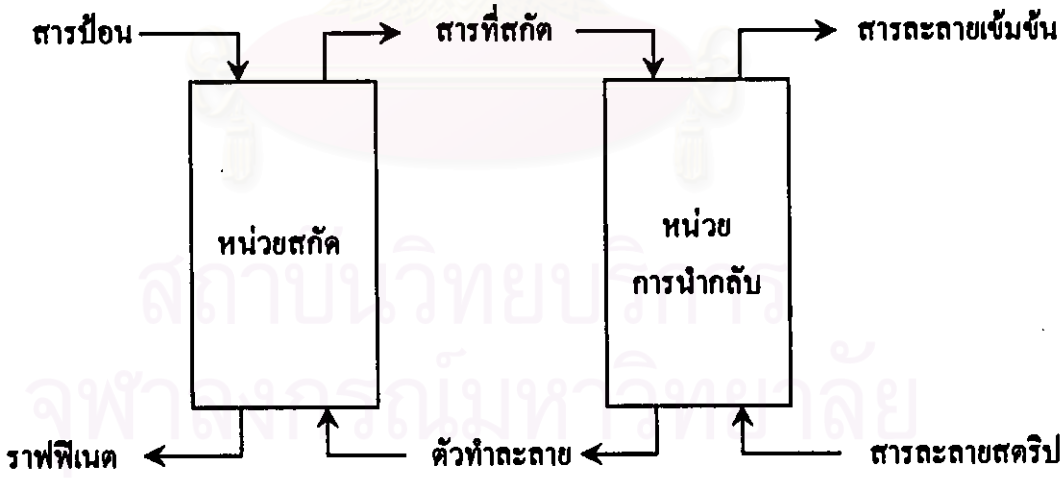
บทที่ 2

ทฤษฎี

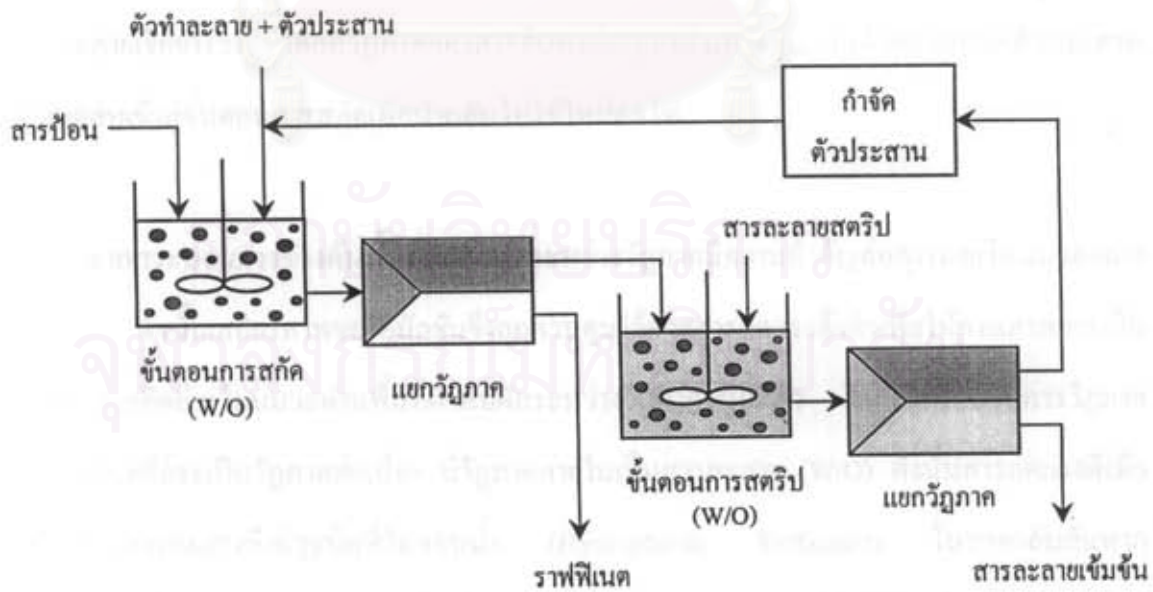
2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นเทคนิคการสกัดพื้นฐานที่อาศัยความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้แตกต่างกันหรือเกิดปฏิกิริยา เป็นกลไกในการแยกการสกัดซึ่งเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายนี้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้มากในทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการสกัดแยกไอออนโลหะ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการปฏิบัติการ และไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีกำลังการผลิตสูง โดยกระบวนการจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการปฏิบัติการหลักอย่างน้อย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ (Tavlarides, Bae and Lee, 1987: 581-617) ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 แสดงขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ ในการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย

จากรูปที่ 2-1 เป็นลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย ซึ่งแสดงขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการขั้นตอนการสกัดเริ่มด้วยวัฏภาคของสารป้อน (Feed) ซึ่งเข้มข้นไปด้วยไอออนของตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดถูกป้อนเข้าสู่หน่วยสกัด วัฏภาคของสารป้อนจะสัมผัสกับวัฏภาคของตัวทำละลาย (Solvent) ซึ่งเป็นวัฏภาคที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน ในสัดส่วนที่เหมาะสมเกิดการถ่ายโอนมวลของตัวถูกละลายอันเนื่องมาจากความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้แตกต่างกันของสารหรือเกิดปฏิกิริยา สกัดผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งเป็นพื้นที่การถ่ายโอนมวลข้ามวัฏภาคและเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดด้วยการเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวลด้วยเทคนิคต่างๆ จนกระทั่งตัวทำละลายอิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลาย และถูกแยกออกมาจากสารป้อนซึ่งมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายลดต่ำลง (Raffinate) โดยตัวทำละลายที่อิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลาย (Extract) จะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยการนำกลับ และเกิดการถ่ายโอนมวลของตัวถูละลายออกจากวัฏภาคของตัวทำละลายผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสเช่นเดียวกันกับขั้นตอนการสกัดไปสู่สารละลายสตริป (Stripping solution) โดยตัวทำละลายที่ผ่านการนำกลับซึ่งถูกสตริปสารที่ต้องการออกไปแล้วจะถูกป้อนไหลเวียนกลับเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดเพื่อนำกลับไปใช้ต่อไป โดยกระบวนการโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 แสดงขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชัน

จากรูปที่ 2-2 เป็นกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชันชนิด W/O ซึ่งมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลาย (Aqueous Phase) กระบวนการเริ่มต้นโดยป้อนสารป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดผสมกับตัวทำละลายซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ (Organic Phase) ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันในถังปฏิกรณ์การสกัด ภายในถังปฏิกรณ์วัฏภาคทั้งสองจะถูกตีกวนให้เกิดเป็นอิมัลชัน ซึ่งเป็นหยดของสารป้อนที่มีขนาดเล็กๆ โดยมีวัฏภาคของสารอินทรีย์ห่อหุ้มหยดของสารป้อนที่มีขนาดเล็กๆ นั้นเอาไว้ พื้นที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคทั้งสองที่สัมผัสกันรอบเม็ดอิมัลชันจะเป็นพื้นที่ในการถ่ายโอนมวล ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวทรงกลมของหยดอิมัลชันนั่นเอง ตัวถูกละลายในสารป้อนจะเกิดการถ่ายโอนมวลสกัดผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสองที่เกิดขึ้นรอบเม็ดอิมัลชัน จนกระทั่งวัฏภาคของสารอินทรีย์อิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลาย จากนั้นวัฏภาคทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันโดยที่วัฏภาคของสารอินทรีย์ที่อิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลายนั้น จะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการนำกลับผสมกับสารละลายสตริปซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันในถังปฏิกรณ์การนำกลับ ภายในถังปฏิกรณ์วัฏภาคทั้งสองจะถูกตีกวนให้เกิดเป็นอิมัลชันและเกิดการถ่ายโอนมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคของสารอินทรีย์ ไปสู่วัฏภาคของสารละลายสตริป จนกระทั่งวัฏภาคของสารละลายสตริปอิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลาย จากนั้นวัฏภาคของสารละลายสตริปซึ่งเข้มข้นไปด้วยตัวถูกละลาย จะถูกแยกออกจากวัฏภาคของสารอินทรีย์ซึ่งมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายเจือจางลง โดยที่วัฏภาคของสารอินทรีย์จะถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการกำจัดตัวประสานและส่งกลับเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ต่อไป

จากกระบวนการข้างต้นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีความสำคัญต่อการถ่ายโอนมวลอย่างมาก ดังนั้นเสถียรภาพของอิมัลชันจึงถูกควบคุมไว้ด้วยสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้คงสภาพการเป็นอิมัลชันและเกิดถ่ายโอนมวลผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคจนอิ่มตัว โดยในกระบวนการวัฏภาคของสารอินทรีย์จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง มีวัฏภาคภายในเป็นสารละลาย (W/O) ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) ในทางกลับกันหากกระบวนการมีวัฏภาคของสารละลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) (Plucinski and Nitsh, 1988: 43-59; Loiacono et al., 1986:123-138)

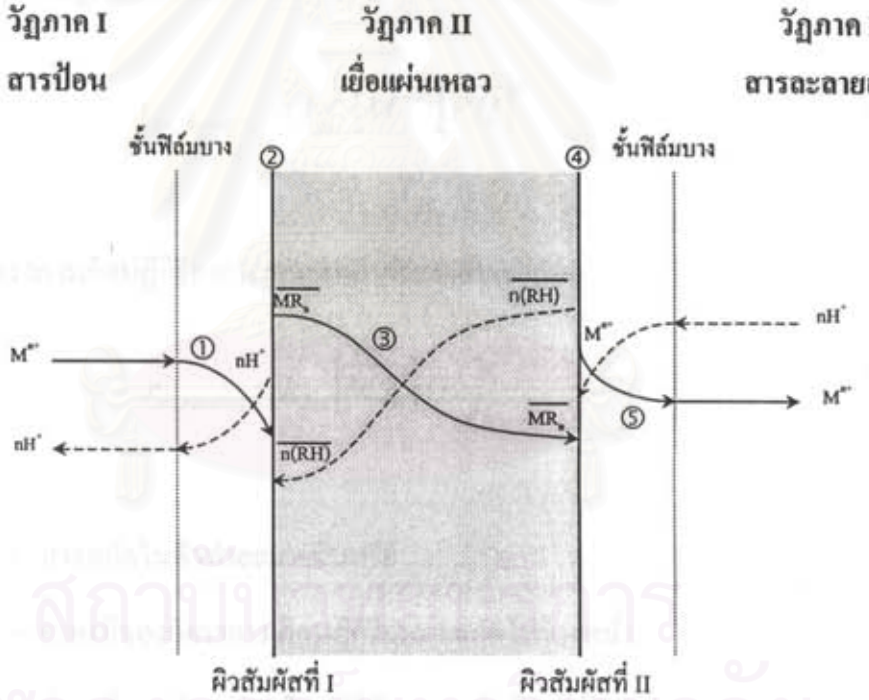
แม้ว่าสารลดแรงตึงผิวจะมีบทบาทสำคัญต่อการรักษาเสถียรภาพของการเกิดอิมัลชัน โดยการเกิดเป็นอิมัลชันจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคอันมากมายรอบหยดอิมัลชันที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นพื้นที่ในการถ่ายโอนมวล แต่สารลดแรงตึงผิวที่ผสานผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคให้อิมัลชันมีเสถียรภาพอยู่ได้นั้น จะก่อตัวกลายเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายโอนมวลข้ามวัฏภาค อีกทั้งในขั้นตอนการแยกวัฏภาคออกจากกัน และขั้นตอนการบำบัดสารอินทรีย์เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ก็ยังมีความยุ่งยากในการปฏิบัติ ซึ่งวิธีการดำเนินการโดยทั่วไปมีวิธีการบำบัดอยู่ 2 วิธีคือวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี ซึ่งวิธีทางเคมีสามารถกระทำได้โดยเติมสารลดการประสาน (Demulsifier) สามารถลดการประสานได้ดีแต่สารเคมีในกระบวนการจะมีคุณสมบัติที่ด้อยคุณภาพลงทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนวิธีทางกายภาพเป็นการบำบัดด้วยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง วิธีการบำบัดด้วยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงนี้จะให้ผลในการบำบัดที่ดีมาก สามารถแยกวัฏภาคและทำลายโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวได้ดี อีกทั้งสารเคมีในกระบวนการก็มีคุณภาพด้อยลงเพียงเล็กน้อย แต่อุปกรณ์ที่ใช้มีความยุ่งยากซับซ้อน มีอันตรายสูงอีกทั้งยังมีราคาสูงอีกด้วย

จะเห็นว่ากระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายถึงแม้จะเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการปฏิบัติแล้วยังพบว่ากระบวนการมีกำลังการผลิตสูงซึ่งเหมาะสมในการพัฒนาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม แต่ก็มีข้อด้อยอยู่เช่นกันนั่นก็คือ กระบวนการมีหลายขั้นตอน ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดถูกจำกัดไว้ด้วยสมดุลระหว่างวัฏภาคที่ผิวสัมผัส โดยมากแล้วกระบวนการจะมีประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก และยังมีคุณสมบัติในการเลือกสกัดต่ำ อีกทั้งยังใช้สารเคมีและพลังงานในปริมาณสูงอีกด้วย (Rautenbach and Machhammer, 1988: 425-444; Sengupta, Basu and Sirka, 1988: 1698-1708)

กลไกการถ่ายโอนมวลของเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายได้ถูกจำกัดไว้ด้วยสมดุลระหว่างวัฏภาคที่ผิวสัมผัส ได้ถูกพัฒนาขยายขีดจำกัดในการถ่ายโอนมวลให้เกิดกลไกการสกัดอย่างต่อเนื่องเพื่อให้การสกัดเกิดขึ้นตามกลไกตลอดเวลา จึงเป็นจุดเริ่มของการรวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับจากเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายไปสู่เทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

2.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane)

เทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเป็นเทคนิคการสกัดที่รับการพัฒนามาจากการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยรวมขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับให้อยู่ในขั้นตอนเดียวกันเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งในวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะมีสารสกัดผสมอยู่ในสารละลายอินทรีย์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการเลือกสกัด เมื่อสารป้อนเป็นสารละลายที่มีหลายองค์ประกอบ (Yang, Guha and Sirkar, 1996: 1383-1394; Saito, 1994: 1335-13346; Nakashio, 1993: 123-133; Schulz, 1988: 191-202) โดยกลไกการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-3 แสดงกลไกการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลว

จากรูปที่ 2-3 แสดงกลไกการสกัดแยกไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลวมีขั้นตอนการเกิดกลไก 5 ขั้นตอนนั่นคือ

① ไอออนโลหะจากกระแสการไหลในวัฏภาคของสารป้อนแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของสารป้อนกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะ (Concentration Gradient) ไปสู่บริเวณผิวสัมผัสที่ I

② ไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสที่ I จะเกิดปฏิกิริยาการสกัด เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะ (MR_n) และไฮโดรเนียมไอออน (nH^+) ปฏิกิริยาการสกัด ที่บริเวณผิวสัมผัสที่ I (Interface I.) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ I

$$M^{n+}(aq) + n\overline{(RH)}(org) \rightleftharpoons \overline{M(RH)_n}(org) + nH^+(aq) \quad \text{——} (1)$$

โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดดำเนินไปข้างหน้าเท่ากับ

$$r_{ex,forward} = k_{1ex}\left[M^{n+}\right]\left[\overline{RH}\right]^n \quad \text{——} (2)$$

และสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดดำเนินย้อนกลับเท่ากับ

$$-r_{ex,reverse} = k_{2ex}\left[\overline{MR_n}\right]\left[H^+\right]^n \quad \text{——} (3)$$

โดยที่ $\overline{RH}$ = สารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์

k_{1ex} = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดไปข้างหน้า

k_{2ex} = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดย้อนกลับ

③ สารประกอบเชิงซ้อนของสารสกัดกับไอออนโลหะ $\left(\overline{MR_n}\right)$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาบริเวณผิวสัมผัสที่ I จะแพร่ผ่านชั้นความหนาของเยื่อแผ่นเหลว อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน (Concentration Gradient) ไปสู่บริเวณผิวสัมผัสที่ II

④ สารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวสัมผัสที่ II จะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับทำให้ไอออนโลหะถูกสตริปออกมาที่ผิวสัมผัสที่ II (Interface II) ดังสมการ

$$\overline{MR_n}(org) + nH^+(aq) \rightleftharpoons + \overline{n(RH)}(org) + M^{n+}(aq) \qquad \text{——} \ (4)$$

โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับดำเนินไปข้างหน้าเท่ากับ

$$r_{re,forward} = k_{1re}\left[\overline{MR_n}\right]\left[H^+\right]^n \qquad \text{——} \ (5)$$

และสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับดำเนินย้อนกลับเท่ากับ

$$-r_{re,reverse} = k_{2re}\left[M^{n+}\right]\left[RH\right]^n \qquad \text{——} \ (6)$$

โดยที่

k_{1re} = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับไปข้างหน้า

k_{2re} = ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับย้อนกลับ

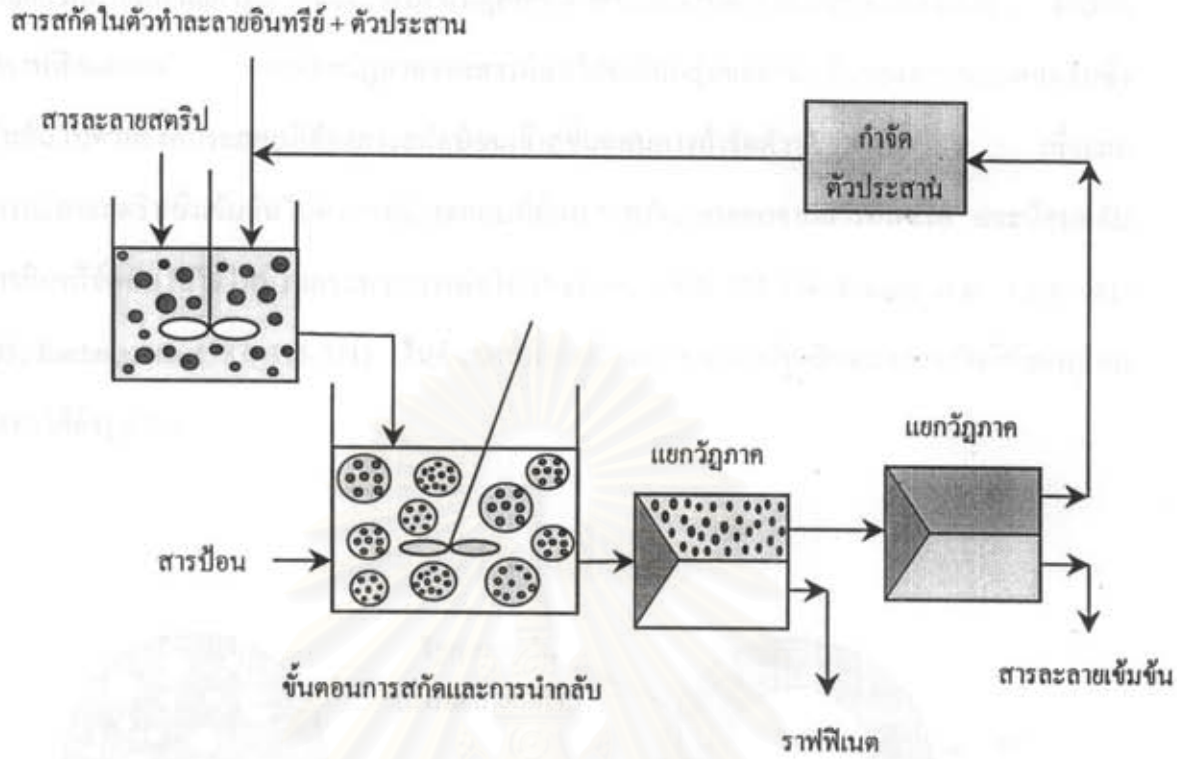
⑤ ไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสที่ II จะแพร่ออกจากบริเวณผิวสัมผัสที่ II ผ่านชั้นฟิล์มบางไปสู่กระแสของสารละลายสตริปด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะ(Concentration Gradient) ที่ถูกสตริปออกมา

จากกลไกข้างต้นเมื่อไอออนเชิงซ้อนของสารสกัดกับไอออนโลหะบริเวณผิวสัมผัสที่ II เกิดปฏิกิริยาการนำกลับ ทำให้ไอออนโลหะถูกสตริปด้วยไฮโดรเนียมไอออนออกจากวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวแล้ว จะเกิดสารสกัดกลับคืนสู่วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งสารสกัดจะแพร่ย้อนกลับจากบริเวณผิวสัมผัสที่ I ไปสู่ผิวสัมผัสที่ II ดังเดิมด้วยแรงขับของความแตกต่างของความเข้มข้นของ

สารสกัดนั้น และจะเกิดปรากฏการณ์เดิมซ้ำไปด้วยแรงขับของความแตกต่างของความเป็นกรด-ด่าง (pH Gradient) ซึ่งเป็นสภาวะของกระบวนการและความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิดคือ เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane, (ELM) หรือ Liquid Surfactant Membrane), เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพยุงไว้ (Supported Liquid Membrane, (SLM) หรือ Immobilized Liquid Membrane) และเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Eletrostatic Pseudo Liquid Membrane, ESPLIM) โดยเยื่อแผ่นเหลวทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะรายละเอียดโดยทั่วไปดังนี้

2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane, ELM)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน หรือ Liquid Surfactant Membrane หรือ Mobilized Liquid Membrane เป็นเยื่อแผ่นเหลวที่มีลักษณะการปฏิบัติการเช่นเดียวกันกับการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดอิมัลชันแต่รวมขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับไว้เป็นขั้นตอนเดียวกัน ทำให้เกิดอิมัลชันซ้อน (Double Emulsion) จึงเกิดการสกัดและการนำกลับในขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งลดขั้นตอนการปฏิบัติการและทำให้กระบวนการสกัดแยกมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Draxler, Furst and Marr, 1988: 281-293) โดยระบบจะประกอบไปด้วย 3 วัฏภาค คือ วัฏภาคของสารป้อน ซึ่งเป็นสารละลายที่เข้มข้นไปด้วยองค์ประกอบของสารที่ต้องการสกัด, วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากการผสมระหว่างสารสกัดกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสม และวัฏภาคของสารละลายสตริปเป็นวัฏภาคของสารละลายที่ใช้สตริปองค์ประกอบที่ต้องการสกัดออกจากเยื่อแผ่นเหลว โดยขั้นตอนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันแสดงได้ดังรูปที่ 2-4

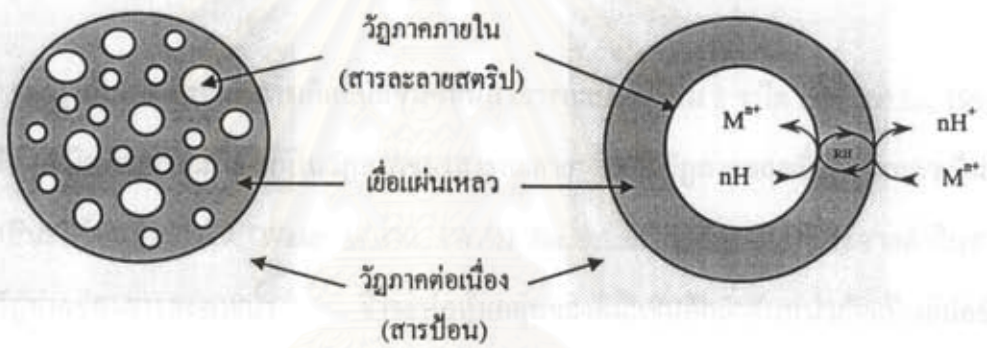


รูปที่ 2-4 แสดงขั้นตอนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน

จากรูปที่ 2-4 เป็นกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันแบบ W/O/W นั่นคือมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลายโดยมีวัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ขั้นตอนการสกัดเริ่มด้วยป้อนสารละลายสตริปผสมกับสารอินทรีย์ ซึ่งวัฏภาคทั้งสองชนิดไม่ละลายซึ่งกันและกัน ตีกวนให้เกิดอิมัลชัน และเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันด้วยสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) (Nakashio, 1993: 123-133; Jianhan et al., 1987: 315-321) จากนั้นจะป้อนกลุ่มอิมัลชันที่ได้ผสมกับสารป้อน และตีกวนเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวลเกิดการสกัดและการนำกลับพร้อม ๆ กันตามกลไกการสกัด ซึ่งจากการปั่นกวนเยื่อแผ่นเหลวให้เป็นอิมัลชัน ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีการเคลื่อนตัวตลอดเวลาจึงเป็นเหตุให้เรียกวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวว่าเป็น วัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และในขบวนการสกัดจำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อรักษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นจึงสามารถเรียกการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันได้เป็น Mobilized Liquid Membrane และ Liquid Surfactant Membrane ตามลำดับนั่นเอง (Nakashio, 1993: 123-133; Jianhan et al., 1987: 315-321) จากนั้นกลุ่มอิมัลชันเมื่อเกิดการสกัดและการนำกลับตามกลไกการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแล้ว จะถูกป้อนเข้าสู่

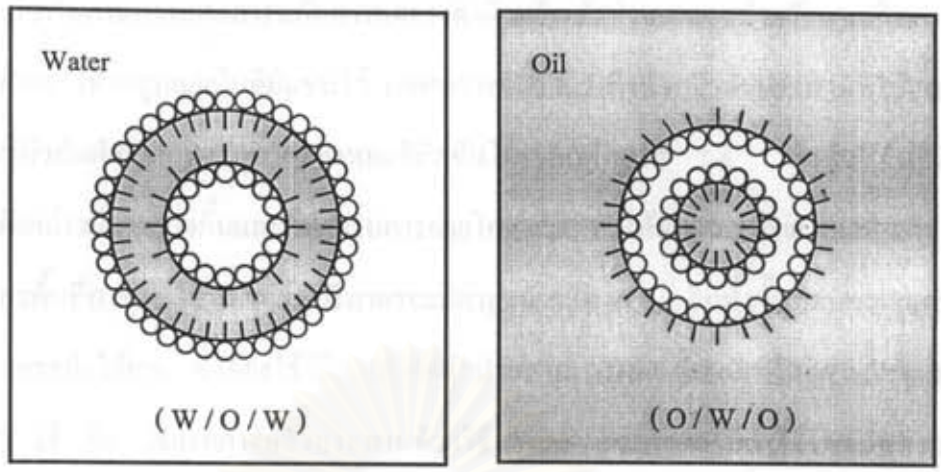
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถังแยกวัฏภาคเพื่อแยกวัฏภาคของสารป้อนที่ถูกสกัดองค์ประกอบที่ต้องการสกัดออกไปแล้ว ซึ่งเรียกว่าราฟฟีเนตออก และแยกวัฏภาคของสารอินทรีย์ที่เป็นกลุ่มของอิมัลชันของสารละลายสตริปซึ่งเข้มข้นไปด้วยองค์ประกอบที่ต้องการสกัดป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดตัวประสาน เพื่อแยกสารละลายสตริปซึ่งเข้มข้นไปด้วยองค์ประกอบที่ต้องการสกัดแยกออกจากสารอินทรีย์ และป้อนกลับสารอินทรีย์กลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการต่อไป (Nakashi, 1993: 123-133; Draxler et al., 1988: 281-293; Jianhn et al., 1987: 315-321) ในขั้นตอนการสกัดและการนำกลับ ลักษณะการเกิดอิมัลชันซ้อนแสดงได้ดังรูป 2-5



รูปที่ 2-5 แสดงลักษณะของอิมัลชันซ้อน (Double Emulsion) และกลไกการถ่ายโอนมวลในอิมัลชันซ้อน

จากรูปที่ 2-5 ลักษณะของอิมัลชันซ้อนจะเป็นหยดเล็กๆ ของวัฏภาคภายใน (Internal Phase) ซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายและถูกห่อหุ้มไว้ด้วยเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ (W/O)ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน โดยมีสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่ชอบน้ำผสานพื้นที่ผิวระหว่างวัฏภาคให้อิมัลชันมีเสถียรภาพและป้อนกลุ่มของอิมัลชันนี้ลงในวัฏภาคของป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลาย โดยที่กลุ่มของอิมัลชันจะถูกห่อหุ้มไว้ด้วยสารละลาย (O/W) และมีสารลดแรงตึงผิวชนิดชอบน้ำผสานผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคให้เกิดเสถียรภาพของอิมัลชันไว้เกิดเป็นอิมัลชันซ้อนอิมัลชันนั่นเอง โดยลักษณะการใช้ตัวประสานในการรักษาเสถียรภาพของเม็ดอิมัลชันแสดงได้ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 แสดงลักษณะการใช้ตัวประสานในขบวนการเกิดอิมัลชันซ้อนแบบ W/O/W และ O/W/O

จากรูปที่ 2-6 ลักษณะการเกิดอิมัลชันซ้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด (Ho and Li, 1992: 597-610) คือ ชนิดที่วัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลาย โดยมีวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ห่อหุ้มเอาไว้ (Water in Oil, (W/O) Emulsion) และถูกทำให้กระจายตัวในสารป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายน้ำ ซึ่งจะห่อหุ้มกลุ่มของอิมัลชันอีกลำดับหนึ่งเกิดเป็นอิมัลชันซ้อน ดังนั้นระบบการสกัดจะมีการเรียงลำดับของวัฏภาคเป็น Water-Oil-Water (W/O/W) โดยมีขั้นตอนการสกัดและลักษณะการเกิดอิมัลชันซ้อนดังรูปที่ 2-4 และ 2-6 ตามลำดับ

อิมัลชันซ้อนชนิดที่สองเป็นชนิดที่วัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ (O/W) ดังนั้นกระบวนการจะมีการเรียงลำดับของวัฏภาคเป็น Oil-Water-Oil (O/W/O) และสารลดแรงตึงผิวซึ่งเป็นตัวประสานเพื่อรักษาเสถียรภาพอิมัลชันจึงมีด้วยกัน 2 ชนิดเช่นเดียวกัน คือ ชนิดที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) สำหรับอิมัลชันชนิด O/W และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) สำหรับอิมัลชันชนิด W/O โดยกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันจะมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงนั่นเอง แต่โดยทั่วไปแล้วการคงรูปเป็นอิมัลชันของกระบวนการจะมีเสถียรภาพต่ำ ดังนั้นในขบวนการจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อรักษาเสถียรภาพของการเกิดเป็นอิมัลชันเอาไว้ (Balies et al., 1976: 239-246)

ถึงแม้ว่าในกระบวนการการสกัดสารลดแรงตึงผิวหรือ ตัวประสานจะช่วยรักษาเสถียรภาพของหยดวัฏภาคต่างๆ ให้คงรูปอยู่เป็นอิมัลชันไว้ แต่พบว่าสารลดแรงตึงผิวหรือตัวประสานที่ใช้ จะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของหยดอิมัลชันโดยรอบดังรูปที่ 2-6 ซึ่งชั้นฟิล์มที่เกิดจากตัวประสานดังกล่าวนี้จะขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวล ทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลต่ำ ถึงแม้ว่าสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรจะมีค่าสูงมากก็ตาม อีกทั้งขั้นตอนการแยกวัฏภาคออกจากกัน กระทำได้ยาก ซึ่งต้องใช้วิธีการกำจัดตัวประสาน (Demulsifier) โดยการกำจัดสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกกำจัดตัวประสานด้วยวิธีทางเคมี สามารถกระทำได้โดยเติมสารลดการประสานซึ่งวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงแต่ทำให้คุณสมบัติของของเหลวในระบบเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีคุณภาพต่ำลงและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ วิธีที่สองกำจัดตัวประสานด้วยวิธีทางกายภาพโดยการใช้ประจุไฟฟ้าความต่างศักย์สูงซึ่งวิธีนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างดี คุณสมบัติของของเหลวเปลี่ยนแปลงน้อย แต่อุปกรณ์มีความยุ่งยากซับซ้อน อุปกรณ์มีราคาสูง อีกทั้งยังมีอันตรายสูงอีกด้วย (Mark, 1990: 547-552) ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวในการรักษาเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวจึงพัฒนากระบวนการสกัดให้วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวถูกยึดตรึงไว้ ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงขึ้นนั่นเอง

2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพยุง (Supported Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นวัฏภาคที่ไม่เคลื่อนที่ และจะถูกยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับ ดังนั้นจึงสามารถเรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้อีกว่า Immobilized Liquid Membrane (Schulz, 1988: 191-202) ซึ่งการยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวไว้ในรูพรุนจุลภาคนี้เพื่อที่จะให้เยื่อแผ่นเหลวไม่มีการเคลื่อนที่ ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพมากขึ้นเป็นเหตุให้สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสาน ซึ่งเป็นปัญหาของกระบวนการสกัด (Fernandez, Aparicio and Muhammed, 1987: 1575-1593) โดยรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับสำหรับยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวนี้โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำ (Hydrophlilic Microporous) ซึ่งเป็นรูพรุนจุลภาคที่ยอมให้เฉพาะวัฏภาคของสารละลายเท่านั้น เคลื่อนผ่านหรือฝังยึดอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคได้และรูพรุนจุลภาค

อีกชนิดหนึ่งเป็นรูพรุนจุลภาคที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Microporous) เป็นรูพรุนจุลภาคที่ยอมให้เฉพาะวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เท่านั้น เคลื่อนผ่านหรือฝังยึดอยู่ภายในรูพรุนได้

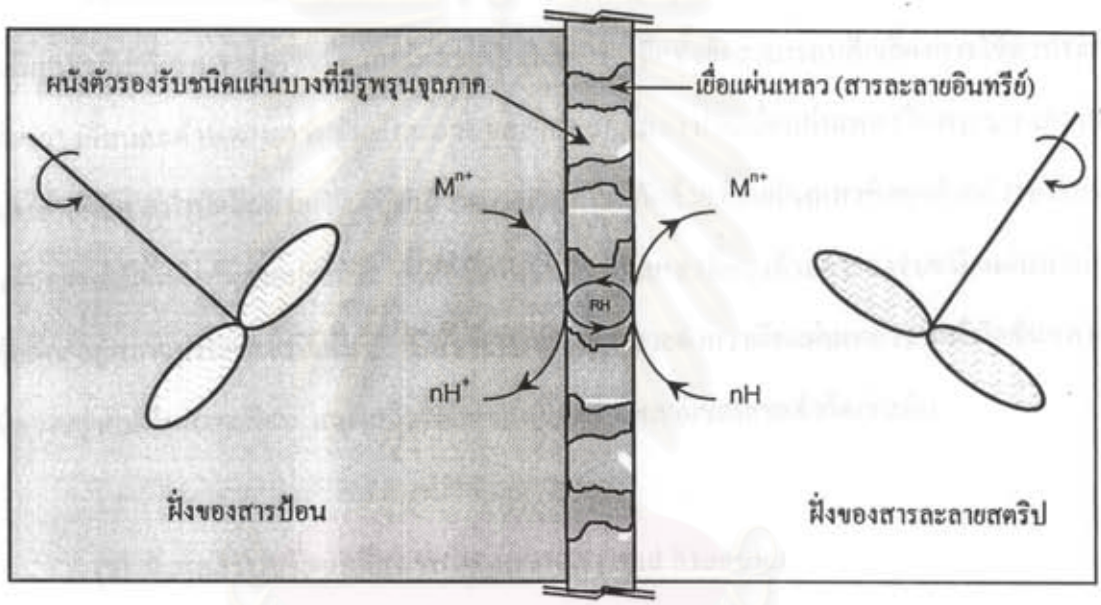
โดยเยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพยุงนี้ยังสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ตามชนิดของตัวรองรับซึ่งได้แก่ ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat Sheet) ตัวรองรับชนิดเกลียววน (Spiral-Wound Module) และตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber)

(1) ตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat Sheet)

ตัวรองรับชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ความพรุน (Porosity) สูง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทโพลีเมอร์ อาทิเช่น โพลีโพรไพลี (PP), โพลีซัลโฟลน (PF), โพลีเตรทตะฟูออโรเอททิลีน (PTFE) เป็นต้น โดยมีลักษณะของรูพรุนจุลภาคดังรูปที่ 2-7

รูปที่ 2-7 แสดงรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่ทำจาก PTFE

จากรูปที่ 2-7 รูพรุนจุลภาคซึ่งเป็นโครงสร้างของตัวรองรับชนิดแผ่นบางนี้จะเป็นแหล่งรองรับและยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวไว้ด้วยสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน (Electro Affinity), แรงแคปปิลารี (Capillary Force) และชนิดของรูพรุนจุลภาค (Hydrophilic or Hydrophobic Microporous) ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิต (Schulz, 1988: 191-202; Huang and Juang, 1987: 209-226) โดยแผ่นตัวรองรับซึ่งยึดพยุงเยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างวัฏภาคของสารป้อนและวัฏภาคของสารละลายสตริป เกิดการสกัดตามกลไกการสกัดดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง

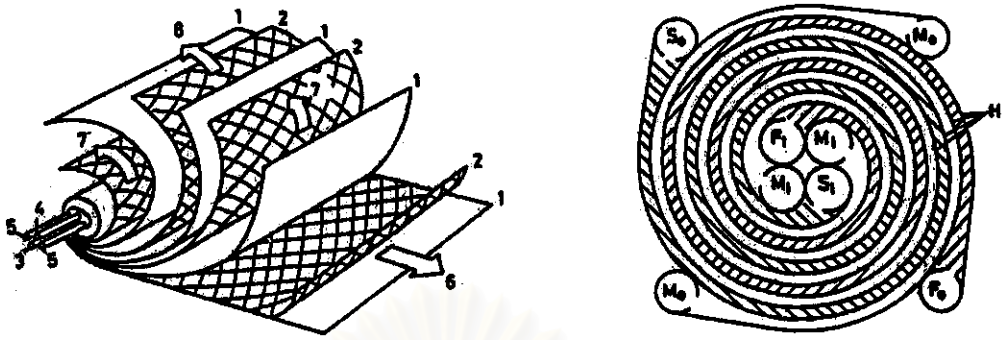
จากรูปที่ 2-8 เป็นลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางโดยที่เยื่อแผ่นเหลวเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ ในกระบวนการประกอบไปด้วย 3 วัฏภาคนั่นคือวัฏภาคของสารป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลาย, วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ และวัฏภาคของสารละลายสตริปซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายโดยมีแผ่นตัวรองรับที่มีความพรุนสูงกั้นกลางระหว่างวัฏภาคของสารป้อนกับวัฏภาคของ

สารละลายสตริป รูพรุนจุลภาคของตัวรองรับจะเป็นแหล่งยึดพยุงเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่เกิดขึ้นทั้งในฝั่งของสารป้อนกับฝั่งของสารละลายสตริปที่สัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวจะเกิดการถ่ายโอนมวลตามกลไกการสกัด และเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดจากการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลด้วยการปั่นกวนวัฏภาคของสารป้อนและวัฏภาคของสารละลายสตริป

จากกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจะถูกยึดพยุงไว้ในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับ ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน อีกทั้งยังสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสานซึ่งขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวลของไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลวในกระบวนการสกัดและยากต่อการบำบัดอีกด้วย ถึงแม้ว่ากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางจะมีข้อดีอยู่หลายประการ แต่ก็ยังพบว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางก็ยังมีข้อด้อยอยู่หลายประการอาทิเช่น มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่ำกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันหลายเท่า มีความยุ่งยากในการเตรียม และเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวมีขอบเขตจำกัดเช่นกัน

(2) ตัวรองรับชนิดเกลียววน (Spiral-Wound Module)

ตัวรองรับชนิดเกลียววนเป็นตัวรองรับที่พัฒนามาจากตัวรองรับชนิดแผ่นบางโดยการม้วนห่อตัวรองรับชนิดแผ่นบางเป็นเกลียววน เพื่อเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรให้สูงขึ้น และลดการตีกวนโดยเปลี่ยนทิศทางการไหลของสารละลายให้ไหลขนานไปกับผิวสัมผัสของตัวรองรับ ซึ่งทำให้แรงจากการไหลของของไหลไม่ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น (Teramoto et al., 1987: 2175-2201; Schulz, 1988: 191-202) ลักษณะของตัวรองรับชนิดเกลียววนและลักษณะการไหลของวัฏภาคต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2-9



a b

รูปที่ 2 - 9 แสดงลักษณะของตัวรองรับชนิดเกลียววนและแสดงการแบ่งชั้นการไหลของวัฏภาคต่างๆ โดยที่ a) เป็นรูปแสดงการม้วนห่อตัวรองรับ 1.คือตัวรองรับแบบแผ่นบางที่มีรูพรุนจุลภาค, 2.คือตะแกรงกั้น, 3.ท่อของสารป้อนไหลเข้า, 4.ท่อของสารละลายสตริปไหลเข้า, 5.ท่อของเยื่อแผ่นเหลวไหลเข้า, 6.ทิศทางการไหลของสารป้อน, 7.ทิศทางการไหลของเยื่อแผ่นเหลว, 8.ทิศทางการไหลของสารละลายสตริป และ b) เป็นรูปแสดงภาพตัดขวางแสดงชั้นของวัฏภาคต่าง ๆ โดยที่

▨ คือชั้นของสารป้อน

▨ คือชั้นของสารละลายสตริป

▭ คือชั้นของเยื่อแผ่นเหลว

เมื่อ Fi คือท่อของสารป้อนไหลเข้า, Si คือท่อของสารละลายสตริปไหลเข้า, Mi คือท่อของเยื่อแผ่นเหลวไหลเข้า, Fo คือท่อของสารป้อนไหลออก, So คือท่อของสารละลายสตริปไหลออก และ Mo คือท่อของเยื่อแผ่นเหลวไหลออก

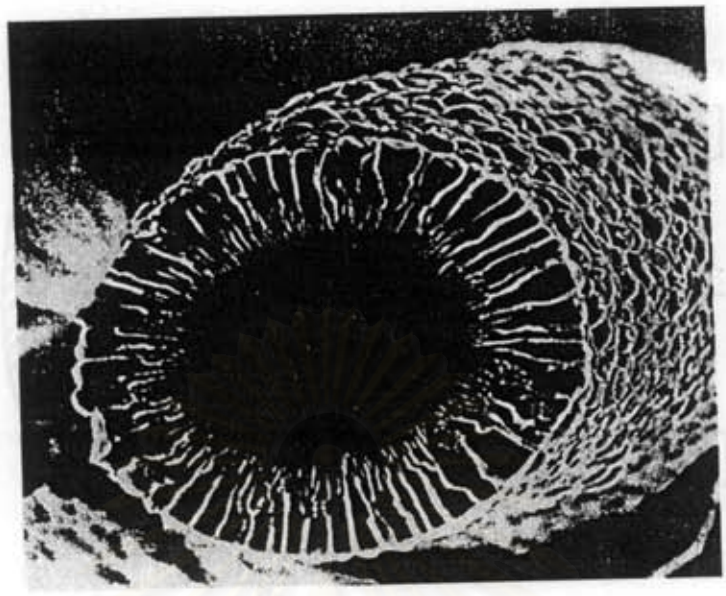
จากรูปที่ 2-9 การเรียงและม้วนห่อตัวรองรับเป็นเกลียววนนอกจากจะทำให้ความยาวของตัวรองรับเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวลแล้ว ยังสามารถเรียงซ้อนตัวรองรับเป็นชั้นๆ โดยการเรียงสลับกันเพื่อแบ่งชั้นวัฏภาคต่าง ๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนเซลล์ในการสกัด ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย (Teramoto et al., 1987: 2175-2201) ถึงแม้ว่ากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดเกลียววนนอกจากจะมีเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวได้ดีกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวได้รับการพยุงไว้และหลีกเลี่ยง

การใช้สารลดแรงตึงผิว และมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางก็ตาม ยังพบว่ากระบวนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับชนิดเกลียววนก็ยังมีข้อด้อยอยู่หลายประการอาทิเช่น มีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรต่ำกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันมาก การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวมีความยุ่งยากซับซ้อนและตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวได้ยากกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง อีกทั้งเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวก็มีอายุการใช้งานจำกัดเช่นเดียวกันกับเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง

(3) ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber)

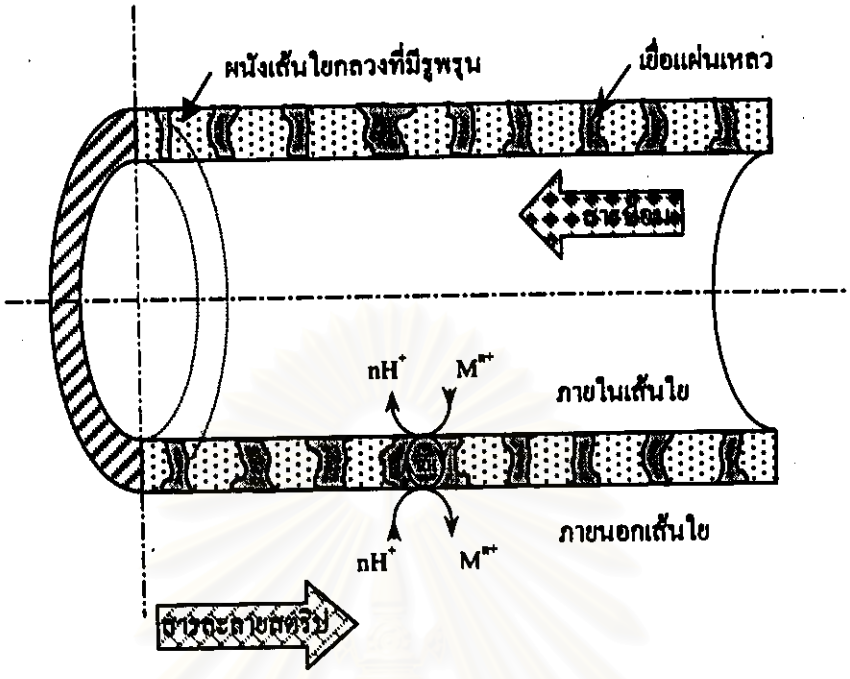
ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นตัวรองรับอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนามาจากตัวรองรับชนิดแผ่นบาง เริ่มแรกจะเป็นการม้วนห่อตัวรองรับให้มีลักษณะเป็นท่อกลม (Tubullar Tube) แต่พบว่าสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรมีค่าต่ำจึงมีการพัฒนาเป็นการใช้เส้นใยกลวงซึ่งมีขนาดเล็ก แต่ใช้เส้นใยจำนวนมากประกอบกันเป็นหน่วยเดียวกันทำให้มีสัดส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทโพลีเมอร์ซึ่งมีความพรุนสูง โดยรูพรุนจุลภาคมีลักษณะดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-10 แสดงรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง

จากรูปที่ 2-10 รูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงจะเป็นแหล่งยึดพยุงเยื่อแผ่นเหลวไว้ โดยชุดอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยเส้นใยกลวงจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวล ซึ่งชุดอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงกว่าชุดตัวรองรับชนิดอื่นๆ ที่มีขนาดเท่าๆ กัน (Jianhan and Cangmin, 1988: 87-97; Tanigaki et al., 1988: 1145-1181) แต่กระนั้นระบบการสกัดจำเป็นต้องมีการกรองแยกขั้นต้น (Prefiltration) ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อป้องกันการอุดตันภายในเส้นใยกลวงเนื่องจากเส้นใยกลวงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กมากนั่นเอง (Tanigaki et al., 1988: 1145-1181) โดยลักษณะการไหลของวัฏภาคต่างๆ ลักษณะการเกิดกลไกการสกัด และลักษณะการปฏิบัติการ โดยใช้เส้นใยกลวงแสดงได้ดังรูปที่ 2-11

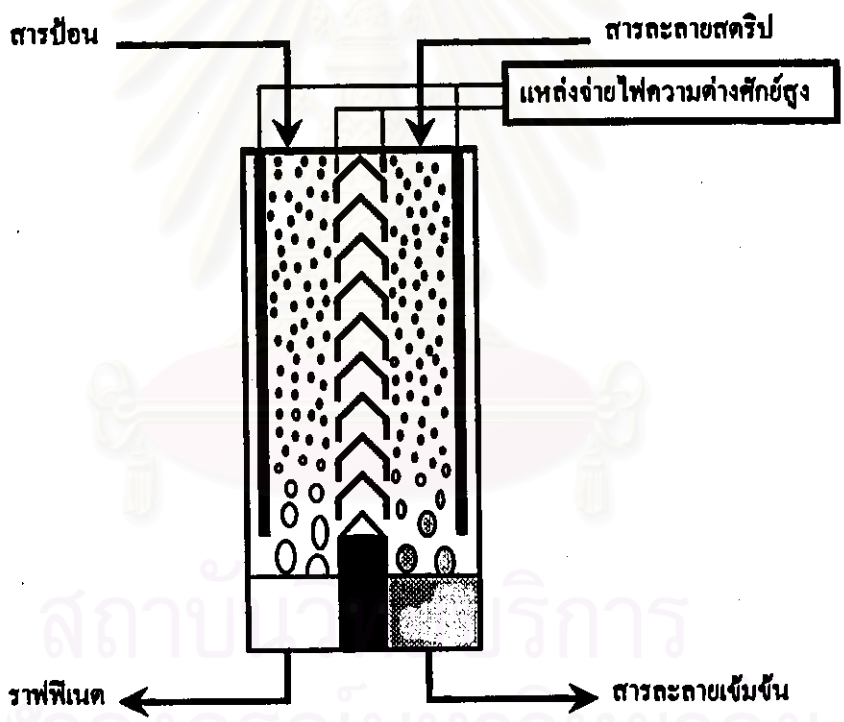


รูปที่ 2-11 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยกลวง ซึ่งแสดงลักษณะต่างๆ

จากรูปที่ 2-11 เป็นลักษณะของกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงที่มีรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับเป็นชนิดไม่ชอบน้ำ เยื่อแผ่นเหลวถูกเตรียมให้ยึดพยุงอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง สารป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายจะถูกป้อนให้ไหลภายในท่อเส้นใยกลวง และสารละลายสตริปจะถูกป้อนให้ไหลภายนอกท่อเส้นใยกลวง โดยมีลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน จากกระบวนการจะเห็นว่าเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์เมื่อถูกยึดตรึงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับของเส้นใยกลวงนั้น จะกั้นระหว่างวัฏภาคของสารป้อนกับวัฏภาคของสารละลายสตริปเช่นเดียวกันกับตัวรองรับชนิดอื่นๆ และเกิดการสกัดตามกลไกการสกัดผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของสารที่สัมผัสกัน โดยพบว่าข้อดีของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้คือเยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน, หลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเกิดเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายโอนมวลในการสกัด และมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงบนตัวรองรับชนิดอื่นที่มีขนาดเดียวกัน ซึ่งเป็นจุดเด่นของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้นั่นเอง

2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์(Electrostatic Pseudo - Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์มีการพัฒนาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลัมน์ (ชนิดหอสกัดแบบหยด), หลักไฟฟ้าสถิตย์ และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวรวมเข้าด้วยกันซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้อาทิเช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย และระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน, ความเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น (Gu, 1992: 867-884, 1990:77-88) โดยลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 แสดงลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์

จากรูปที่ 2-12 ชุดอุปกรณ์เป็นถังปฏิกรณ์ที่ทำขึ้นเป็นพิเศษ โดยถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์สตริป มีแผ่นกั้น (Buffle Plate) เป็นโลหะตัวอักษรรูปตัว V คว่ำเรียงต่อกัน เว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่ากันโดยมีลวดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอา

ไว้ อีกทั้งยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะทึบสำหรับแบ่งกั้นวัฏภาคระหว่างราฟฟิเนต (Raffinate) กับสารละลายเข้มข้น (Concentrated solution) ในเซลล์สกัดและเซลล์การนำกลับมีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มแช่อยู่ซึ่งต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ ขั้นตอนดำเนินการเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์จนได้ระดับของปริมาตรที่ต้องการ โดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี้จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ จากนั้นป้อนสารป้อนและสารละลายสตริปพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาค เกิดการสกัดแยกและสตริปออกตามกลไกการสกัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตย์เป็นปัจจัยส่งเสริมประสิทธิภาพให้มีสมรรถนะสูงขึ้น ซึ่งถังปฏิกรณ์ที่ใช้ถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่างๆ โดยหากมีหยดของสารป้อนหรือสารละลายสตริปหลุดเข้าไปในช่องของแผ่นกั้นซึ่งกั้นวัฏภาคทั้งสอง หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดวัฏภาคของสารละลายมีรูปทรงยืดยาวออก (Elongate) เป็นรูปทรงรี (Ellipsoidal Shape) เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของวัฏภาคของสารละลาย โดยเมื่อหยดของวัฏภาคของสารละลายซึ่งอยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตย์จะรวมกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาคของสารละลายกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ที่จะส่งผลให้วัฏภาคทั้งสองเคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ อีกทั้งยังมีแผ่นกั้นที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งจะส่งเสริมให้หยดของวัฏภาคที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้น ให้รวมตัวกันเองและตกกลับไปยังเซลล์ของมันตามเดิม (Gu, 1990: 77-88)

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตย์จะมีข้อดีอยู่มากมายอาทิเช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง, ปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ ต่ำ, เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและด้านทานการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่ก็ยังพบว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการอาทิเช่น ขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่าน

เยื่อแผ่นเหลว, อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรไม่สูง, วัฏภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ (Low Polarisation) และใช้กับกระบวนการที่วัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวัฏภาคต่างๆ ในขบวนการต่ำอันเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในขบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นต้น (Gu, 1992: 867-884) เทคนิคการสกัดแยกด้วยเทคนิคต่างๆ ก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งานและพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายกับเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 2-1 ดังนี้

การสกัดด้วยตัวทำละลาย		การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว	
ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
- กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน - มีกำลังการผลิตสูง - ปัญหาการปนเปื้อนต่ำ - ราคาถูก	- ใช้พลังงานสูง - ใช้สารเคมีปริมาณมาก - ประสิทธิภาพไม่สูง - มีข้อจำกัดของสมดุลระหว่างวัฏภาค - มีคุณสมบัติในการเลือกสกัดต่ำ - มีหลายขั้นตอน	- ใช้พลังงานต่ำ - เกิดการสกัดและการนำกลับอย่างต่อเนื่องเพราะรวมขั้นตอนไว้เป็นขั้นตอนเดียวกัน - มีคุณสมบัติในการเลือกสกัดสูง - ใช้สารเคมีปริมาณต่ำ - มีประสิทธิภาพสูง	- เสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวต่ำ - อายุการใช้งานต่ำ - มีการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ ง่าย - ราคาสูง - มีกำลังการผลิตต่ำ

ตารางที่ 2-1 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายกับเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

และเมื่อเปรียบเทียบข้อดีกับข้อด้อยระหว่างเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ สามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 2-2

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพยุง		เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์	
ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย	ข้อดี	ข้อด้อย
- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูงมาก - มีกำลังการผลิตมาก - มีกระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน	- ปัญหาการใช้สารสกัดแรงดึงผิวและการบำบัด - ปัญหาการปนเปื้อน - ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณสูง - ใช้พลังงานสูง	- มีประสิทธิภาพสูง - ไม่ใช้สารสกัดแรงดึงผิว - ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณต่ำ - ใช้พลังงานต่ำ	- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ - เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ - ปัญหาทางด้านอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว	- เป็นเยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูง - มีประสิทธิภาพสูงมาก - ปัญหาการปนเปื้อนต่ำ - ไม่ใช้สารสกัดแรงดึงผิว	- มีกำลังการผลิตต่ำ - สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ - ใช้กับกระบวนการที่สารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น - ปัญหาอันตรายทางด้านไฟฟ้า - ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณมาก

ตารางที่ 2-2 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

โดยในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเทคนิคการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น ใช้สารสกัดและตัวทำละลายปริมาณเพียงเล็กน้อย มีอัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง อีกทั้งยังมีศักยภาพในการพัฒนากระบวนการสกัดเพื่อสกัดแยกแร่หายาก (Rare Earth) ซึ่งเป็นโลหะวัสดุที่ทรงพลานุภาพแต่มีปริมาณต่ำในธรรมชาติ โดยในงานวิจัยจะศึกษาการสกัดแยกไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นต่ำ และพิจารณาถึงอิทธิพลของการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่างกรดอะซิติกกับโซเดียมอะซิเตตที่มีผลต่อการสกัดแยก อันเป็นข้อมูลความเป็นไปได้ในการศึกษาการสกัดแยกแร่หายากต่อไป

2.3 สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer Solution)

สารละลายบัฟเฟอร์เป็นสารละลายที่สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเมื่อเติมกรดแก่หรือด่างแก่จำนวนเล็กน้อย หรือทำให้สารละลายดังกล่าวเจือจางลง จะพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายนี้จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (Dean, 1992; ประพีร์ ผลอนันต์, 2528: 95-106; Lange and Forker, 1967) โดยในสารละลายบัฟเฟอร์จะมีองค์ประกอบหนึ่งทำหน้าที่เป็นกรดอ่อน และอีกองค์ประกอบหนึ่งทำหน้าที่เป็นเบสอ่อน ดังนั้นสารละลายบัฟเฟอร์ส่วนมากจึงประกอบไปด้วยกรดอ่อนและคู่เบสของมันละลายผสมกันอยู่เป็นสารละลายในอัตราส่วนที่แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าต่าง ๆ โดยสารละลายบัฟเฟอร์สามารถจำแนกได้ออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. บัฟเฟอร์ที่มีสภาพเป็นกรด (Acidic buffer) สารละลายบัฟเฟอร์นี้ประกอบด้วยกรดอ่อนกับเกลือของกรดอ่อน สารละลายที่ได้จะมีสภาพเป็นกรด

2. บัฟเฟอร์ที่มีสภาพเป็นด่าง (Basic buffer) สารละลายบัฟเฟอร์นี้ประกอบด้วยด่างอ่อนกับเกลือของด่างอ่อน สารละลายที่ได้จะมีสภาพเป็นด่าง

ซึ่งสารละลายบัฟเฟอร์ทั้งสองประเภทจะมีความสามารถในการรับปริมาณการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างจากการเติมกรดแก่หรือด่างแก่ได้จำนวนจำกัดโดยไม่ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลง ขึ้นอยู่กับปริมาณกรดแก่หรือด่างแก่ที่เติม, ความเข้มข้นของกรด-ด่างและเกลือที่เป็นองค์ประกอบของสารละลายบัฟเฟอร์ (ประพีร์ ผลอนันต์, 2528: 95-106) โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง โดยสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้เป็นสารละลายผสมระหว่างกรดอะซิติกซึ่งเป็นกรดอ่อนกับโซเดียมอะซิเตตซึ่งเป็นคู่เบสของมันโดยจะเกิดการแตกตัวดังสมการ

$$CH_3COOH + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + CH_3COO^- \quad \text{——} (7)$$

$$CH_3COONa \rightleftharpoons Na^+ + CH_3COO^- \quad \text{——} (8)$$

$$CH_3COO^- + H_2O \rightleftharpoons CH_3COOH + OH^- \quad \text{——} (9)$$

$$2H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + OH^- \quad \text{——} (10)$$

โดยสมการที่ 9 มีโอกาสเกิดน้อยมาก

เมื่อทำสมดุลประจุจะได้

$$[H_3O^+] + [Na^+] = [CH_3COO^-] + [OH^-] \quad \text{——} (11)$$

โดยให้ M_{NaA} เป็นความเข้มข้นของ $[CH_3COONa]$ มีหน่วยเป็น โมลต่อลิตร

M_{HA} เป็นความเข้มข้นของ $[CH_3COOH]$ มีหน่วยเป็น โมลต่อลิตร

จากสมดุลมวลสาร

$$M_{NaA} + M_{HA} = [CH_3COO^-] + [CH_3COOH] \quad \text{——} (12)$$

เนื่องจาก $M_{NaA} = [Na^+]$ ดังนั้นจากสมการที่ 11 จะได้ว่า

$$[H_3O^+] + M_{NaA} = [CH_3COO^-] + [OH^-] \quad \text{——} (13)$$

นำสมการที่ 12 ลบด้วยสมการที่ 13 จะได้

$$M_{HA} - [H_3O^+] = [CH_3COOH] - [OH^-] \quad \text{——} (14)$$

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น $[OH^-]$ น้อยมากเมื่อเทียบกับ $[CH_3COO^-]$ หรือ $[CH_3COOH]$ ทั้งนี้เพราะ OH^- เกิดจากการแตกตัวของน้ำเพียงอย่างเดียว ส่วน OH^- ที่เกิดจากปฏิกิริยาของสมการที่ 9 มีน้อยมากๆ ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาถูกกด (Suppress) ไว้ ถ้าในสารละลายมีกรดอะซิติกอยู่เป็นจำนวนมาก

จากสมการที่ 13 จะได้ $[CH_3COO^-] = M_{NaA} + [H_3O^+]$

จากสมการที่ 14 จะได้ $[CH_3COOH] = M_{HA} - [H_3O^+]$

และจากปฏิกิริยาตามสมการที่ 7 ค่าคงที่ของสมดุลปฏิกิริยา (K_a) จะเท่ากับ

$$K_a = \frac{[H_3O^+][A^-]}{[HA]} \qquad \text{——— (15)}$$

$$K_a = \frac{[H_3O^+](M_{NaA}+[H_3O^+])}{M_{HA}-[H_3O^+]} \qquad \text{——— (16)}$$

$[H_3O^+]$ น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับ M_{NaA} และ $[H_3O^+]$ น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับ M_{HA} จากสมการที่ 16 จะได้ว่า

$$K_a = [H_3O^+]\frac{M_{NaA}}{M_{HA}} \qquad \text{——— (17)}$$

$$K_a = [H_3O^+]\frac{[Salt]}{[Acid]} \qquad \text{——— (18)}$$

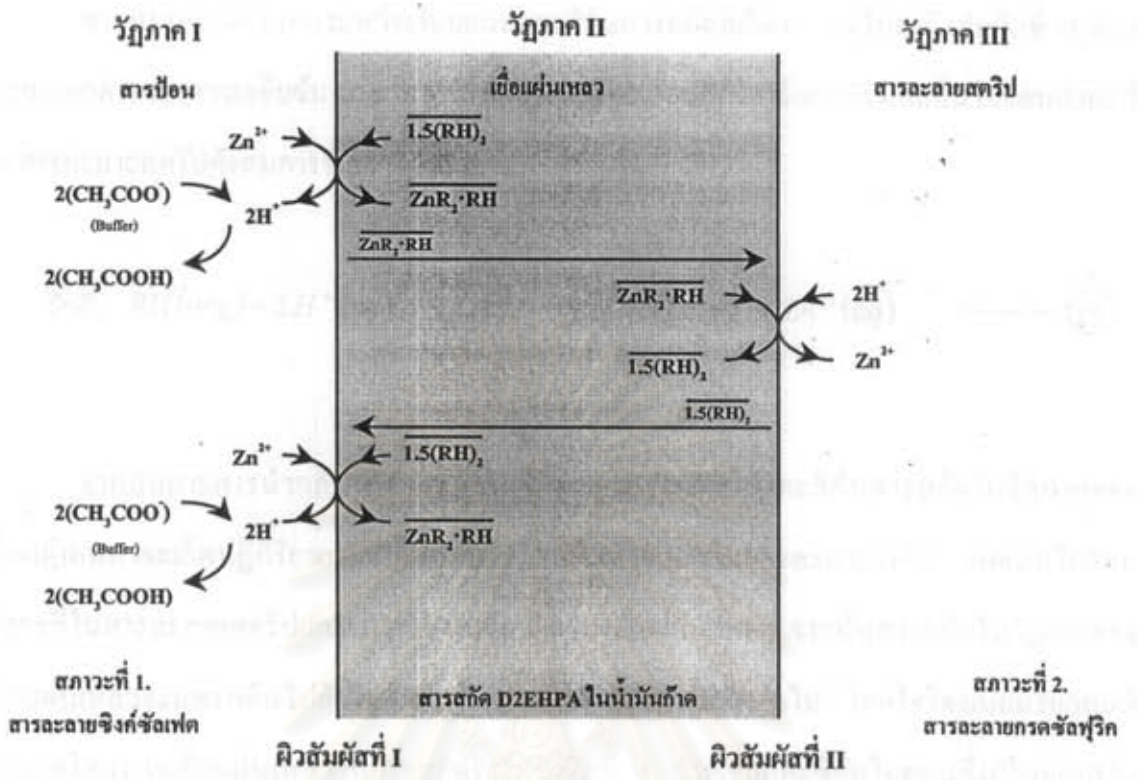
นั่นคือ

$$K_a = pK_a + \log \frac{[Salt]}{[Acid]} \qquad \text{——— (19)}$$

โดยสมการที่ 19 เป็นสมการของเฮนเดอร์สัน ฮาเซลแบช (Henderson Hasselbach) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีสภาพเป็นกรดได้โดยตรง จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายบัฟเฟอร์จะขึ้นอยู่กับค่าลอการิทึมของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างเกลือของกรดอ่อนซึ่งเป็นคู่เบสของกรดอ่อนและกรดอ่อนนั้น ดังนั้นหากปริมาณของกรดหรือด่างที่เพิ่มขึ้นในระบบ มีปริมาณไม่สูงเกินกว่าจะส่งผลให้อัตราส่วนความเข้มข้นของเกลือและกรดอ่อนเปลี่ยนแปลงไป ก็ยังผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายในระบบไม่เปลี่ยนแปลงด้วยนั้นเอง (Dean, 1992, ประพีร์ ผลอนันต์, 2528: 95-106; Lange and Forker, 1967)

เมื่อพิจารณาถึงกลไกการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวพบว่า กลไกการสกัดผ่านเยื่อแผ่นเหลวของไอออนโลหะเป็นแบบสวนทางกันกับไฮโดรเนียมไอออน ทำให้วัฏภาคของสารป้อนมีความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้นเป็นเหตุให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งเป็นแรงขับของกลไกการสกัดลดต่ำลง อีกทั้งปริมาณความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ทำการศึกษาวิจัยมีปริมาณต่ำทำให้ปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณเพิ่มขึ้นไม่มาก จึงเป็นมูลเหตุจูงใจให้ทำการศึกษาถึงผลของการใช้สารละลายบัฟเฟอร์เพื่อรักษาระดับของค่าความเป็นกรด-ด่างซึ่งเป็นแรงขับของกลไกการสกัด ทำให้ระบบมีแรงขับเพื่อดำเนินการสกัดอย่างต่อเนื่อง โดยกลไกการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวและใช้สารละลายบัฟเฟอร์เข้าร่วมดำเนินการสกัดแสดงได้ดังรูปที่ 2-13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

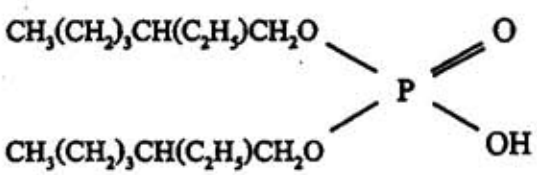


รูปที่ 2-13 แสดงกลไกการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวและใช้สารละลายบัฟเฟอร์เข้าร่วมดำเนินการสกัด

จากรูปที่ 2-13 กลไกการสกัดเริ่มขึ้นเมื่อสารป้อนสัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลว ไอออนสังกะสีบริเวณผิวสัมผัสจะถูกสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนสังกะสีกับสารสกัดที่ผิวสัมผัสที่ I ดังสมการที่ 20

$$Zn^{2+}(aq) + \overline{1.5(RH)_2}(org) \rightleftharpoons \overline{ZnR_2 \cdot RH}(org) + 2H^+(aq) \qquad (20)$$

โดยที่ RH คือสารสกัด D2EHPA ซึ่งมีโครงสร้างดังนี้



สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนสังกะสีกับสารสกัดที่เกิดจะแพร่ไปยังผิวสัมผัสที่ II ด้วยความแตกต่างของความเข้มข้น และ ณ ผิวสัมผัสที่ II นี้จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดเป็นไอออนสังกะสีในสารละลายสตริปดังสมการที่ 21

$$\overline{ZnR_2 \cdot RH}(org) + 2H^+(aq) \rightleftharpoons \overline{1.5(RH)_2}(org) + Zn^{2+}(aq) \quad \text{——— (21)}$$

จากสมการการนำกลับสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนสังกะสีกับสารสกัดในวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายสตริป เกิดเป็นไอออนสังกะสีในสารละลายสตริปและสารสกัดในวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นสารสกัดในวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะแพร่กลับไปยังผิวสัมผัสที่ I เพื่อดำเนินการสกัดต่อไป โดยไฮโดรเนียมไอออนที่ถูกถ่ายโอนผ่านเยื่อแผ่นเหลวในการสกัดที่ผิวสัมผัสที่ I นั้นจะถูกอะซิติกไอออนซึ่งเป็นคู่เบสในสารละลายบัฟเฟอร์เข้าทำปฏิกิริยาเพื่อรักษาคุณภาพของสารละลาย ทำให้ระบบยังคงมีระดับของแรงขับในการสกัดคงที่อย่างต่อเนื่องเกิดการสกัดตามกลไกผ่านเยื่อแผ่นเหลวอย่างมีประสิทธิภาพนั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย