



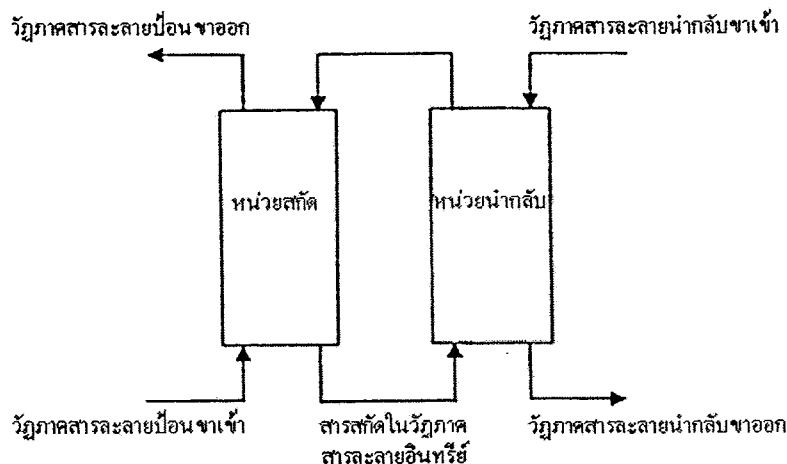
กระบวนการแยกไอออนโลหะต่างๆ จากสารละลายที่ใช้งานอยู่และได้รับความสนใจศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง เช่น กระบวนการตกตะกอน (precipitation process) การแยกด้วยไฟฟ้า (electrolysis process) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange process) กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction process) กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น (membrane process) เป็นต้น แต่ละกระบวนการมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ความเหมาะสมในการพิจารณาเลือกใช้กระบวนการจึงขึ้นอยู่กับภาวะ เงื่อนไขและองค์ประกอบต่างๆ นอกจากนี้แต่ละกระบวนการยังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการแยกไอออนโลหะออกจากสารละลายด้วยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว เพราะเป็นกระบวนการที่มีข้อได้เปรียบหลายด้าน กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวนี้นี้เป็นหนึ่งในกระบวนการเยื่อแผ่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการคัดเลือกสกัดและนำกลับไอออนโลหะจากสารละลายและมีศักยภาพสูงในการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจะอิงกับหลักการของการสกัดด้วยตัวทำละลาย บทนี้จะนำเสนอพื้นฐานของการสกัดด้วยตัวทำละลาย (หรือสารสกัดซึ่งละลายในสารที่ทำให้เจือจาง, diluent) การสกัดด้วยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวซึ่งประกอบไปด้วยมอดูลต่างๆ โดยเฉพาะมอดูลของเส้นใยกลวง จะอธิบายถึงวิธีการเตรียมสารละลายป้อน สารละลายเยื่อแผ่นเหลว และสารละลายนำกลับ ชนิดของสารสกัด และสารละลายนำกลับที่ใช้ในการแยกไอออนโลหะด้วยวิธีต่างๆ เช่น การสกัดด้วยระบบของตัวทำละลาย (solvent extraction หรือ conventional solvent extraction, CSE) ระบบเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน (emulsion liquid membrane, ELM) และระบบเยื่อแผ่นเหลวประเภทที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane, SLM)

2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction)

โดยทั่วไปกระบวนการสกัดแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ รูปแบบแรกประกอบด้วย 2 วัฏภาคคือ วัฏภาคสารละลายน้ำและวัฏภาคสารอินทรีย์ ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งประกอบด้วย 3 วัฏภาค คือ 2 วัฏภาคเป็นสารละลายน้ำ และอีก 1 วัฏภาคเป็นสารละลายอินทรีย์ หรือในทางกลับกัน คือ 2 วัฏภาคเป็นสารอินทรีย์กับอีก 1 วัฏภาคเป็นสารละลายน้ำ การสกัดด้วยตัวทำละลายซึ่งเป็นการสกัดขั้นพื้นฐาน และกระบวนการแยกไอออนโลหะผ่านกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวเป็นตัวอย่างของกระบวนการที่ใช้ทั้ง 3 วัฏภาค

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ในรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยวัฏภาคของสารละลาย 3 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคสารละลายป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีองค์ประกอบของไอออนโลหะที่ต้องการ

แยกละลายอยู่ซึ่งปกติจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ถัดมาเป็นวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ (organic phase) ประกอบด้วยสารสกัด (extractant or carrier) ซึ่งละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ และสุดท้ายเป็นวัฏภาคสารละลายน้ำกลับ ซึ่งเป็นวัฏภาคที่ทำหน้าที่รองรับองค์ประกอบที่ต้องการแยก ดังนั้น การนำกลับ (recovery) จะเสร็จสมบูรณ์ได้ใน 2 ขั้นตอน



รูปที่ 2.1 การสกัดและการนำกลับในการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ขั้นตอนการสกัดองค์ประกอบที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อนจะถ่ายเทมวล (mass transfer) เข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัดที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขององค์ประกอบที่ต้องการแยกกับสารสกัดขึ้น หรือเป็นสารละลายของเกลือในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ เพื่อให้อธิบายได้ง่ายจะขอเรียก “สารประกอบเชิงซ้อน” สารประกอบเชิงซ้อนจะละลายได้ดีในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ในขั้นตอนนำกลับสารประกอบเชิงซ้อนนี้จะเกิดการถ่ายเทมวลและปฏิกิริยาผันกลับ ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกเข้าไปละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายน้ำกลับ การถ่ายเทไอออนโลหะในกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและผันกลับได้ และพื้นที่ผิวสัมผัส อย่างไรก็ตามความสามารถในการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่อาศัยการเปลี่ยนแปลงภาวะทางเคมี (chemical condition) นอกจากนี้การปรับปรุงกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยเน้นที่ใช้สารสกัดชนิดใหม่ๆ ทำให้กระบวนการนี้ได้รับความสนใจมากขึ้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพของการสกัดถูกจำกัดโดยอัตราส่วนระหว่างสารละลายป้อนกับตัวทำละลาย (feed to solvent ratio) และอัตราส่วนการกระจายไอออนโลหะระหว่างวัฏภาคต่างๆ (distribution ratio) รวมทั้งพื้นที่ผิวสัมผัสขณะเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ และพื้นที่ผิวสัมผัสขณะเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคสารละลายอินทรีย์กับวัฏภาคสารละลายน้ำกลับ นอกจากนี้

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบพื้นฐานยังประกอบด้วยหลายขั้นตอนทำให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่และต้องใช้ทั้งสารสกัดและตัวทำละลายในปริมาณมาก

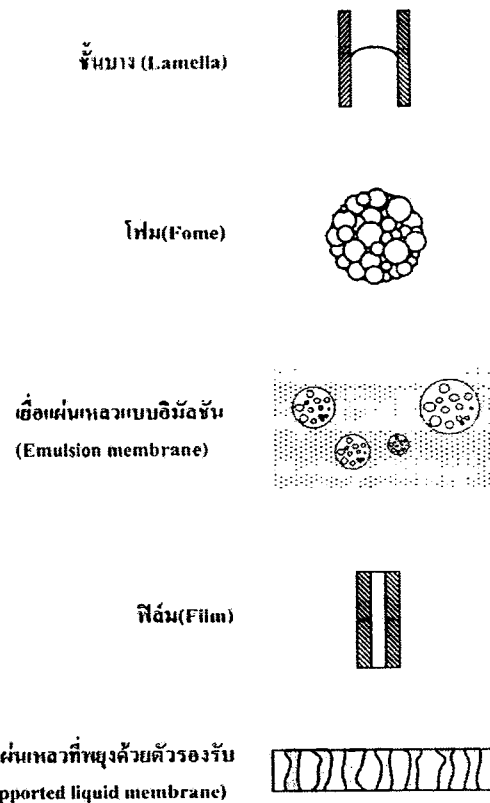
การถ่ายเทมวลของการสกัดด้วยตัวทำละลายจะเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเป็นสำคัญ ดังนั้นประสิทธิภาพของกระบวนการจึงขึ้นอยู่กับวิธีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ จึงนำไปสู่การพัฒนากระบวนการสกัดด้วยใบกวน ซึ่งค่อนข้างรู้จักในชื่อที่แตกต่างกัน เช่น เครื่องสกัดแบบมิกเซอร์เซตเตอร์ (mixer settler) หรือสกัด และเครื่องปฏิกรณ์การสกัดแบบอิมัลชัน (emulsion reactor) เป็นต้น

2.2 เยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane)

ในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวนี้นี้ วัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ถูกกำหนดให้อยู่ระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ทำให้การถ่ายเทมวลและปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนเดียวคือรวมขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับไว้ด้วยกัน เยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ และเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ

ข้อดีของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวคือเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพในการคัดเลือกรีดสารที่ต้องการสูง (selective separation) ใช้พลังงานต่ำ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่ำ เพราะมีส่วนเคลื่อนที่จำนวนน้อย แม้สารสกัดและตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้จะมีราคาค่อนข้างสูง แต่ปริมาณที่นำมาเติมในรูปของเยื่อแผ่นเหลวนั้นน้อยมาก ในเชิงเศรษฐศาสตร์ถือว่าคุ้มค่า แต่ก็ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวางในระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวที่จะทำให้การถ่ายเทมวลและประสิทธิภาพในการคัดเลือกรีดสารลดลงเมื่อระยะเวลาการดำเนินการนานขึ้น

ได้กล่าวมาแล้วว่ากระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วยวัฏภาคหลัก 3 วัฏภาค คือ วัฏภาคสารละลายป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีองค์ประกอบของไอออนโลหะที่ต้องการแยกละลายอยู่ วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่มีสารสกัดละลายอยู่ในตัวทำละลายซึ่งโดยทั่วไปมักจะเป็นสารอินทรีย์ และวัฏภาคสารละลายนำกลับ กลไกการแยกเกิดขึ้นโดยไอออนโลหะที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจะถ่ายเทมวลและแพร่ซึม (permeate) ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และเกิดปฏิกิริยานำกลับในวัฏภาคสารละลายนำกลับ เพื่อให้เกิดกระบวนการแยกจึงต้องมีการสร้างชั้นของเยื่อแผ่นเหลวกั้นไม่ให้วัฏภาคสารละลายป้อนผสมกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ลักษณะชั้นของเยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.2 แต่ละแบบเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้งานต่างกัน



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างรูปแบบการเกิดของชั้นเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

(ก) ชั้นบาง (Lamella) เป็นการแยกชั้นระหว่างสารละลายอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำกับสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ

(ข) โฟม (foam) เป็นกลุ่มฟองที่เกิดขึ้นในระบบที่มีแรงขับเคลื่อน (driving force) จากตะแกรงหมุนของหอสกัดแบบ scheibel หรือ หอสกัดแบบ karr หรือเกิดจากการเติมสารลดแรงตึงผิว

(ค) ฟิล์ม (film) เป็นชั้นบางๆ ที่มักพบในตำแหน่งที่อยู่ใกล้ผิวสัมผัส เกิดขึ้นจากผลของการแพร่หรือการกระจายของสารจากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปด้านความเข้มข้นต่ำ

(ง) อิมัลชัน (emulsion) เกิดจากการปั่นกวนสารละลายอินทรีย์และสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดฟองของเยื่อแผ่นเหลวสารอินทรีย์ห่อหุ้มสารละลายน้ำกลับ

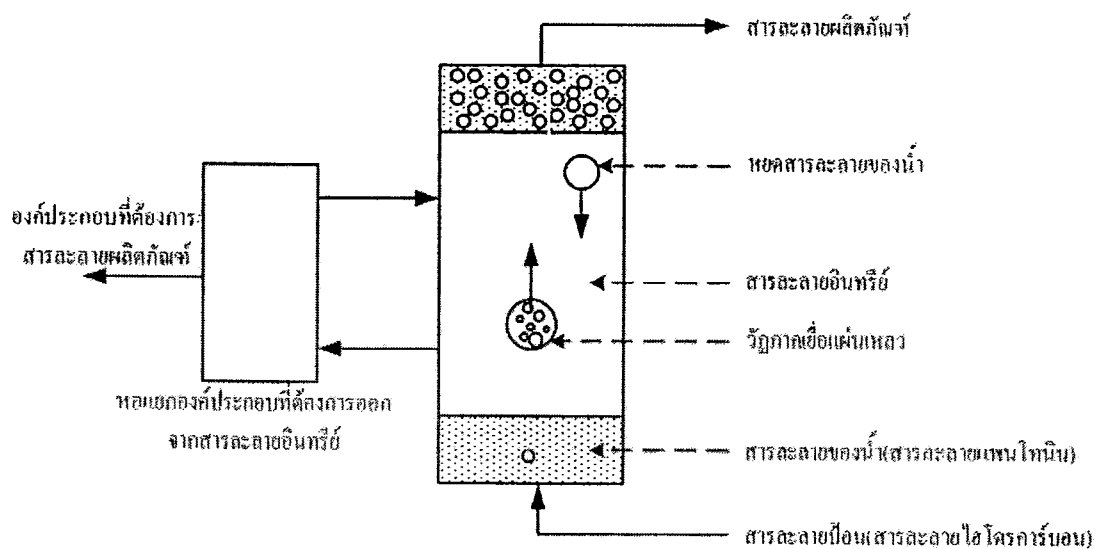
(จ) เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membrane)

2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ

เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับมีอิสระสามารถเคลื่อนที่ได้ในเกือบจะทุกทิศทาง จึงเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า “เยื่อแผ่นเหลวแบบเคลื่อนที่ได้ (mobilized liquid membrane)” เช่น

2.2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด (Liquid membrane in droplet column)

จากบทความวิจัยของ Marr และ Kopp จะบวนการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พอง ด้วยตัวรองรับแบบเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดดังรูปที่ 2.3 ได้กล่าวว่ามีการศึกษาครั้งแรกในปี ค.ศ.1967 โดย Li ซึ่งศึกษาถึงการแยกเซโปนิน (saponin) ออกจากน้ำ โดยที่หอสกัดจะบรรจุ สารละลายอินทรีย์ไว้นจนเกือบเต็ม และเกิดมีชั้นของสารละลายเซโปนินในน้ำที่ความเข้มข้น ประมาณร้อยละ 1 รองรับอยู่ชั้นล่าง พร้อมกันนั้นสารละลายไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ น้อยกว่าสารละลายอินทรีย์จะเคลื่อนที่ในลักษณะคล้ายฟองสบู่ที่ห่อหุ้มอากาศจากชั้นล่างสุดขึ้นไป รวมตัวที่ชั้นบนสุดของหอสกัดโดยผ่านชั้นของสารละลายเซโปนิน



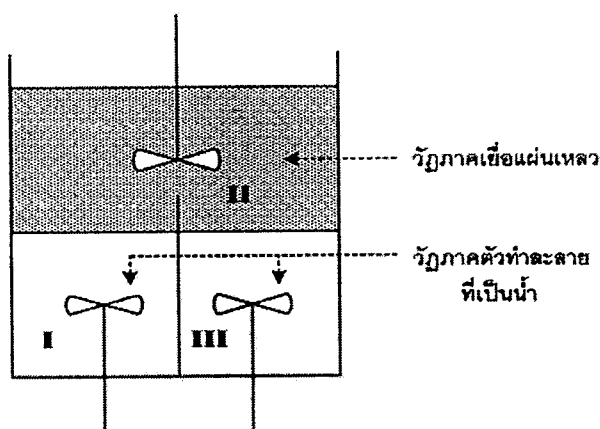
รูปที่ 2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด

ดังนั้นจะเกิดการถ่ายเทมวลของเซโปนินผ่านพื้นผิวของหยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนไปสู่วัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ฟองของสารละลายไฮโดรคาร์บอนที่รวมตัวที่ชั้นบนของหอสกัดจะไม่มีเซโปนิน แต่การแยกฟองของสารละลายไฮโดรคาร์บอนในชั้นบนของหอสกัดออกจากวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ทำได้ยาก ทำให้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดถูกจำกัดอยู่ในระดับงานวิจัยเท่านั้น

2.2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน (Stirred cells)

Marr และ Kopp ได้นำเสนอเยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววนในปี ค.ศ.1982 และได้ระบุ ความสำคัญของความต้านทานที่ผิวสัมผัส (interfacial resistance) เยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีโครงสร้าง

ที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย เตรียมโดยนำวัฏภาคสารละลาย 2 ชนิดที่รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ (วัฏภาค I และวัฏภาค III) มาบรรจุในอุปกรณ์โดยมีแผ่นกั้นเพื่อไม่ให้วัฏภาค I และวัฏภาค III รวมตัวกัน จากนั้นจึงบรรจุวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลว (วัฏภาค II) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าและไม่รวมกันกับวัฏภาค I และ III ลงในอุปกรณ์ และมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับทั้งสองวัฏภาค ดังรูปที่ 2.4 จะเกิดการถ่ายเทมวลขึ้นระหว่างวัฏภาคที่ II กับวัฏภาคที่ I และระหว่างวัฏภาค II กับวัฏภาคที่ III องค์ประกอบที่ต้องการแยกและละลายอยู่ในวัฏภาคที่ I จะถ่ายไปยังวัฏภาคที่ II และวัฏภาคที่ III ในที่สุดกระบวนการนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่อัตราการถ่ายเทมวลค่อนข้างต่ำและต้องใช้เชื้อแผ่นเหลวปริมาณค่อนข้างมาก



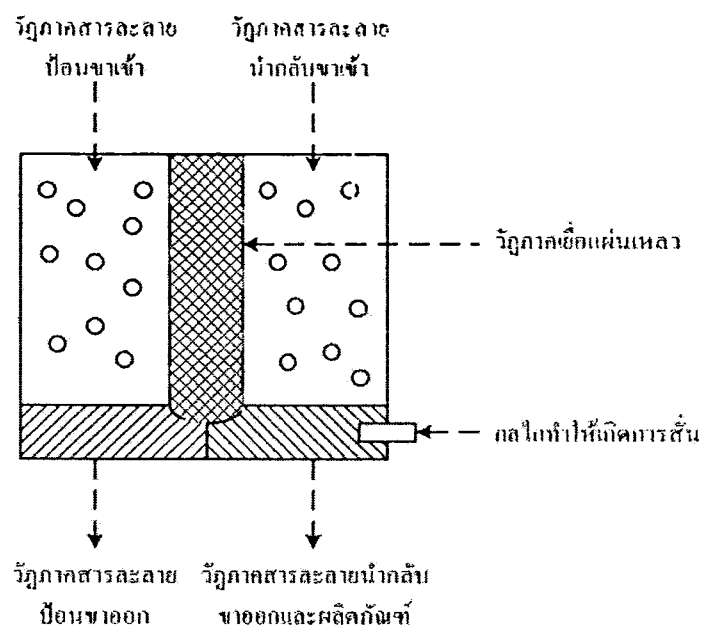
รูปที่ 2.4 ระบบเชื้อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน

2.2.1.3 เชื้อแผ่นเหลวในหอสกัดแบบพัลส์ของ Boyadzhiev

(Boyadzhiev pulse column)

ในปี ค.ศ.1980 Boyadzhiev และ Kyuchoukov นำเสนอเชื้อแผ่นเหลวในหอสกัดแบบพัลส์ (pulse column) ดังรูปที่ 2.5 ที่แบ่งเป็น 2 ส่วน กั้นด้วยแผ่นพอลิเมอร์ที่มีช่องว่างในแนวดิ่ง วัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวสามารถเคลื่อนที่ผ่านแผ่นกั้นได้ แต่วัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านแผ่นกั้น กระบวนการนี้ค่อนข้างแตกต่างจาก 2 กระบวนการที่กล่าวมา คือ วัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวจะถูกบรรจุเต็มอยู่ในหอสกัดทั้ง 2 ส่วน จากนั้นวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนฝั่งซ้ายหรือด้านบนฝั่งขวาของหอสกัด (ขึ้นอยู่กับารออกแบบ) ในลักษณะเป็นหยดกระจายลงไปสู่วัฏภาคเชื้อแผ่นเหลว เมื่อมีการเขย่าหอสกัดวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวจะเคลื่อนที่ไปมาระหว่าง 2 ฝั่งของแผ่นกั้น ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนฝั่งหนึ่งเกิดการถ่ายเทมวลผ่านเชื้อแผ่นเหลวไปสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับในฝั่งตรงกันข้ามได้ กระบวนการนี้มีจุดเด่นที่พื้นที่

การถ่ายเทมวลที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณเยื่อแผ่นเหลวไม่ได้ลดลงและยังคงมีปริมาณมากอยู่ มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเทคนิคนี้ให้มีรูปแบบที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานต่อไป

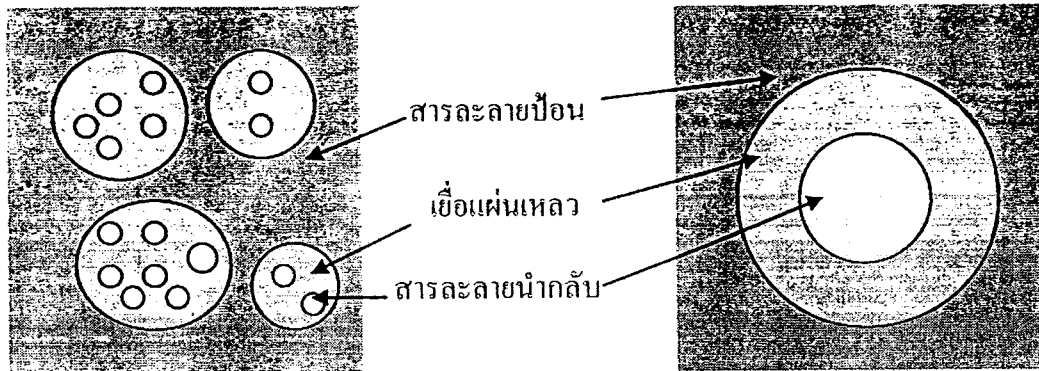


รูปที่ 2.5 ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดแบบ Boyadzhiev

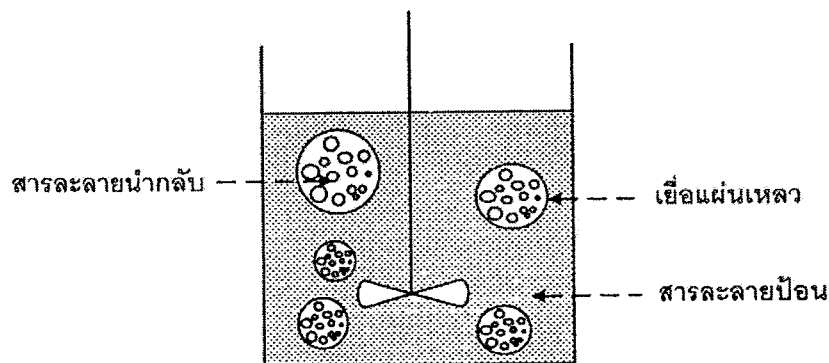
2.2.1.4 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion liquid membrane, ELM)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันทำโดยการนำวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและวัฏภาคสารละลายน้ำกลับที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงให้เกิดเป็นอิมัลชันในลักษณะที่วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวห่อหุ้มวัฏภาคสารละลายน้ำกลับซึ่งอาจเรียกเป็นวัฏภาคภายใน (internal phase) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 อิมัลชันที่เกิดขึ้นเหล่านี้มักไม่เสถียร (unstable) ดังนั้นจึงต้องเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactants) หรือตัวประสาน (emulsifier) ที่เหมาะสมลงไปในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเพื่อรักษาเสถียรภาพของอิมัลชันระหว่างปฏิบัติการ จากนั้นจึงเติมวัฏภาคสารละลายป้อนหรือวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ที่มีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่และสามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้กับวัฏภาคสารละลายน้ำกลับ ดังนั้นหยดอิมัลชันจึงกระจายไปทั่วในวัฏภาคสารละลายป้อน การถ่ายเทมวลในระบบนี้จะเกิดในทิศทางที่องค์ประกอบที่ต้องการแยกออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนจะถูกถ่ายผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (หยดอิมัลชัน) ไปสู่วัฏภาคสารละลายน้ำกลับซึ่งถูกหุ้มอยู่ภายในหยดอิมัลชันเยื่อแผ่นเหลวอีกทีหนึ่ง การถ่ายเทมวลนี้จะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายน้ำกลับเพิ่มขึ้นพอตามความต้องการ จากนั้นจึงแยกอิมัลชันออกจากวัฏภาคสารละลายป้อน

แล้วแตกอิมัลชันเพื่อแยกวัฏภาคสารละลายน้ำกลับซึ่งอิมิตัวด้วยองค์ประกอบที่ต้องการแยกออกมา ส่วนวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวจะถูกนำกลับไปใช้ในการเตรียมอิมัลชันต่อไป



(ก)



(ข)

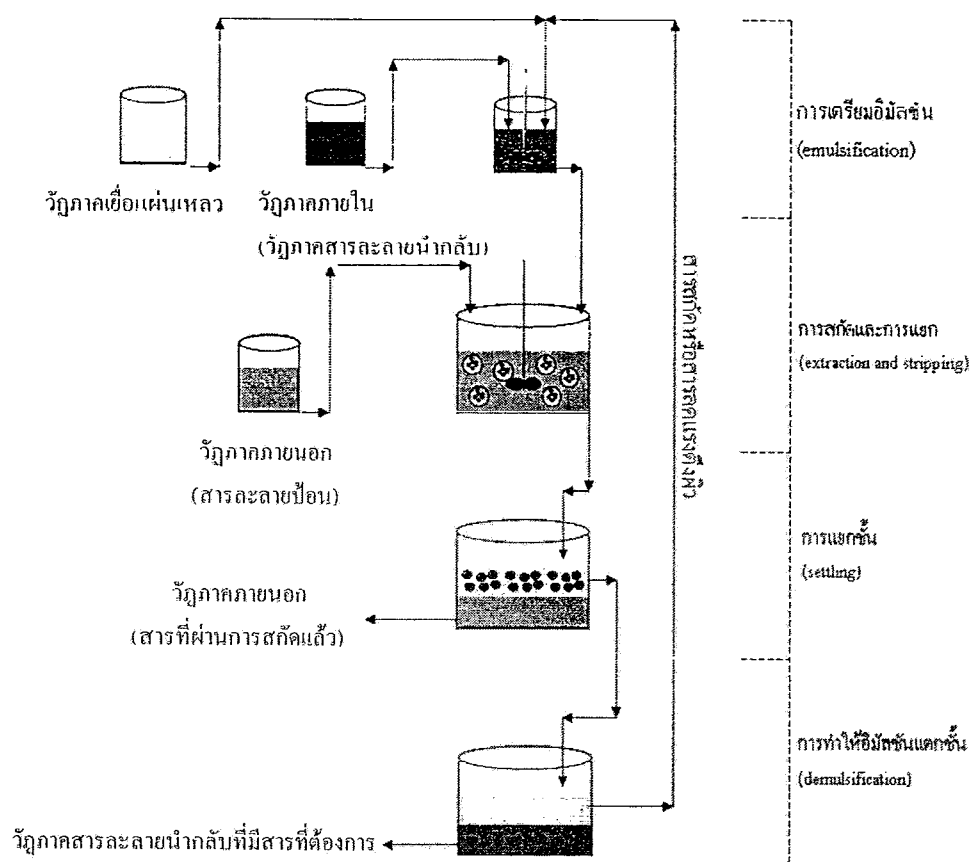
รูปที่ 2.6 ระบบเชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน

เชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. เชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (water in oil (w/o) emulsion) คือ เชื้อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในหรือวัฏภาคสารละลายน้ำกลับเป็นน้ำ (แรงตึงผิวของน้ำมากกว่า น้ำมัน) ดังนั้นเมื่อนำอิมัลชันของน้ำในน้ำมันมากระจายในวัฏภาคของสารละลายป้อนที่เป็น สารละลายของน้ำ ระบบจะเรียงลำดับจากวัฏภาคด้านในไปยังวัฏภาคด้านนอกดังนี้ น้ำ/น้ำมัน/น้ำ (w/o/w) และใช้สารลดแรงตึงผิวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surfactant)

2. เชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (oil in water (o/w) emulsion) คือ เชื้อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นสารละลายของน้ำมันหรือสารละลายอินทรีย์ (แรงดึงดูดของน้ำมันมากกว่าน้ำ) ดังนั้นเมื่อนำอิมัลชันของน้ำมันในน้ำมากระจายในวัฏภาคของสารละลายป้อนที่เป็นสารละลายของน้ำมัน ลำดับของวัฏภาคจากด้านในไปยังวัฏภาคด้านนอกจะเป็น น้ำมัน/น้ำ/น้ำมัน (o/w/o) และใช้สารลดแรงดึงดูดผิวชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic surfactant)

ในรูปที่ 2.7 แสดงรายละเอียดของขั้นตอนการแยกด้วยเชื้อแผ่นเหลวอิมัลชันซึ่งมีการเพิ่มเติมรายละเอียดแตกต่างไปจากรูปที่ 2.6



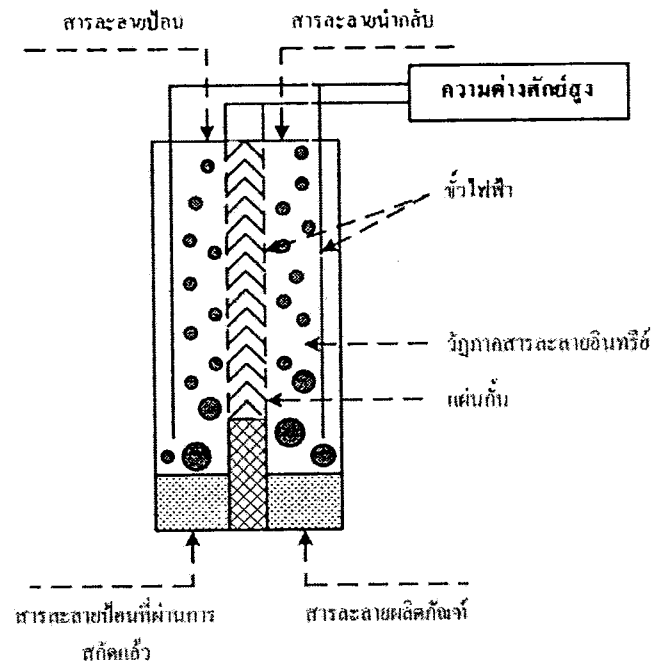
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการแยกด้วยเชื้อแผ่นเหลวอิมัลชัน

2.2.1.5 เชื้อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้าสถิต

(Electrostatic pseudo liquid membrane, ESPLIM)

ESPLIM เป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากเชื้อแผ่นเหลวในหอสกัดแบบพลัสของ Boyadzhiev เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงดึงดูดผิวและเพื่อลดความยุ่งยากของระบบเชื้อแผ่นเหลว โดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางไฟฟ้าจากการนำสนามไฟฟ้าแรงสูงมาใช้กับกระบวนการเชื้อแผ่น

เหลวเทียมจะทำให้หยดน้ำในวิทยาศาสตร์ละลายของน้ำมันหรือสารละลายอินทรีย์แตกกระจายออกเป็นหยดเล็กๆ จำนวนมากตามที่ Gu ได้รายงานปรากฏการณ์ “การกวนด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic agitation)” ที่ Martin และคณะ ศึกษาไว้ ระบบเชื้อแผ่นเหลวเทียมนี้แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบเชื้อแผ่นเหลวเทียมโดยไฟฟ้าสถิต

วิทยาศาสตร์เชื้อแผ่นเหลวจะถูกบรรจุอยู่ในหอสกัดซึ่งแบ่งเป็น 2 ฟัง คือ ฟังสกัดและฟังน้ำกลับ ด้วยแผ่นกั้น ส่วนล่างของหอสกัดออกแบบให้รองรับการรวมตัวของหยดสารละลายในฟังสกัด และฟังน้ำกลับ วิทยาศาสตร์เชื้อแผ่นเหลวในหอสกัดจะเคลื่อนที่อย่างอิสระไปมาระหว่าง 2 ฟัง ของแผ่นกั้นที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ ขณะที่หยดของวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและหยดของวิทยาศาสตร์ละลายน้ำกลับจะอยู่แยกกันในฟังสกัดและฟังน้ำกลับ หัวไฟฟ้า 2 คู่ถูกต่อคร่อมระหว่างฟังสกัดกับฟังน้ำกลับตามลำดับ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเข้าไประหว่างฟังสกัดกับฟังน้ำกลับ วิทยาศาสตร์ละลายป้อนและวิทยาศาสตร์ละลายน้ำกลับจะแตกกระจายเป็นเม็ดเล็กจำนวนมากในวิทยาศาสตร์เชื้อแผ่นเหลว ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนที่ฟังสกัดเกิดการถ่ายเทผ่านวิทยาศาสตร์เชื้อแผ่นเหลวไปยังวิทยาศาสตร์ละลายน้ำกลับที่ฟังน้ำกลับ กระบวนการนี้มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ ค่าพลังค์ของการถ่ายเทมวลมีค่าสูง ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว ระบบไม่ซับซ้อน ใช้พลังงานต่ำ และลดปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของเชื้อแผ่นเหลว แต่ก็ยังมีข้อจำกัด คือ วิทยาศาสตร์ละลายอินทรีย์ที่ใช้ต้องมีความเป็นขั้ว (polarity) ต่ำ วิทยาศาสตร์ที่กระจายตัวต้องเป็นวิทยาศาสตร์ของสารละลายน้ำเท่านั้น และยังต้องใช้สารละลายอินทรีย์ในปริมาณมาก

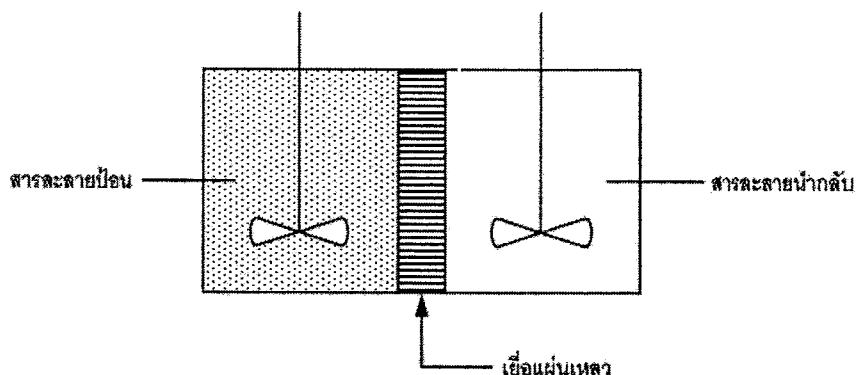
2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ

เยื่อแผ่นเหลวประเภทที่พองด้วยตัวรองรับเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายมากกว่าประเภทที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ เยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารละลายอินทรีย์จะถูกตรึงไว้ด้วยแรงคาปิลลารี (capillary force) ในรูพรุนขนาดเล็ก (micro porous) ของตัวรองรับพอลิเมอร์ซึ่งมีรูปร่างหลายแบบ เช่น แบบแผ่นแบน แบบแผ่นม้วน และแบบเส้นใยกลวง จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า immobilized liquid membrane ข้อได้เปรียบของระบบนี้ดังได้กล่าวแล้วคือจัดเตรียมกระบวนการด้วยวิธีที่ไม่ยุ่งยากใช้สารสกัดในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย อาศัยการใช้งานของอุปกรณ์ค่อนข้างนาน แต่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวที่มีผลต่อระยะเวลาปฏิบัติการ การเตรียมกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับทำโดยนำวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมาเคลือบบนตัวรองรับเกิดเป็นแผ่นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลวบดผิวและในรูพรุนของตัวรองรับ ซึ่งตัวรองรับจะอยู่ระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับที่ไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว องค์ประกอบที่ต้องการแยก เช่น ไอออนโลหะจะถ่ายเทจากวัฏภาคสารละลายป้อนผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับ ในกรณีตัวรองรับเป็นพอลิเมอร์ชนิดไม่ชอบน้ำ วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ต้องเป็นวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ แต่ถ้าตัวรองรับเป็นพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ต้องเป็นวัฏภาคสารละลายน้ำ

2.2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน

(Flat sheet supported liquid membrane)

รูปที่ 2.9 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนซึ่งเหมาะสมในการศึกษากลไกการถ่ายเทมวล เนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่ง่ายต่อความเข้าใจ อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเพราะมีพื้นที่การถ่ายเทมวลน้อย

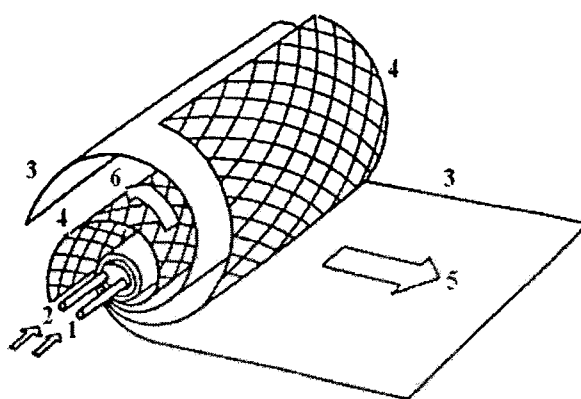


รูปที่ 2.9 เยื่อแผ่นเหลวแบบแผ่นแบน

2.2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วน

(Spiral-type supported liquid membrane)

Teramoto และคณะ ศึกษาเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วนในรูปที่ 2.10 มอดูลของตัวรองรับแบบแผ่นม้วนผลิตจากฟิล์มพอลิเมอร์ประเภทพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่ชอบน้ำและแผ่นตาข่าย (mesh spacer) โดยพอลิเอสเตอร์ม้วนอยู่ผิวด้านนอกกรอบท่อนำสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ปลายทั้งสองด้านของมอดูลจะถูกผนึกด้วยตัวประสานอีพอกซี ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว (raffinate) และสารละลายนำกลับที่ได้จะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านในสุดของมอดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้ คือ มอดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน



หมายเลข 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน หมายเลข 2 ทางเข้าสารละลายนำกลับ

หมายเลข 3 เยื่อแผ่นเหลว

หมายเลข 4 แผ่นกั้น

หมายเลข 5 ทางออกของสารละลายป้อน หมายเลข 6 ทางออกของสารละลายนำกลับ

รูปที่ 2.10 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน

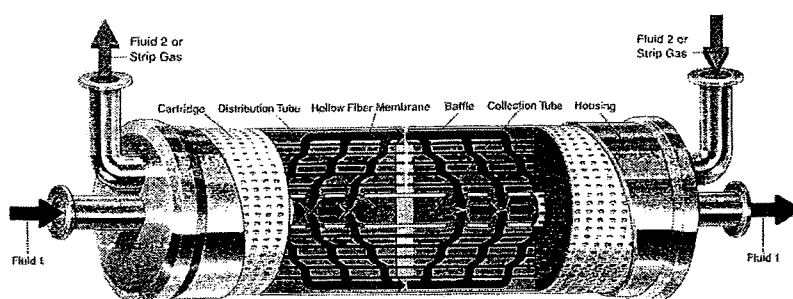
2.2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

(Hollow fiber supported liquid membrane, HFSLM)

หนังสือเล่มนี้ต้องการจุดประกายเพื่อเป็นหนทางเลือก หากนักวิจัยท่านใดจะเห็นคุณค่าและประโยชน์ของกระบวนการนี้เพื่อวิจัยและพัฒนาต่อไปให้สามารถใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรม เพราะกระบวนการนี้มีรูปแบบง่ายไม่ซับซ้อน มีผู้สนใจศึกษาหลากหลายแต่ยังไม่เคยมีการรวบรวมทั้งข้อมูลทั่วไปและข้อมูลเชิงลึก การที่รูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานมากกว่าตัวรองรับรูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang และ Dahuron นอกจากนี้ยังสามารถฟื้นฟูเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพได้ง่ายโดยการเติมสารละลายอินทรีย์ที่มีสารสกัดละลายอยู่เข้าไปใหม่ ตามรายงานจากผลการวิจัยต่างๆ และสำหรับข้อดีต่างๆ ของระบบนี้เมื่อเทียบกับการสกัดด้วยตัวทำละลายตามที่ได้ระบุในงานวิจัยโดยกลุ่มของ Ramakul กลุ่มของ Pancharoen และกลุ่มของ Patthaveekongka ซึ่งสรุปประเด็นได้ดังนี้

1. การทำงานของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับที่ฝั่งของวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับทำให้ใช้ปริมาณสารสกัดน้อยและประหยัดค่าใช้จ่าย
2. การสกัดและการนำกลับเกิดขึ้นในขั้นตอนเดียวกันและอยู่ใน อุปกรณ์เดียวกันทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ
3. การเลือกใช้เยื่อแผ่นเหลวที่เหมาะสมสามารถลดการเกิดการกวนย้อนหลัง (backmixing) และลดการสูญเสียตัวทำละลายได้
4. ในกรณีที่ปริมาณสารสกัดมากเกินไป ขณะที่สารละลายป้อนมีความเข้มข้นต่ำจะส่งผลให้ค่าการคัดเลือกสูงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อน



รูปที่ 2.11 ลักษณะภายในของมอดูลเส้นใยกลวง Celgard X-30 240

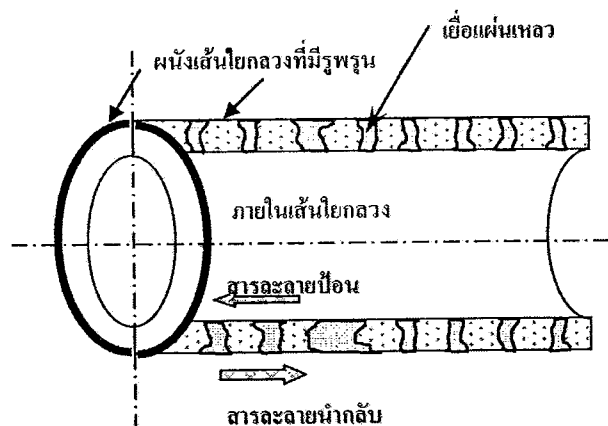
Microporus Polypropylene Hollow Fiber

มอดูลของเส้นใยกลวง (hollow fiber module) มีลักษณะคล้ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube heat exchanger) โดยแทนที่ท่อด้วยเส้นใยกลวงจำนวนมากที่เรียงในแนวนานกัน ดังรูปที่ 2.11 ในงานวิจัยใช้มอดูลของเส้นใยกลวงลักษณะนี้ ซึ่งมีลักษณะภาพดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติกายภาพของมอดูลเส้นใยกลวง Celgard X-30 240

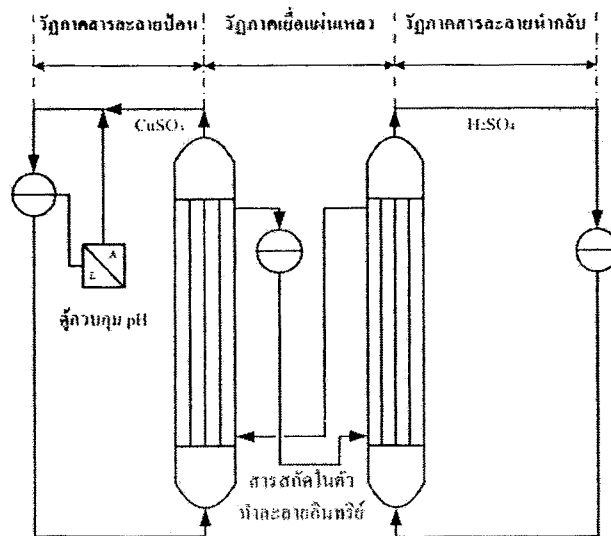
ลักษณะ	คุณลักษณะ
วัสดุเส้นใยกลวง	พอลิโพรไพลีน (polypropylene)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลวง	30%
ค่าทอหุสซิติ (tortuosity)	2.6
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 kg/cm ² (60 psi)
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m ² (15.2 ft ²)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 cm ² /cm ³ (74.4 m ² /m ³)
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1°C ถึง 60°C
มิติของชุดเส้นใยกลวง (DXL)	8 x 28 cm (2.5 x 8 inch)
จำนวนเส้นใยกลวง	35,000 เส้น

ทิศทางการไหลของวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับในมอดูลของเส้นใยกลวงอาจเป็นทิศทางเดียวกัน (co-current) หรือสวนทางกัน (counter current) ก็ได้ รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการไหลแบบสวนทาง



รูปที่ 2.12 ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับในการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

รายละเอียดที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 เป็นกระบวนการสกัดโดยใช้ 2 มอดูลของเส้นใยกลวง วิทยาศาสตร์ละลายป้อนและวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับต่างก็ถูกป้อนให้ไหลเข้าภายในท่อของมอดูลของเส้นใยกลวง (lumen or tube side) ส่วนสารสกัดที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ซึ่งอยู่ในวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวจะถูกปั๊มเข้าชั้นเปลือกของมอดูล (shell side) ขณะดำเนินการต้องควบคุมความดันของวิทยาศาสตร์ละลายป้อนให้สูงกว่าความดันของวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลว เพื่อที่จะกักเก็บสารสกัดไว้คงอยู่ในรูปของเส้นใยกลวง



รูปที่ 2.13 กระบวนการสกัดโดยใช้ 2 มอดูลของเส้นใยกลวง

2.3 การเตรียมสารละลายป้อน สารละลายนำกลับและเชื่อมแผ่นเหลว

2.3.1 การเตรียมสารละลายป้อน

ปกติไอออนโลหะที่ต้องการแยกจะอยู่ในสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหรือไม่ก็เป็นของแข็ง (เกลือ) ที่จะถูกแปรให้อยู่ในรูปของสารละลาย โดยทั่วไปไอออนโลหะที่อยู่ในสภาพสารละลายมักเป็นน้ำทิ้ง (wastewater) จากภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับเหล็ก การเคลือบ หรือการชุบ เช่น ไอออนเหล็ก นิกเกิล โครเมียม หรือแม้แต่ น้ำที่ดัดขึ้นมาจากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติ/น้ำมันดิบ ซึ่งไอออน โลหะจะเป็นพวก โปรท สารหนู เป็นต้น ดังนั้นก่อนผ่านสารละลายไอออนโลหะนี้เข้ากระบวนการเชื่อมแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง จะต้องผ่านเคมีบำบัดให้ตกตะกอนแยกออกไปก่อนในกรณีที่สารละลายมีความเข้มข้นของไอออนโลหะสูง และจะต้อง ผ่านการกรองตะกอนที่เป็นของแข็งขนาดเล็ก เพื่อป้องกันการอุดตันในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง เพราะจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลดลงและอาจเกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์จนไม่สามารถใช้งานได้

อีกต่อไป สารละลายป้อนที่เป็นน้ำทิ้งซึ่งเป็นไอออน โลหะมักมีความเป็นกรดต่ำ ดังนั้นการเลือกชนิดของกรดที่ใช้ปรับสภาพความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนให้มีค่าความเป็นกรด-เบสค่าหนึ่ง (pH1) ต้องพิจารณาว่าเกลือไอออนโลหะนั้นเป็นเกลือของกรดชนิดใด เช่น ถ้าเป็นเกลือของโลหะซัลเฟตมักเลือกใช้กรดซัลฟิวริกเพื่อลดปัญหาของการเกิดขั้วที่แตกต่างกันหลายชนิดลง ถ้าไอออนโลหะอยู่ในสภาพของแข็ง ต้องละลายด้วยน้ำหรือกรดก่อน สำหรับการเลือกกรดใช้หลักเกี่ยวกับกรรมวิธีของสารละลายไอออนโลหะ

2.3.2 การเตรียมสารละลายนำกลับ

สารละลายนำกลับ อาจเป็นกรดหรือเบสก็ได้ การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกรดหรือเบสที่เลือกมาว่าสามารถทำปฏิกิริยานำกลับกับสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งละลายอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและทำให้ไอออนโลหะที่ต้องการสกัดหลุดออกมาจากสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวและละลายอยู่ได้ในสารละลายนำกลับได้หรือไม่ ทั้งนี้สารละลายนำกลับจะมีค่าความเป็นกรด-เบสคงที่เท่ากับ pH_2

2.3.3 การเตรียมเยื่อแผ่นเหลว

การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวก่อนข้างแตกต่างกับการเตรียมสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ เพราะเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงประกอบด้วยสารสกัดพร้อมตัวทำละลายอินทรีย์และเส้นใยกลวง (hollow fiber) จึงต้องพิจารณาทั้งสามองค์ประกอบดังนี้

1) สารสกัดที่เหมาะสมอาจจะใช้เพียง 1 ชนิด หรือมากกว่า 1 ชนิด สำหรับกรณีที่เป็นสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (รายละเอียดอยู่ในบทที่ 4) ความเหมาะสมของสารสกัดที่กล่าว หมายถึงความสามารถที่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์และที่สำคัญอย่างยิ่งคือต้องสามารถทำปฏิกิริยาการสกัดกับสารละลายป้อนโดยดึงเอาไอออนโลหะออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนและรวมตัวกับสารอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งละลายได้ดีในสารละลายอินทรีย์

2) สำหรับการเลือกตัวทำละลายอินทรีย์ ต้องเป็นคู่ที่เหมาะสมกับสารสกัดที่เลือกใช้ เพราะจะต้องสามารถละลายสารสกัดได้ดีและเป็นตัวทำละลายสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัดที่เกิดขึ้นในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยจะไม่เกิดตะกอนตกค้างที่จะทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง

3) วัสดุพอลิเมอร์ประเภทชอบน้ำและไม่ชอบน้ำที่ใช้ผลิตเส้นใยกลวงมีผลต่อการตรึงสารสกัดด้วยแรงคาปิลลารีในรูพรุนของเส้นใยกลวง ถ้าสารสกัดละลายอยู่ในสารละลายน้ำ เส้นใยกลวง

ที่ใช้ต้องเป็นประเภทชอบน้ำ แต่ถ้าสารละลายอยู่ในสารละลายอินทรีย์ต้องเลือกเส้นใยกลางประเภทไม่ชอบน้ำ

สิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการสกัดไอออนคือความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของไอออนนั้นในสารละลายป้อนไปยังวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับ และแรงขับเคลื่อนที่มาจากความต่างศักย์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคสารละลายป้อน (pH_1) และวัฏภาคสารละลายนำกลับ (pH_2) กับไอโซอิเล็กทริกพอยต์ คือ $pH_1 > I_p > pH_2$ หรือ $pH_1 < I_p < pH_2$ ค่าไอโซอิเล็กทริกพอยต์ (isoelectric point, I_p) คือค่าความเป็นกรดเบสของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งไม่ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของไอออนระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

2.4 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจัดแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด ดังนี้

2.4.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractant) และสารสกัดชนิดคีเลต

Chelate extractant)

สารสกัดชนิดกรดประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-COOH$, $=P(O)OH$, $-SO_3H$ ไอออนโลหะที่มีประจุบวกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลางและสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ดังสมการที่ (2.1)



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบนหมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ สมการที่ (2.1) แสดงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนบวกระหว่างไอออนไฮโดรเนียมกับไอออนโลหะความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคสารละลาย และยังขึ้นกับลักษณะเฉพาะ (characteristics) ของไอออนโลหะนั้นด้วย สารสกัดไอออนโลหะในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (organic derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (monocarboxylic acid) ในสารสกัดประเภทนี้กรดในกลุ่มอัลคิลฟอสฟอริก (alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด เช่น กรดได - 2 - เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acid, D2EHPA) สารสกัดชนิดคีเลตประกอบด้วยคอนเนอร์กรุ๊ป (donor

group) ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (bidentate complexes) กับไอออนโลหะ สารสกัดชนิดคีเลตเชิงพาณิชย์ 2 ประเภท ได้แก่

1. ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซี เบนโซฟีโนน ออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc., USA) โดยใช้ชื่อทางการค้า LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical, USA สารสกัด SME (shell metal extractant) ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical, USA

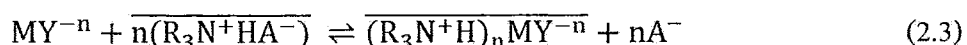
2. ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซี ควิโนไลน์ (8-hydroxy quinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company, USA) โดยใช้ชื่อทางการค้า Kelex เช่น ใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (acidic leach liquor) และจากสารละลายแอลคาไลน์ (alkaline solution)

2.4.2 สารสกัดชนิดเบส (Basic extractant)

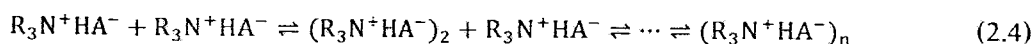
สารสกัดชนิดเบสเป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายในการเกิดเป็นสารประกอบของเกลือ เมื่อสัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดชนิดเบสที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีน (amine) และแอมโมเนียมเฮไลด์ควอเตอร์นารีหรือชนิดจตุภูมิ (quaternary ammonium halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (primary, RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (secondary, R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (tertiary, R_3N) และชนิดจตุภูมิ (quaternary, R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (anionic species) และถูกสกัดได้ด้วยเอมีน ทั้งนี้ต้องเปลี่ยนเอมีนให้อยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมและสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ โดยให้เอมีนทำปฏิกิริยากับกรดเกิดเป็นเกลือเอมีน ซึ่งมีขั้ว $R_3N^+HA^-$ อยู่ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ดังนี้



และเมื่อสัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ MY^{-n} จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุสมการที่ (2.3)

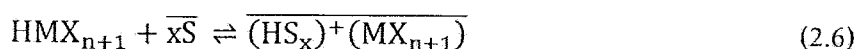


ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการใช้สารสกัดเอมีนในการสกัดไอออนโลหะ คือการรวมตัวของเกลือเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ การรวมตัวนี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของ ตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ (ammonium cation and anion) เป็นสำคัญ การรวมตัวของเกลือเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการที่ (2.4) และทำให้ วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกเป็น 2 ส่วน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการสกัดด้วยสารสกัดชนิดนี้แต่ สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (modifiers) เช่น พวก long-chain aliphatic alcohol



2.4.3 สารสกัดชนิดซอลเวต (Solvating extractant)

สารสกัดประเภทซอลเวตหรือสารสกัดที่ออกฤทธิ์เป็นกลาง เป็นสารที่มีเฉพาะ คอนเนอร์กรุป ไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล จึง ไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดและเกิดเป็น สารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ ขึ้นอยู่กับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาค สารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดเบส การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะ ที่อยู่ตรงกลาง (central metal atom) ของสารประกอบเชิงซ้อน ดังสมการที่ (2.5) หรือเป็นการ รวมกันของไอออนโลหะกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังสมการ ที่ (2.6)



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดซอลเวต

2.5 ตัวทำละลายอินทรีย์

เช่นเดียวกันกับกรณีของสารสกัดคือตัวทำละลายอินทรีย์นี้ต้องเป็นคู่ที่เหมาะสมกับสาร สกัดที่เลือกใช้ เพราะจะต้องสามารถละลายสารสกัดได้ดีและต้องทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายให้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัดโดยจะไม่เกิดตะกอนตกค้างที่จะทำให้เกิด การอุดตันในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวง

บทสรุป

กระบวนการเชื่อมแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพสูงในการสกัดและนำกลับสาร สามารถใช้แยกไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำในสารละลาย มีศักยภาพที่จะพัฒนาเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ โดยกระบวนการเชื่อมแผ่นเหลวจะอิงกับหลักการของการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งประกอบด้วย 3 วัฏภาค คือ วัฏภาคสารละลายป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีองค์ประกอบของไอออนโลหะที่ต้องการแยกละลายอยู่ วัฏภาคเชื่อมแผ่นเหลวที่มีสารสกัดซึ่งอาจเป็นชนิดกรด เบส หรือกลางละลายอยู่ในตัวทำละลายซึ่งโดยทั่วไปมักจะเป็นสารอินทรีย์ และวัฏภาคสารละลายนำกลับที่ทำหน้าที่รองรับไอออนโลหะที่ต้องการแยก กลไกการแยกเกิดขึ้นเมื่อไอออนโลหะที่ต้องการแยกทำปฏิกิริยากับสารสกัดในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคเชื่อมแผ่นเหลว จากนั้นจะถ่ายเทมวลและแพร่ซึมผ่านวัฏภาคเชื่อมแผ่นเหลว และเกิดปฏิกิริยานำกลับซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับในวัฏภาคสารละลายนำกลับ การที่วัฏภาคเชื่อมแผ่นเหลวอยู่ระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายนำกลับทำให้การถ่ายเทมวลสารและปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนเดียว

เชื่อมแผ่นเหลวแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เชื่อมแผ่นเหลวที่ไม่พุงด้วยตัวรองรับ ตัวอย่างเช่นเชื่อมแผ่นเหลวในหอสกัด เชื่อมแผ่นเหลวแบบปั่นกววน และเชื่อมแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน และอีกประเภทคือเชื่อมแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับที่มีรูพรุน รูปร่างของตัวรองรับอาจเป็นแบบแผ่นแบน แผ่นม้วน หรือแบบเส้นใยกลวง

ข้อดีของเชื่อมแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงคือมีการคัดเลือกแยกสารสูง ใช้พลังงานต่ำ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่ำ เพราะมีส่วนเคลื่อนที่จำนวนน้อย แม้สารสกัดและตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้จะมีราคาสูงแต่ปริมาณที่ใช้้น้อยมากในเชิงเศรษฐศาสตร์ถือว่าคุ้มค่า ส่วนข้อจำกัดคือการรักษาเสถียรภาพของเชื่อมแผ่นเหลวเมื่อระยะเวลาการใช้งานนานขึ้น เพราะมีผลต่อการถ่ายเทมวลและประสิทธิภาพในการคัดเลือกลำดับ

คำถามท้ายบท

- 1) เชื้อแผ่นเหลวมีกี่ประเภท อะไรบ้าง
- 2) เชื้อแผ่นเหลวแบบไม่พุงด้วยตัวรองรับมีอะไรบ้าง
- 3) เชื้อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับมีอะไรบ้าง
- 4) สารสกัดแบ่งได้กี่ชนิดอะไรบ้าง
- 5) จงยกตัวอย่างสารสกัดชนิดกรด พร้อมทั้งอธิบายหลักการที่ใช้ในการจำแนกชนิดของสารสกัด
- 6) ปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารสกัดชนิดเอมีน
- 7) ข้อจำกัดของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายมีอะไรบ้าง
- 8) จงอธิบายกลไกการสกัดด้วยเชื้อแผ่นเหลว
- 9) ข้อดีของการสกัดโดยใช้เชื้อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีอะไรบ้าง เมื่อเทียบกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย
- 10) ทำไมจึงต้องปรับค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายก่อนนำไปสกัด
- 11) สิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการสกัดไออนมีอะไรบ้าง