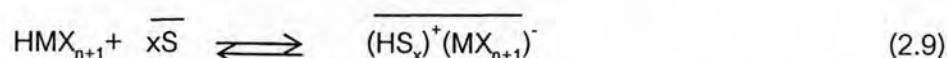


จากสมการที่ 2.5 สารประกอบเชิงซ้อนจะแตกตัวได้สารสกัด กลุ่มไอออนที่มีประจุลบ (A^-) และ ไอออนไฮโดรเนียมซึ่งจะทำปฏิกริยากับไอออนไฮดรอกไซด์ในสารละลายนำกลับได้น้ำ สารสกัดที่ได้จะวนกลับไปสกัดไอออนโลหะ สำหรับปฏิกริยาการสกัดที่ใช้สารสกัดที่เป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นกลาง เช่น โซเดียมคลอไรด์ หรือสารละลายนำกลับที่เป็นกรดจะเกิดการถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวกัน (Counter-transport mass transfer) ปฏิกริยาการสกัดและปฏิกริยาการนำกลับแสดงดังสมการที่ 2.6 – 2.7



2.2.3 สารสกัดที่เป็นกลาง

สารสกัดที่เป็นกลาง (Neutral extractant) หรือชนิดโซลเวท (Solvating extractant) เช่น Tri-n-butylphosphate (TBP) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะดอนเนอร์กรุ๊ปจึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล สารสกัดที่เป็นกลางใช้สกัดโลหะที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่มีประจุ หรือใช้สกัดไอออนบวก-ลบที่รวมกันอยู่ในเฟสสารละลายป้อน ไอออนโลหะในเฟสของสารละลายป้อนจะถูกสกัดและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของไอออนโลหะในการที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในเฟสสารละลายป้อนเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดที่เป็นเบส สารสกัดจะรวมตัวกับไอออนโลหะในสารประกอบเชิงซ้อนของสารละลายป้อน ดังสมการที่ 2.8 หรือรวมตัวกับโปรตอนในสารประกอบเชิงซ้อนของสารละลายป้อนและเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังสมการที่ 2.9



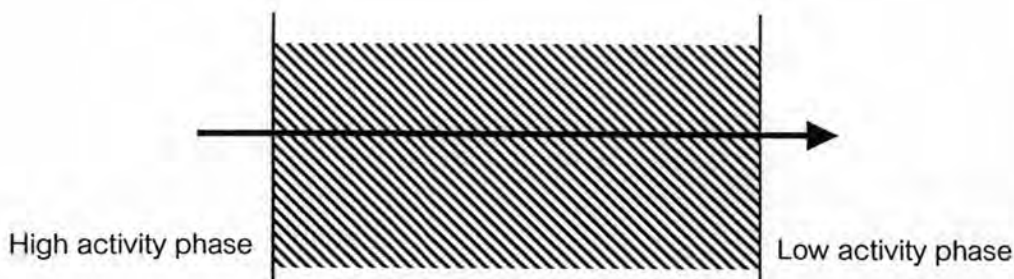
เมื่อ S เป็นสารสกัดที่เป็นกลาง ปฏิกิริยาการสกัดเป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้า ส่วนปฏิกิริยาการนำกลับเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ

2.3 การถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวลสารในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกได้ 2 ประเภท (สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์, 2544; Baker, 2004)

2.3.1 การถ่ายเทมวลแบบพาสซีฟ (Passive mass transfer)

เป็นการถ่ายเทมวลที่เกิดภายใต้แรงขับเคลื่อนโดยไม่มีสารสกัดหรือตัวพา (Carrier) ซึ่งแรงขับเคลื่อนใหญ่มาจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสสารละลายป้อนกับเฟสเยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นค่าการเลือกผ่าน (Selectivity) จึงขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะในสารละลายป้อนและสารละลายเยื่อแผ่นเหลว การถ่ายเทมวลแบบนี้เกิดช้า มีค่าฟลักซ์ต่ำ จึงไม่นิยมในการนำไปใช้งาน รูปที่ 2.7 แสดงการถ่ายเทมวลแบบพาสซีฟ



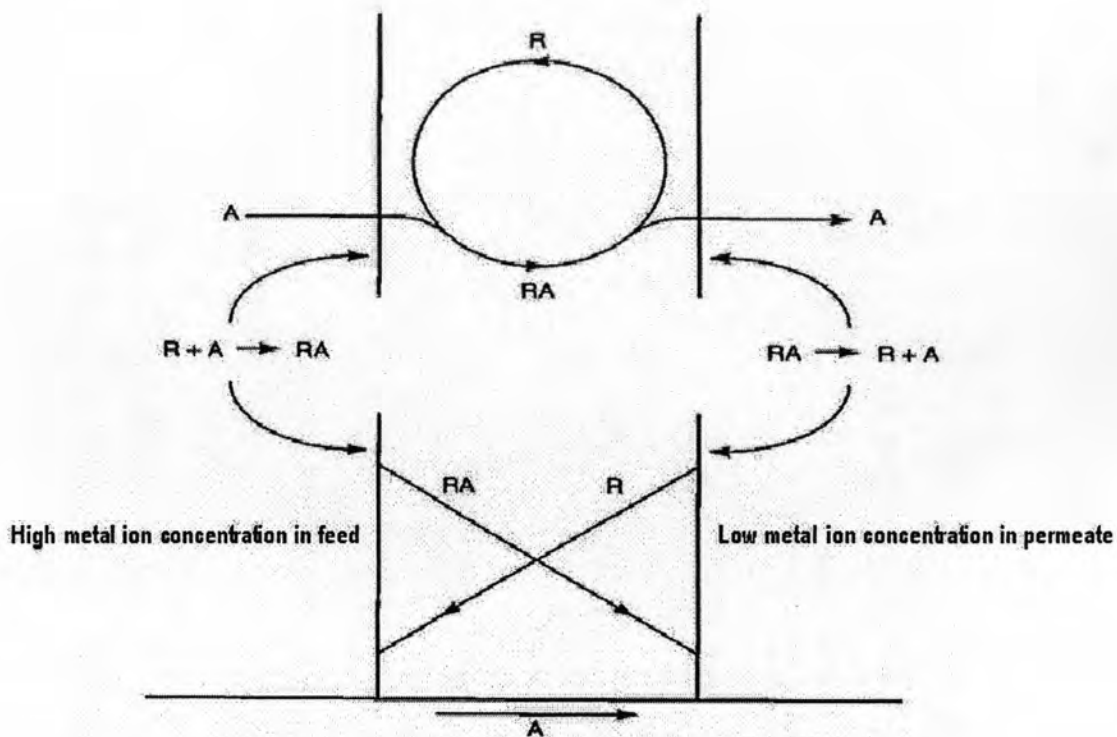
รูปที่ 2.7 การถ่ายเทมวลแบบพาสซีฟ (Baker, 2004)

2.3.2 การถ่ายเทมวลแบบมีสารสกัดหรือตัวพา (Carrier-mediated mass transfer)

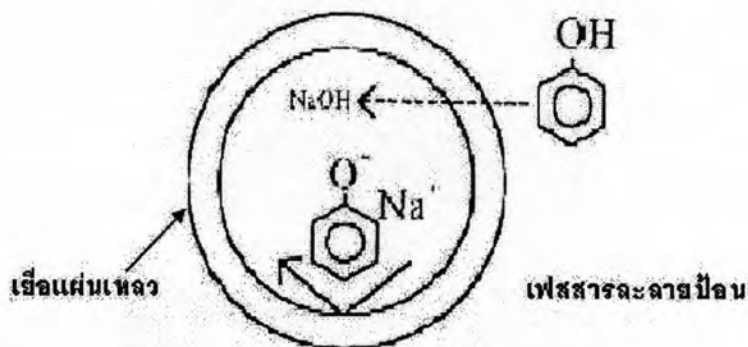
การถ่ายเทมวลแบบนี้โดยมากสารสกัดจะเป็นพวกสารอินทรีย์ สารสกัดจะเกิดปฏิกิริยากับไอออนโลหะที่ต้องการจะแยกได้สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะและพาสารประกอบเชิงซ้อนเคลื่อนที่ผ่านเฟสเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายอินทรีย์ด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสสารละลายป้อนกับเฟสเยื่อแผ่นเหลว การถ่ายเทมวลแบบนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือการถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเทท (Facilitated mass transfer) และการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (Coupled mass transfer)

2.3.2.1 การถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเทท

สารสกัดหรือตัวพาที่อยู่เฟสเยื่อแผ่นเหลวหรือเฟสเมมเบรนจะสกัดไอออนโลหะในเฟสสารละลายป้อนได้สารประกอบเชิงซ้อน จากนั้นจะอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะในเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับเฟสน้ำกลับ (Stripping phase) ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะแพร่ผ่านเฟสเยื่อแผ่นเหลว ปฏิกิริยาการนำกลับระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะกับสารละลายนำกลับจะเกิดที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับเฟสน้ำกลับได้ไอออนโลหะในเฟสน้ำกลับ ดังรูปที่ 2.8 ส่วนรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเททในการสกัดฟีนอลออกจากน้ำทิ้ง จากรูปน้ำทิ้งเป็นเฟสสารละลายป้อน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเฟสน้ำกลับ เฟสเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิว สารสกัด และตัวทำละลาย ฟีนอลในน้ำทิ้งจะเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดได้สารประกอบเชิงซ้อนของฟีนอลและจะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้สารละลายโซเดียมฟีนอลเลทซึ่งไม่สามารถละลายกับเฟสเยื่อแผ่นเหลวในเฟสน้ำกลับ



รูปที่ 2.8 การถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเทท (Baker, 2004)



รูปที่ 2.9 การถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเททในการสกัดฟีนอลออกจากน้ำทิ้ง
(รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

2.3.2.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่

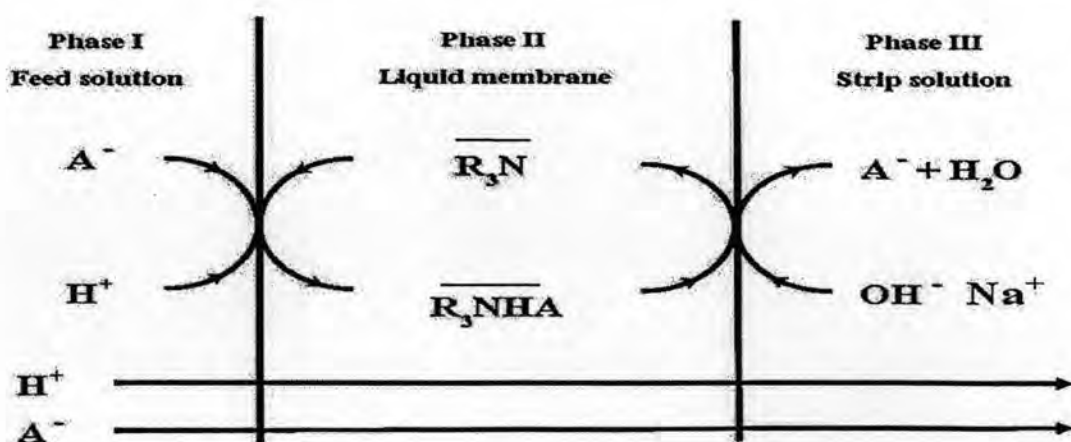
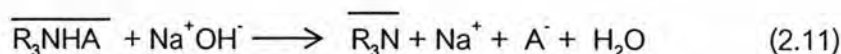
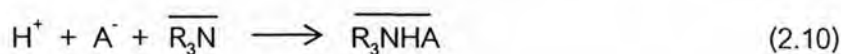
การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ คือ การถ่ายเทมวลที่การเคลื่อนที่ของไอออนโลหะที่ต้องการสกัดในเฟสสารละลายป้อนไปเฟสสารนำกลับเกิดพร้อมกับการเคลื่อนที่ของไอออนไฮโดรเนียมจากสารละลายป้อนในทิศทางเดียวกับไอออนโลหะคือจากเฟสสารละลายป้อนไปเฟสนำกลับ เรียกว่า การถ่ายเทมวลควบคู่แบบไปทางเดียวกัน (Co-transport mass transfer) หรือการเคลื่อนที่ของไอออนไฮโดรเนียมจากสารละลายนำกลับในทิศสวนทางกับไอออนโลหะคือจาก

เฟสนำกลับไปเฟสสารละลายป้อน เรียกว่า การถ่ายเทมวลควบคุมแบบสวนทาง (Counter-transport mass transfer)

ข้อดีของการถ่ายเทมวลแบบควบคุมคือเกิดการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นได้เร็ว ไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันสูง จึงไม่ทำให้เฟสเยื่อแผ่นเหลวหรือเฟสเมมเบรนเสียหาย และที่สำคัญสามารถสกัดไอออนโลหะจากเฟสสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นของไอออนโลหะน้อยๆ ได้ดี (Porter, 1990) การถ่ายเทมวลแบบควบคุมมี 2 ลักษณะ (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543; Baker, 2004) คือ

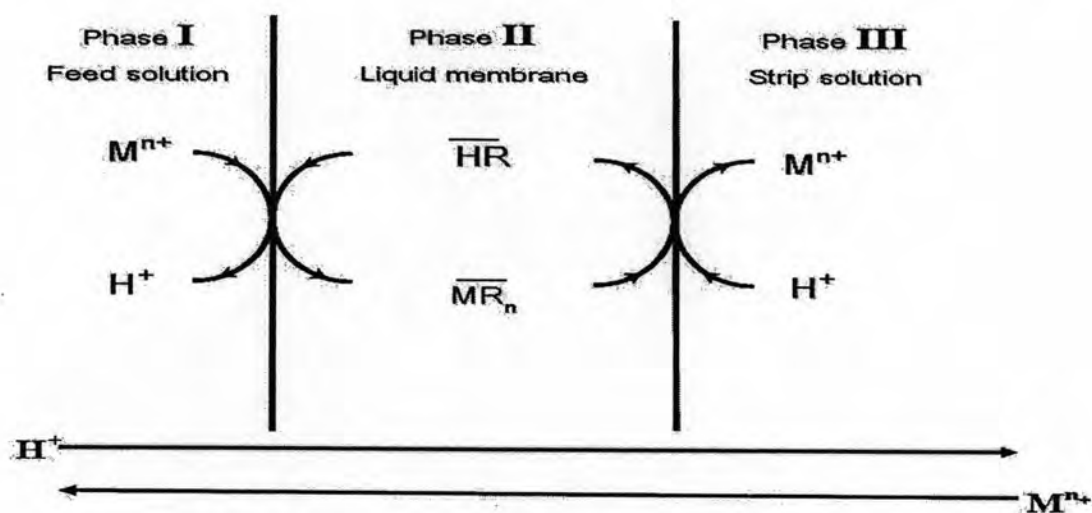
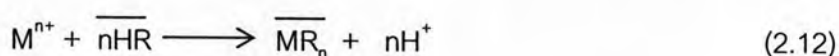
1) การถ่ายเทมวลควบคุมแบบไปทางเดียวกัน

การถ่ายเทมวลแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อใช้สารสกัดที่เป็นเบสหรือสารสกัดที่เป็นกลาง ทั้งไอออนโลหะที่อยู่ในกลุ่มไอออนที่มีประจุลบ A^- และไอออนไฮโดรเนียม H^+ ที่อยู่ในเฟสสารละลายป้อนจะเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันไปยังเฟสเยื่อแผ่นเหลวเพื่อทำปฏิกิริยากับสารสกัด R_3N ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน R_3NHA ในเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ 2.10 และจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปผิวสัมผัสระหว่างเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับเฟสนำกลับด้วยผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนในเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับเฟสสารนำกลับเป็นแรงขับ และทำปฏิกิริยากับสารนำกลับที่เป็นเบส เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้สารสกัด R_3N กลุ่มไอออนที่มีประจุลบในสารละลายนำกลับ และน้ำ ดังสมการที่ 2.11 สารสกัดสามารถวนกลับมาสกัดไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนได้อีก ดังรูปที่ 2.10



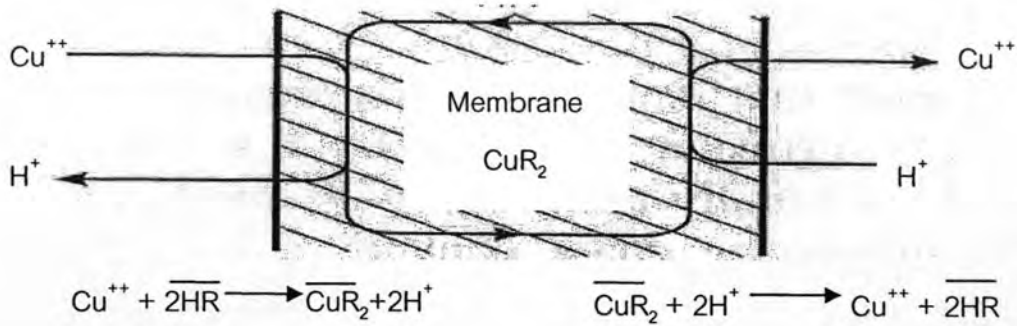
รูปที่ 2.10 การถ่ายเทมวลควบคุมแบบไปทางเดียวกัน (Baker, 2004)

2) การถ่ายเทมวลควบคู่แบบสวนทางในการถ่ายเทมวลแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อใช้สารสกัดที่เป็นกรด \overline{HR} ที่อยู่ในเฟสเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะ M^{n+} ที่อยู่ในเฟสสารละลายป้อนได้สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะ \overline{MR}_n ในเฟสเยื่อแผ่นเหลวและไอออนไฮโดรเนียมในเฟสสารละลายป้อน ดังสมการที่ 2.12 (Ramakul, 2004) ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับเฟสน้ำกลับด้วยผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนในเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับเฟสน้ำกลับเป็นแรงขับ และทำปฏิกิริยาการนำกลับกับสารละลายน้ำกลับที่เป็นกรดได้ไอออนโลหะและสารสกัดดังสมการที่ 2.13 สารสกัดสามารถวนกลับมาสกัดไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนได้อีก ไอออนโลหะจะเคลื่อนที่สวนทางกับไอออนไฮโดรเนียม ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การถ่ายเทมวลควบคู่แบบสวนทาง (Baker, 2004)

ตัวอย่างการถ่ายเทมวลควบคู่แบบสวนทางของการสกัดไอออนทองแดงด้วยสารสกัดและสารละลายน้ำกลับที่เป็นกรดแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การถ่ายเทมวลแบบฟาซิลิเททและแบบควบคู่ (Baker, 2004)

2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient: P)

สมการของการซึมผ่านของไอออนโลหะจากเฟสสารละลายป้อนไปเฟสเยื่อแผ่นเหลวใช้สมมติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Distribution coefficient) ของไอออนโลหะในเฟสสารละลายป้อนไปยังเฟสเยื่อแผ่นเหลวมากกว่าจากเฟสเยื่อแผ่นเหลวไปยังเฟสน้ำกลับ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) ใช้สมการที่ 2.14

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

โดยที่ $\phi = \frac{Q_f}{PL\varepsilon\pi Nr_i}$

A	=	พื้นที่การถ่ายเทมวล
C_f และ $C_{f,0}$	=	ความเข้มข้นของไอออนที่เวลา t และที่เวลาเริ่มต้น
L	=	ความยาวของเส้นใยกลวง
N	=	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล
Q_f	=	อัตราการไหลของสารละลายป้อนในฝั่งท่อ
r_i	=	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง
V_f	=	ปริมาตรของสารละลายป้อน
ε	=	ความพรุนของเส้นใยกลวง

สร้างกราฟระหว่าง $-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right)$ กับเวลา (t) จะได้กราฟเป็นเส้นตรง ความชันของกราฟเท่ากับ $AP \frac{\phi}{\phi+1}$ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จากความชันของกราฟ

2.5 กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรีดเย็น

ขั้นตอนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม หรือเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรีดเย็น (Cold-rolled plate stainless steel) มีดังนี้

1) วัตถุดิบคือเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนที่เรียกว่า "คอยล์ดำ (Black coil)" จะถูกปรับสมบัติให้เหมาะสมด้วยการอบอ่อน สำหรับการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดเฟอร์ริติก (Ferritic) จะอบในเตาอบแบบกะ (Batch annealing furnace) และการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic) จะผ่านกระบวนการอบแบบต่อเนื่อง (Annealing furnace) เมื่ออบอ่อนเสร็จแล้วจะนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมากำจัดออกไซด์ที่ผิวด้วยการกัดกรด (Pickling) ชนิดของกรดที่ใช้ในแต่ละอย่างจะแตกต่างกัน จากรูปที่ 2.13 หมายเลข 1 และ 3 ใช้กรดซัลฟิวริกสำหรับกระบวนการอิเล็กโตรไลติก หมายเลข 2 และ 4 ใช้กรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดไนตริก

2) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดร้อนที่ปรับสมบัติและทำความสะอาดจากขั้นตอนแรกแล้ว จะถูกรีดเย็นโดยใช้แรงกดทับของลูกกลิ้ง 10 คู่ เพื่อลดขนาดความหนาตามที่ลูกค้าต้องการ

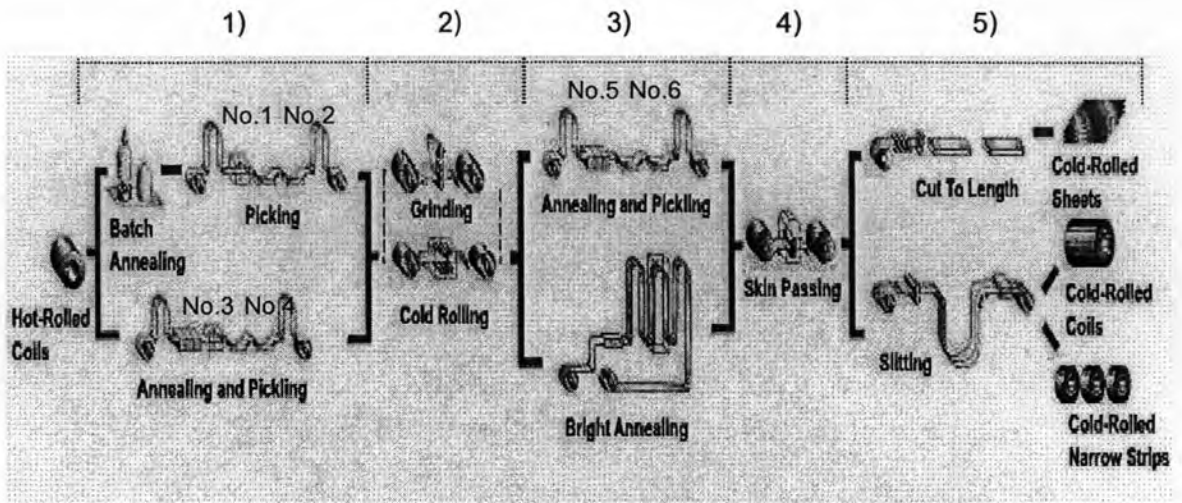
3) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นที่รีดลดขนาดความหนาแล้ว จะถูกนำไปอบอ่อนเพื่อทำให้นิ่มลงเพื่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ การอบอ่อนแบ่งเป็น 2 วิธี

วิธีที่หนึ่ง คือ การอบอ่อนในบรรยากาศ หลังจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมออกมาจากเตาอบต้องผ่านการกัดกรดเพื่อทำความสะอาดผิวหรือกำจัดออกไซด์ที่ผิว ซึ่งการกัดกรดในกระบวนการนี้ใช้สารละลายไฮเดียมซัลเฟตในอ่างหมายเลข 5 และใช้กรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับกรดไนตริกในอ่างหมายเลข 6

วิธีที่สอง ล้างน้ำมันที่ติดมาจากขั้นตอนที่สองในรูปที่ 2.13 ออกก่อน แล้วอบอ่อนในเตาอบโดยใช้พลังงานไฟฟ้าในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน ทำให้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมไม่เกิดออกไซด์ที่ผิวโลหะจึงไม่จำเป็นต้องผ่านการกัดกรด

4) หลังการรีดเย็นและปรับสมบัติให้เหมาะสมด้วยการอบอ่อนแล้ว แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจะถูกนำมาปรับความเรียบและความเงา (Skin passing) อีกครั้งเพื่อป้องกันรอยย่นจากการขึ้นรูป

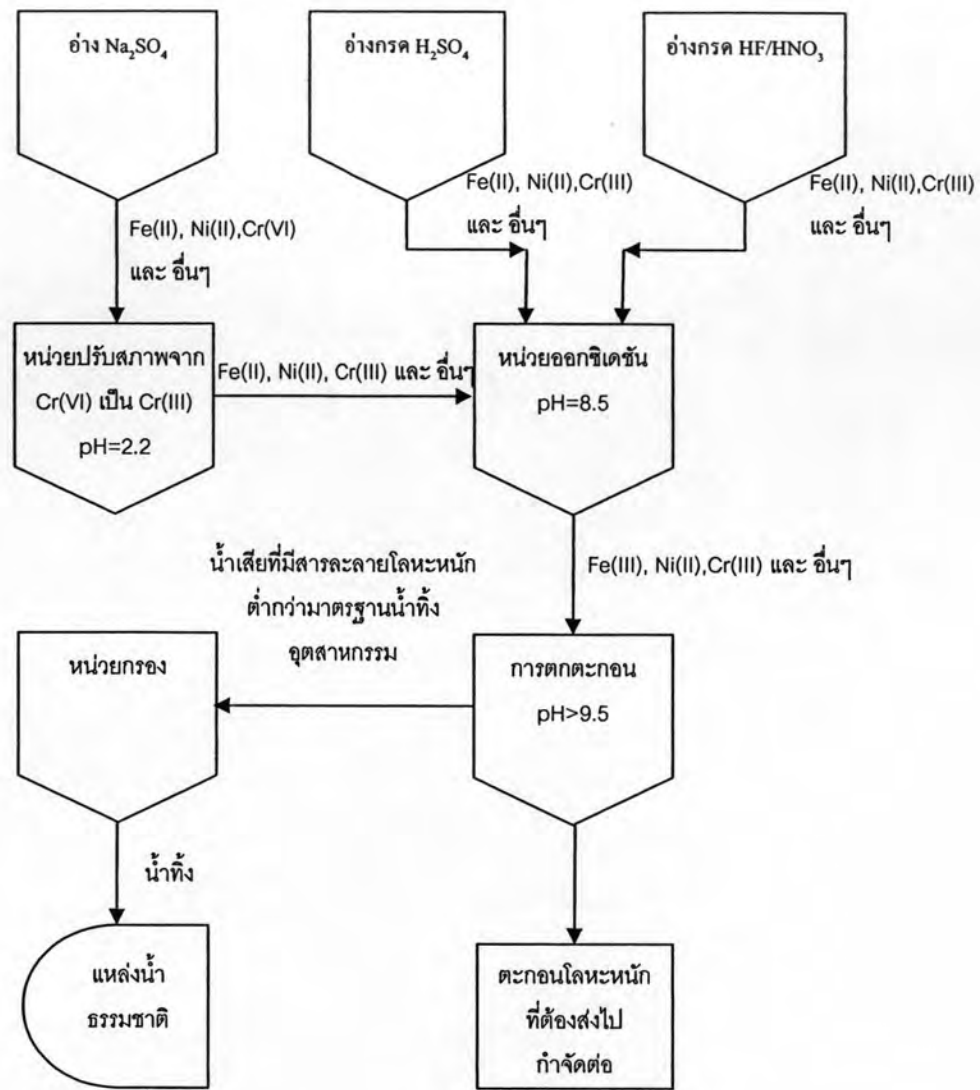
5) นำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมาตัดเป็นแผ่น (Cut to length) หรือนำมาตัดเป็นแถบ (Slitting line) แบบชนิดม้วนหน้าแคบหรือชนิดม้วนหน้ากว้างเพื่อส่งจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 2.13 กระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดรีดเย็น (www.thainox.co.th)

2.6 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น

น้ำเสียส่วนใหญ่ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นเกิดจากกระบวนการกัดกรด ซึ่งการกัดกรดจะใช้สารละลาย 3 ประเภท คือ สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายกรดไนตริกผสมกับกรดไฮโดรฟลูออริก และสารละลายโซเดียมซัลเฟต น้ำเสียจากการกัดกรดจะมีองค์ประกอบโลหะหนักหลายชนิด องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ไอออนเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการกัดกรดของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการกักกรด
ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็น

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการกักกรดของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมรีดเย็นมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) น้ำเสียจากอ่างสารละลายไฮเดียมซัลเฟตมีองค์ประกอบหลักของน้ำเสีย คือ ไอออนเหล็ก โครเมียม และ นิกเกิล ซึ่งไอออนโครเมียมจะอยู่ในรูปของโครเมียม (VI) ที่มีความเป็นพิษสูง จึงต้องผ่านหน่วยปรับสภาพเปลี่ยนโครเมียม (VI) ไปเป็นโครเมียม (III) ที่มีความเสถียรสูงและเป็นอันตรายน้อยกว่าโดยการใส่ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ และควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2.2 สำหรับน้ำเสียที่มาจากอ่างสารละลายกรดซัลฟิวริก และอ่างสารละลายกรดไนตริกผสมกับกรดไฮโดรฟลูออริก ไอออนโครเมียมจะอยู่ในรูปของโครเมียม (III) จึงไม่จำเป็นต้องเข้าหน่วยปรับสภาพนี้

2) ขั้นตอนการออกซิเดชันโดยใช้การเป่าอากาศ เพื่อเปลี่ยนไอออนเหล็กเฟอร์รัสไปเป็นไอออนเหล็กเฟอร์ริกที่มีความเสถียรและตกตะกอนง่ายกว่า ซึ่งขั้นตอนนี้จะควบคุมความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 8.5

3) น้ำเสียที่ผ่านหน่วยออกซิเดชันแล้วจะนำไปตกตะกอนในสภาพเบสโดยการใส่แคลเซียมคาร์บอเนตและใส่สารจำพวกพอลิเมอร์เพื่อช่วยเร่งการตกตะกอน

4) ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการกรองน้ำเสียก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ต้องมีความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากชวงขาออกของหน่วยปรับสภาพเปลี่ยนโครเมียม (VI) ไปเป็นโครเมียม (III) มีความเข้มข้นของสารละลายไอออนนิกเกิลสูงประมาณ 90 ppm และเนื่องจากในขั้นตอนนี้ควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2.2 ดังนั้นน้ำเสียในส่วนนี้จึงไม่มีตะกอนของโลหะหนักทำให้ไม่จำเป็นต้องกรองก่อนป้อนเข้ามอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวส่วนมากจะใช้สารละลายป้อนจากการสังเคราะห์หรือเป็นการจำลองกระบวนการ มีจำนวนน้อยที่ศึกษากับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยสรุปมีดังนี้

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

Youn et al. (1997)

ศึกษาการสกัดไอออนนิกเกิลและโคบอลต์ในสารละลายซัลเฟตโดยเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับชนิดแผ่นบาง ใช้สารสกัด HEH(EHP) ความเข้มข้น 50 wt% ละลายในเคโรซีน และสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 3 N เป็นสารละลายนำกลับ สารละลายป้อน คือ สารละลายองค์ประกอบเดียว (Single component) ของไอออนนิกเกิลและโคบอลต์ที่มีความเข้มข้นอย่างละ 85 mol/m^3 พบว่าฟลักซ์การถ่ายเทมวลของไอออนนิกเกิลและโคบอลต์เท่ากับ $2 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2 \text{ s}$ และ $6 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2 \text{ s}$ ตามลำดับ แต่เมื่อใช้สารละลายผสมของไอออนนิกเกิลและโคบอลต์ (Mixed component) ที่มีความเข้มข้นของแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 85 mol/m^3 เป็นสารละลายป้อนพบว่าค่าฟลักซ์การถ่ายเทมวลของไอออนนิกเกิลและโคบอลต์ลดลงเป็น $1 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2 \text{ s}$ และ $9 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2 \text{ s}$ ตามลำดับ กล่าวได้ว่าสารสกัด HEH(EHP) สามารถสกัดไอออนโคบอลต์ได้ดีกว่าไอออนนิกเกิล และความสามารถในการสกัดจะลดลงเมื่อในสารละลายป้อนมีหลายองค์ประกอบ งานวิจัยนี้ยังศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนและ

ความเข้มข้นของสารสกัด พบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนระหว่าง 1-3 และ ความเข้มข้นของสารสกัดระหว่าง 15-70 wt% ความสามารถในการสกัดสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 70 wt% ความสามารถในการสกัดจะลดลง

Longquan et al. (1997)

ศึกษาการสกัดไอออนโคบอลต์ออกจากสารละลายผสมของไอออนโคบอลต์และนิกเกิลที่มีปริมาณไอออนโคบอลต์และนิกเกิลเท่ากันในรูปของซัลเฟตโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวของอิมัลชัน (ELM) จากการศึกษาพบว่าสารสกัด P 204 ความเข้มข้น 5% (v/v) และ L113A ความเข้มข้น 5% (v/v) ในสารละลายเคโรซีน ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนช่วง 4.4-5.2 มีประสิทธิภาพในการสกัดใกล้เคียงกัน โดยสกัดไอออนโคบอลต์ได้ประมาณ 95 % และไอออนนิกเกิลได้ 8% จากความเข้มข้นเริ่มต้นในเวลา 20 นาที

Parija et al. (1998)

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกไอออนนิกเกิลความเข้มข้น 20 kg/m^3 ที่อยู่ในสารละลายแอมโมเนียโดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน ใช้สารสกัด LIX 84-I ละลายในเคโรซีน และสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายนำกลับ พบว่าเมื่อใช้สารสกัด LIX 84-I ความเข้มข้น 40 % vol และค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ 7-8 จะได้ประสิทธิภาพการสกัดสูงที่สุดถึง 99%

Chakraborty et al. (2003)

ศึกษาอัตราการถ่ายเทมวลในการสกัดไอออนนิกเกิลความเข้มข้น 300 ppm ในรูปของสารประกอบซัลเฟตโดยใช้เยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน ใช้สารสกัด di- (2-ethylhexyl) phosphoric acid หรือชื่อทางการค้าคือ D2EHPA ความเข้มข้น 5% (v/v) และใส่สารลดแรงตึงผิว span 5% (v/v) ละลายใน n-heptane พบว่าเมื่อทำให้ฟองอิมัลชันแตกตัวด้วยความเร็วในการปั่นกวนสูง จะเกิดพื้นที่ผิวในการสัมผัสมากขึ้นและเกิดการถ่ายเทมวลได้ดี แต่เมื่อเวลาผ่านไปฟองอิมัลชันจะเคลื่อนที่มารวมกันเป็นฟองอิมัลชันขนาดใหญ่ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทมวลจึงลดลง

Heckley and Ibane (2003)

ศึกษาการสกัดไอออนนิกเกิลและโคบอลต์ออกจากสารละลายผสมของไอออนโคบอลต์และนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเท่ากันอย่างละ 1,000 ppm ด้วยเทคนิคเยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิต (Electrostatic pseudo liquid membrane: ESPLM) ใช้สารสกัด Cyanex 272 ความเข้มข้น 10 % (v/v) ละลายในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายนำกลับ พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนแต่ยังอยู่ในช่วงของความเป็นกรด จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดดีขึ้น แต่เมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 5.5 จะไม่สามารถสกัดต่อได้ ในงานวิจัยนี้ได้ประสิทธิภาพการสกัดเกือบ 100 % นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยของอัตราการไหลของสารละลายป้อนในช่วง 60-140 ml/h และสารละลายนำกลับ

ในช่วง 13-25 ml/h พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อนหรือลดอัตราการไหลของสารละลายนำกลับประสิทธิภาพในการสกัดจะลดลง

Kumbasar and Kasap (2008)

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดไอออนนิกเกิลออกจากสารละลายผสมของไอออนโคบอลต์และนิกเกิลในสารละลายแอมโมเนียโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน ใช้สารสกัด 8-HQ สารลดแรงตึงผิวเป็น ECA 4360 พบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 10 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดสามารถสกัดไอออนนิกเกิลได้มากขึ้น และคงที่หลังจากความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 1 wt% นอกจากนี้ยังศึกษาชนิดของตัวทำละลายสารสกัด ได้แก่ เครโซลีน Escaid 100, Escaid 200 ไชลีน และทอลูอีน พบว่าเครโซลีนมีความเหมาะสมที่สุด

2.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะหนักและไอออนนิกเกิลโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

Breembroek et al. (1998)

ศึกษาการถ่ายเทมวลในรูปของค่าการซึมผ่านโดยการสกัดไอออนของโลหะทองแดงแคดเมียมและตะกั่วในสารละลายคลอไรด์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้ LIX 84-I ในการสกัดไอออนทองแดง และ Alamine 804-I สกัดไอออนแคดเมียมและตะกั่ว พบว่าค่าการซึมผ่านจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มระหว่างเฟสของสารละลายป้อนและเฟสของสารสกัด ผลการทดลองพบว่าค่าการซึมผ่านของไอออนทองแดงเท่ากับ 6.9×10^{-6} m/s ที่ความเข้มข้นของ LIX 84-I 0.6 M อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 ml/min สำหรับค่าการซึมผ่านของไอออนแคดเมียมเท่ากับ 4.0×10^{-6} m/s ที่ความเข้มข้นของ Alamine 804-I 0.2 M และค่าการซึมผ่านของไอออนตะกั่วเท่ากับ 2.0×10^{-7} m/s ที่ความเข้มข้นของ Alamine 804-I 0.5 M เมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากันคือ 100 ml/min ค่าการซึมผ่านของไอออนตะกั่วน้อยกว่าของไอออนแคดเมียมถึง 20 เท่า แสดงว่า Alamine 804-I ที่ใช้สกัดมีค่าแอฟฟินิตีสำหรับตะกั่วต่ำ ทั้งนี้ค่าการซึมผ่านของไอออนโลหะจากสารละลายคลอไรด์จะถูกจำกัดด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว และจะสูงขึ้นเมื่อสารละลายคลอไรด์มีกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟิวริกผสมอยู่ กรณีที่สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านท่อจะมีค่าการซึมผ่านของไอออนโลหะมากกว่ากรณีที่สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านเปลือกเนื่องจากสารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านท่อจะสามารถสัมผัสพื้นที่การถ่ายเทมวลได้มากกว่าการที่สารละลายป้อนไหลเข้าทางด้านเปลือก

ไพศาล อภินหัทธน์ (2541)

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดแยกและการนำกลับของโครเมียม (VI) ในรูปของโครเมตโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงใช้สารสกัด Aliquat ความเข้มข้น 1% (v/v)

ในตัวทำละลายโครซีน และสารละลายนำกลับเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 mol/l พบว่าเมื่อความเป็นกรด-เบส ลดต่ำลง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ลดต่ำลงจะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดดีขึ้น ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ 3-4 มีประสิทธิภาพในการสกัดมากที่สุด ในการทดลองนี้สามารถสกัดไอออนโครเมียม (VI) ได้ 90%

อิสรา เกษมเศรษฐ (2541)

ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกรสกัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด ชนิดของสารสกัดซึ่งได้แก่ สารสกัด D2EHPA, LIX84-I และ LIX860-I ละลายในโครซีน ความเข้มข้นไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ช่วง 1 ppm ถึง 100 ppm โดยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 M เป็นสารละลายนำกลับ พบว่าสารสกัด LIX84-I และ LIX860-I สามารถถ่ายเทไอออนทองแดงได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ประสิทธิภาพการสกัดไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในเฟสเยื่อแผ่นเหลว ความสามารถในการถ่ายเทไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในเฟสสารละลายป้อน

วีรวัฒน์ ปัตทวิคองคา (2542)

ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ของกรดอะซิติกกับโซเดียมอะซิเตตที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนของสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโครซีน สารละลายป้อนเป็นสารละลายไอออนสังกะสีความเข้มข้น 100 ppm และสารละลายนำกลับเป็นสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 M พบว่าความเข้มข้นของสารสกัด 0.9 % vol โดยไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์ในสารละลายป้อนจะให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงที่สุด แต่เมื่อใส่สารละลายบัฟเฟอร์ในสารละลายป้อนจะใช้สารสกัดเข้มข้น 0.5 % vol ซึ่งจะได้ประสิทธิภาพเท่ากับการไม่ใส่สารละลายบัฟเฟอร์ในสารละลายป้อน อัตราส่วนระหว่างสารละลายบัฟเฟอร์ต่อสารละลายป้อน ที่เหมาะสมเท่ากับ 1:50 และอัตราการไหลสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับลดลง อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้เท่ากับ 100 ml/min

Yang and Cussler (1999)

ศึกษาการสกัดไอออนนิกเกิลและทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้สารสกัดเป็น HDEHP (di- (2-ethylhexyl) phosphoric acid) ความเข้มข้น 10% (v/v) ในตัวทำละลายโครซีน โดยสังเคราะห์สารละลายป้อนที่มีไอออนนิกเกิลและไอออนทองแดงอยู่ในรูปของไนเตรต ในการเตรียมสารละลายองค์ประกอบเดียว ไอออนนิกเกิลและทองแดงมีความเข้มข้นอย่างละ 1.0 g/l และเมื่อเตรียมสารละลายที่มีนิกเกิลและทองแดงรวมอยู่ด้วยกันมีความเข้มข้นนิกเกิลและทองแดงอย่างละ 0.5 g/l ปรากฏว่าทั้งไอออนนิกเกิลและไอออนทองแดงจะถูกสกัด

ออกมาในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน และค่าความเป็นกรด-เบสที่ทำให้เกิดการสกัดมากที่สุดอยู่ที่ช่วงระหว่าง 4-4.5 เเปอร์เซ็นต์ ผลการสกัดด้วยสารละลายองค์ประกอบเดียวกับสารละลายที่มีนิกเกิลและทองแดงรวมอยู่ด้วยกันไม่ต่างกัน ประสิทธิภาพในการสกัดไอออนนิกเกิลและทองแดงใกล้เคียงกันประมาณ 90 %

Van de Voorde et al. (2004)

ศึกษาการสกัดไอออนโลหะนิกเกิลเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่โดยเยื่อแผ่นเหลวของอิมัลชันแบบแผ่นบาง และแบบพุงด้วยเส้นใยกลวง ในงานวิจัยนี้ใช้สารสกัดสองตัวผสมกันในตัวทำละลายเคโรซีน ดังนั้นในช่วงแรกของงานวิจัยจึงทดลองสกัดไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน โดยเลือกจับคู่สารสกัดสองตัวที่ใช้ผสมกัน พบว่าการใช้สารสกัด LIX 84-I ผสมกับ Cyanex 302 ที่ความเข้มข้น 0.04 M เท่ากัน สามารถสกัดไอออนนิกเกิลออกมาได้ดีที่สุด แต่เมื่อนำสารสกัดคู่ดังกล่าวมาใช้กับเยื่อแผ่นเหลวแบบแผ่นบาง และแบบพุงด้วยเส้นใยกลวงกลับไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร เนื่องจากสารสกัด LIX 84-I ผสมกับ Cyanex 302 ให้เปอร์เซ็นต์การสกัดสูงแต่มีความสามารถในการเลือกสกัดค่อนข้างต่ำ แต่สารสกัด Cyanex 302 ผสมกับ LIX 860-I ให้เปอร์เซ็นต์การสกัดสูงและมีค่าการเลือกสกัดที่สูง ทำให้การสกัดไอออนนิกเกิลโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับใช้สารสกัดผสมระหว่าง Cyanex 302 กับ LIX 860-I ความเข้มข้น 0.4 M การทดลองสกัดแบบเยื่อแผ่นเหลวของเหลวอิมัลชันจะใช้สารสกัดที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าแบบที่มีตัวรองรับ ในช่วงสุดท้ายของงานวิจัยได้ใช้สารสกัดผสมระหว่าง Cyanex 302 กับ LIX 860-I ความเข้มข้น 0.6 M เท่ากัน ซึ่งสามารถสกัดไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียของโรงงานชุบ ที่มีความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลประมาณ 8×10^{-3} mol/L ได้ 99% และมีค่าการซึมผ่าน 1.2×10^{-7} m/s

Ramakul et al. (2004)

ศึกษาการสกัดไอออนทองแดงและโครเมียมจากสารละลายโลหะผสม ไอออนทองแดงโครเมียม และสังกะสี โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งใช้ 2 คอลัมน์ คอลัมน์แรกใช้สารละลายสกัด LIX 84-I สำหรับการสกัดไอออนทองแดง ส่วนคอลัมน์ที่สองใช้สารละลายสกัด Aliquat 336 สำหรับการสกัดไอออนโครเมียม พบว่าค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ซึ่งได้เปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนทองแดงและโครเมียมเท่ากับ 33 และ 92 ตามลำดับ

Kim et al. (2005)

ศึกษาการนำกลับไอออนโครเมียมจากสารละลายผสมที่มีไอออนโครเมียม นิกเกิล ตะกั่วทองแดง และแคดเมียม โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารสกัดที่ใช้คือสารละลาย D2EHPA , TBP, LIX 79 และ TOA พบว่าสารละลายป้อนไอออนโลหะอื่นๆที่อยู่ในสารละลาย

ป้อนไม่ส่งผลต่อการสกัดโครเมียม ส่วนสารสกัดผสมระหว่างสารละลาย D2EHPA กับ TBP สามารถสกัดไอออนโครเมียมได้มากที่สุดที่ 84%

2.7.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการสกัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ

ทัศนลักษณ์ จิระภาพันธุ์ (2545)

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียของโรงงานชุบเคลือบโลหะ โดยใช้วิธีเยื่อแผ่นของเหลวอิมัลชัน ใช้สารสกัด LIX 84-I โดยทำการศึกษากวาระที่เหมาะสมในกระบวนการสกัดในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม มีไอออนโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูง โดยเฉพาะไอออนโลหะนิกเกิล พบว่ากวาระที่เหมาะสมที่สุดคือค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 8.4 ใช้อัตราส่วนของน้ำเสียต่อสารสกัด 10:3 ใช้สารละลายนำกลับเป็นกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล อัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเฟสสกัด 1:2 จากกวาระทั้งหมดที่กล่าวมานี้สามารถสกัดและนำกลับไอออนนิกเกิลได้ 89% และสารสกัดสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 22 ครั้ง

De Ketelaere et al. (2004)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากลับไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียอุตสาหกรรมโรงงานชุบโลหะ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงที่มีขนาดใหญ่ มีพื้นที่ผิว 19 m^2 ซึ่งในสารละลายป้อนมีองค์ประกอบของโลหะหนักหลายชนิด และมีความเข้มข้นสูง ใช้สารละลายนำกลับเป็นกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นสูง ในการทดลองนี้จะสามารถสกัดไอออนนิกเกิลออกมาได้มากโดยสามารถทำให้ในสารละลายป้อนมีไอออนนิกเกิลเข้มข้นน้อยกว่า 0.5 mol/l

Aouarram et al. (2006)

ได้ทำการศึกษากการแยกไอออนนิกเกิลออกจากน้ำทะเล มีความเข้มข้นของไอออนนิกเกิล $3\text{-}500 \text{ }\mu\text{g/l}$ ใช้เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวแบบแผ่นบาง โดยใช้สารสกัดเป็น 2-HBET เป็นสารสกัดชนิดกรดพวคคีเลท (Chelate extractant) ละลายในทอลูอิน และใช้สารละลายกรดไนตริกเป็นสารละลายนำกลับ ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิในช่วง $25\text{-}50$ องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายป้อนในช่วง $7\text{-}10$ ความเข้มข้นของสารสกัดในช่วง $0.6\text{-}2.13 \text{ M}$ และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับในช่วง $0.1\text{-}1.5 \text{ M}$ พบว่าสารสกัด 2-HBET ความเข้มข้น 1.66 M ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 9.4 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.3 M มีประสิทธิภาพในการสกัดมากที่สุด คือสามารถสกัดไอออนนิกเกิลออกมาได้ 100% นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการสกัดนิกเกิลจะสูงขึ้นตาม

Raquel et al. (2008)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการสกัดไอออนโครเมียม (VI) จากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ดำเนินการสกัดแบบหมุนวน

(Circulating mode) ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของไอออนโครเมียม (VI) อยู่ประมาณ 1 ppm คือการใช้สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.05 M สารละลายนำกลับเป็นกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.5 M อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับเป็น 10:1 โดยใช้เวลาในการสกัด 8 ชั่วโมง จะได้เปอร์เซ็นต์การสกัด 99% เมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงมาสกัดไอออนโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่มีความเข้มข้นไอออนโครเมียม (VI) 90 ppm ได้เปอร์เซ็นต์การสกัด 90%