

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

ในส่วนของบทที่ 2 นี้จะขอลำดับถึงนิยามของเยื่อแผ่น กระบวนการที่มีการนำเยื่อแผ่นไปประยุกต์ใช้ โดยทั้งนี้จะขอลำดับถึงกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้โดยละเอียด

#### 2.1 กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น

เยื่อแผ่น (Membrane) เป็นกระบวนการหนึ่งในการใช้แยกสาร เพิ่มความเข้มข้น หรือทำให้สารมีความบริสุทธิ์ยิ่งขึ้น [รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543] ซึ่งโดยนิยามของเยื่อแผ่น คือ ทำหน้าที่เป็นตัวกั้น (Barrier) ซึ่งอาจเป็นฟิล์มบางๆ หรือหยดขนาดเล็กมากกั้นระหว่างสารละลายสองวัฏภาคให้แยกออกจากกัน โดยจำกัดการถ่ายเทสารเคมีสปีชีส์ต่างๆ ให้มีความจำเพาะ ซึ่งเยื่อแผ่นหรือตัวกั้นนี้อาจเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส [Noble, 1987] นอกจากนี้เยื่อแผ่นอาจเป็นแบบเอกพันธ์ (Homogeneous) หรือวิวิธพันธ์ (Heterogeneous) มีโครงสร้างแบบสมมาตรหรืออสมมาตรก็ได้ อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า มีประจุบวกหรือลบ หรืออาจมี 2 ขั้วก็ได้ ความหนาอาจแปรผันตั้งแต่ไม่น้อยกว่า 100 นาโนเมตรจนถึงมากกว่า 1 เซนติเมตร ส่วนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นอาจเกิดขึ้นโดยกระบวนการพา (Convection) หรือการแพร่ (Diffusion) ซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้า ความแตกต่างของความเข้มข้น ความดัน หรืออุณหภูมิก็ได้

#### กระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่น

กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับเยื่อแผ่น สามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ [Rautenbach and Albercht, 1989] ได้ดังนี้

##### 1. ออสโมซิส (Osmosis)

ออสโมซิสเป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายเป็นสารที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่น โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสองฝั่งของเยื่อแผ่น ถ้าปล่อยให้ระบบดำเนินการไปเรื่อยๆ โดยไม่มีการรบกวนระบบ เช่น การดึงตัวทำละลายออก ระบบจะเข้าสู่สมดุลที่เรียกว่า สมดุลออสโมติก (Osmotic equilibrium) ซึ่งจะเกิดผลต่างของความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure) ขึ้น

ซึ่งที่จุดนี้ฟลักซ์สุทธิของตัวทำละลายจะเท่ากับศูนย์ ความดัน ณ จุดนี้เรียกว่าความดันออสโมติก (Osmotic pressure) และถ้าให้ความดันมากกว่าความดันออสโมติกแก่ด้านที่ตัวทำละลายถูกถ่ายเทมา ตัวทำละลายจะสามารถถ่ายเทไปสู่อีกด้านหนึ่งได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ออสโมซิสผันกลับ

## 2. ออสโมซิสผันกลับ และอัลตราฟิลเตรชัน (Reverse osmosis and Ultrafiltration)

ออสโมซิสผันกลับหรืออาจเรียกว่าไฮเปอร์ฟิวเตรชัน (Hyperfiltration) เป็นกระบวนการที่ต้องใช้ความดันเป็นแรงขับ โดยที่ความดันต้องมีค่ามากกว่าความดันออสโมติก ซึ่งปกติแล้วกระบวนการออสโมซิสผันกลับจะต้องใช้ความดันสูงถึง 80 บาร์ และสามารถกรองอนุภาคขนาด  $10^{-3}$  ไมครอนได้ แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น (ประมาณ  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  ไมครอน) หรือเป็นอนุภาคที่มีค่าความดันออสโมติกน้อยๆ ความดันที่ใช้จะลดลงมาก คือเหลือประมาณ 2-10 บาร์ จะเรียกกระบวนการนี้ว่า อัลตราฟิลเตรชัน

ตัวอย่างการประยุกต์กระบวนการออสโมซิสผันกลับ คือ การทำน้ำจืดจากน้ำทะเล หรือน้ำกร่อย การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ การผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง และการบำบัดน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เป็นต้น ส่วนอัลตราฟิลเตรชันมีการประยุกต์ใช้ในงานหลักๆ คือ การแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นโปรตีน คอลลอยด์ การบำบัดน้ำทิ้ง ทำน้ำให้บริสุทธิ์ และการทำให้น้ำผลไม้ใส เป็นต้น

## 3. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)

เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนค่อนข้างใหญ่ ( $0.1$ - $10\mu\text{m}$ ) แยกโมเลกุลใหญ่ๆ สารแขวนลอย หรืออนุภาคเล็กๆ ออกจากของเหลวโดยมีความดันเป็นแรงขับ ซึ่งใช้ความดันต่ำกว่ากระบวนการออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน คืออยู่ในช่วง 100-500 kPa (1-5 atm) ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันมี 2 แบบ คือ ลักษณะ dead-end ซึ่งสารละลายป้อนจะไหลตั้งฉากกับเยื่อแผ่น แต่จะเกิดปัญหาในการสะสมของเค้ก (Cake) บนเยื่อแผ่น ส่วนแบบที่สองเป็นลักษณะการไหลแบบ cross flow ซึ่งสารละลายป้อนจะไหลขนานไปกับเยื่อแผ่น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการสะสมของเค้กบนผิวเยื่อแผ่นได้

การประยุกต์ใช้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง อาทิเช่น การบำบัดน้ำทิ้ง ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม และใช้ในเทคโนโลยีชีวภาพโดยอาจร่วมกับกระบวนการแยกเซลล์ในกระบวนการหมัก

#### 4. ไดอะไลซิส

เป็นการกรองสารละลายที่มีอนุภาคขนาดเล็ก โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างสองด้านของเยื่อแผ่นเป็นแรงขับ ซึ่งตัวถูกละลายขนาดเล็กจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นจากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ดังนั้นจึงสามารถแยกตัวถูกละลายขนาดเล็กออกจากตัวถูกละลายขนาดใหญ่ได้

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กระบวนการไดอะไลซิส อาทิเช่น ใช้เยื่อแผ่นเซลโลเฟน (Cellophane) แยกเกลือและตัวถูกละลายขนาดเล็กออกจากโปรตีนและเซรุ่มวัคซีน และมีการนำไปใช้ในทางการแพทย์คือ การฟอกเลือดด้วยไตเทียม ส่วนการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังมีไม่มากนัก เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ เป็นกระบวนการที่ช้าเนื่องจากใช้ผลต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับ และการเลือกสกัดของเยื่อแผ่นมีค่าต่ำ คือไม่สามารถแยกโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกันได้

#### 5. อิเล็กโตรไดอะไลซิส

อิเล็กโตรไดอะไลซิสเป็นการแยกองค์ประกอบที่มีประจุ (ไอออน) จากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ มีลักษณะเฉพาะอยู่ 2 ประการด้วยกันคือ เยื่อแผ่นที่ใช้ต้องมีความจำเพาะต่อไอออน (Ion-selective membrane) และมีการประยุกต์สนามไฟฟ้าเพื่อใช้ในการแยก โดยกระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิสอาจใช้เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Anion-selective membrane) หรือเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Cation-selective membrane) เพียงชุดเดียวหรืออาจใช้หลายชุดวางสลับกันก็ได้ การดำเนินการจะใช้เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนต่ออนุกรมกัน และอยู่ระหว่างขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) ซึ่งใช้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดเป็นแรงขับร่วมกับการเลือกผ่านไอออนของเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการแยกโดยไอออนบวกจะผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนบวก ส่วนไอออนลบจะผ่านเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนลบ ทำให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูงและสารละลายเจือจาง

การประยุกต์ใช้งานของกระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส อาทิเช่น การผลิตน้ำดื่มจากน้ำทะเล การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเกลือ กำจัดแร่ธาตุในเวย์ (Whey) และการบำบัดน้ำเสีย เช่น การแยกและนำกลับไอออนโลหะจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ (Electroplating) เป็นต้น

## 6. กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว

เป็นกระบวนการที่ของเหลว อาทิเช่น ตัวทำละลายอินทรีย์สามารถก่อตัวเป็นตัวกันที่ความจำเพาะระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายอีกชนิด ดังนั้นเยื่อแผ่นจึงมีหน้าที่ 2 ประการคือ แยกสารละลายทั้งสองไม่ให้ผสมกันและเลือกผ่านเฉพาะตัวถูกละลายที่ต้องการ กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวอาจอยู่ในรูปชั้นของของเหลวโดยตรง ในรูปของอิมัลชัน หรือถูกพุงด้วยโพลิเมอร์ในลักษณะต่างๆ เช่น แผ่นบาง เส้นใยกลวง หรือเส้นใยม้วน เป็นต้น ส่วนกลไกการเลือกผ่านสารสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลไก คือ อาศัยความสามารถในการละลาย และอาศัยตัวพาหรือสารสกัด โดยรายละเอียดในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแสดงดังหัวข้อ 2.2

## 7. กระบวนการแยกแก๊สด้วยเยื่อแผ่น

เยื่อแผ่นสามารถใช้ในกระบวนการแยกแก๊สผสมได้ อาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นหรือความดันเป็นแรงขับ กระบวนการแยกแก๊สด้วยเยื่อแผ่น แบ่งเป็น 2 แบบ แบบแรกคือ แก๊สเพอมีเอชัน (Gas permeation, GP) ซึ่งโมเลกุลของแก๊สจะผ่านเยื่อแผ่นแบบแน่น (Dense membrane) หรือไม่มีรูพรุน โดยอาศัยกลไกการละลายและการแพร่ ซึ่งอาศัยความดันหรือความดันย่อยเป็นแรงขับ ซึ่งความแตกต่างของความเข้มข้นจะใช้กลไกที่อาศัยตัวพาเหมือนกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว ส่วนแบบที่สองคือ แก๊สดิฟฟิวชัน (Gas diffusion, GD) เป็นการแยกแก๊สด้วยเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดเล็ก แรงขับที่ใช้อาจเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อยก็ได้ ส่วนการแยกที่อาศัยความแตกต่างของความดันจะขึ้นอยู่กับลักษณะการดูดซับและอัตราการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่เท่ากันของสปีชีส์ต่างๆ ในของผสม

ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้แก๊สเพอมีเอชัน อาทิเช่น การแยกฮีเลียม ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสม และการประยุกต์ใช้แก๊สดิฟฟิวชัน อาทิเช่น การเพิ่มความเข้มข้นไอโซโทปของยูเรเนียม เป็นต้น

## 8. เพอเวปพอเรชัน

กระบวนการนี้แตกต่างจากกระบวนการอื่น คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงชั้นระหว่างการดำเนินการ และแรงขับที่ใช้ในกระบวนการนี้ไม่ใช่การใช้ความดันเหมือนกระบวนการอื่น แต่เป็นการลดความดันย่อยของด้านเพอมีเอท โดยการทำให้เป็นสุญญากาศ และเมื่อความดันย่อยของด้านเพอ

มีเอทต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวของสปีซีใดสปีซีหนึ่ง สปีซีนั้นจะระเหยกลายเป็นไอทันทีที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นมายังผิวของด้านเพอมีเอท

เยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการเพอแวกพอเรชันอาจเป็นเยื่อแผ่นชอบน้ำ (Hydrophilic membrane) ซึ่งจะเลือกผ่านน้ำมากกว่าสารอินทรีย์ หรือถ้าเป็นเยื่อแผ่นไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic membrane) จะเลือกผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่จึงเป็นการแยกน้ำ (Dehydration) เพื่อผลิตสารอินทรีย์ อาทิเช่น แอลกอฮอล์ความเข้มข้นสูง หรือการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์เจือจาง เป็นต้น นอกจากนี้กระบวนการเพอแวกพอเรชันถือว่าเป็นทางเลือกหนึ่งของการแยกของผสมอะซีโอโทรปิก (Azeotropic mixtures) แทนกระบวนการกลั่น

ตารางที่ 2.1 กระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่น [Rautenbach and Albercht, 1989]

| กระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่น    | ความสามารถในการแยก                                   | แรงขับเคลื่อน                           | สารที่ผ่าน          |
|-----------------------------|--|---|---------------------|
| ออสโมซิสผันกลับ             | สารละลายเอควียสที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก                  | ความแตกต่างของความดัน ( $\leq 100$ bar) | ตัวทำละลาย          |
| อัลตราฟิลเตรชัน             | สารละลายระหว่างเอควียสกับสารอินทรีย์                 | ความแตกต่างของความดัน ( $\leq 10$ bar)  | ตัวทำละลาย          |
| ไมโครฟิลเตรชัน (cross-flow) | สารแขวนลอย อิมัลชัน                                  | ความแตกต่างของความดัน ( $\leq 5$ bar)   | วัฏภาคต่อเนื่อง     |
| แก๊สเพอมีเอชัน              | แก๊สผสม<br>water vapor-gas mixtures                  | ความแตกต่างของความดัน ( $\leq 80$ bar)  | สารที่ผ่านได้ดี     |
| เพอแวกพอเรชัน               | สารผสมอินทรีย์<br>สารผสมระหว่างเอควียสกับสารอินทรีย์ | ความแตกต่างของความเข้มข้น               | สารที่ผ่านได้ดี     |
| เยื่อแผ่นเหลว               | สารละลายเอควียสที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก                  | ความแตกต่างของความเข้มข้น               | ตัวถูกละลาย (ไอออน) |
| ออสโมซิส                    | สารละลายเอควียส                                      | ความแตกต่างของความเข้มข้น               | ตัวทำละลาย          |
| ไดอะไลซิส                   | สารละลายเอควียส                                      | ความแตกต่างของความเข้มข้น               | ตัวถูกละลาย (ไอออน) |
| อิเล็กโตรไดอะไลซิส          | สารละลายเอควียส                                      | สนามไฟฟ้า                               | ตัวถูกละลาย (ไอออน) |

จากข้างต้นสามารถสรุปความสามารถของกระบวนการที่มีการนำเยื่อแผ่นไปใช้ได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำเยื่อแผ่นมาใช้ในกระบวนการแยกนั้นมีข้อดีเหนือกว่าวิธีการแยกอื่นๆ

อาทิเช่น ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง มีขนาดของเครื่องมือกะทัดรัด และสามารถขยายขนาดเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ไม่ยากโดยสามารถดำเนินการได้ทั้งแบบกะ (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) นอกจากนี้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิปกติ จึงเหมาะสำหรับการแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ และสามารถใช้กับสารละลายที่ไวต่ออุณหภูมิได้ โดยไม่ทำให้องค์ประกอบหรือโครงสร้างทางเคมีเสียหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตอาหารและยา

## 2.2 เยื่อแผ่นเหลว

เทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลว เป็นกระบวนการที่มีการสกัดและนำกลับเกิดขึ้นพร้อมกัน [Marr and Kopp, 1982] พัฒนามาจากกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) โดยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจะประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มของเหลว ซึ่งมีความจำเพาะในการถ่ายเทมวลของแก๊ส ไอออน หรือโมเลกุล ที่เกิดจากกระบวนการซึมผ่าน (Permeation) และการถ่ายเท การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวนี้อาจมีข้อดีเหนือกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายคือ ใช้พลังงานต่ำเนื่องจากสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิห้อง เกิดการสกัดและนำกลับได้อย่างต่อเนื่องเพราะรวมขั้นตอนการสกัดและนำกลับไว้ในขั้นตอนเดียวกัน มีคุณสมบัติในการเลือกสกัดสูง ใช้สารเคมีปริมาณต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง

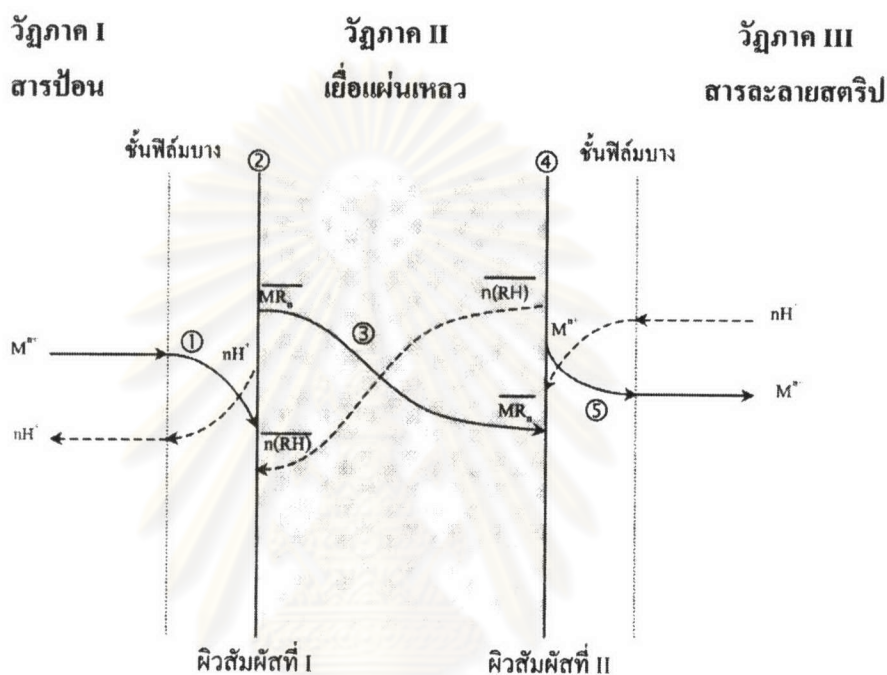
กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วยของเหลว 3 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคสารละลายป้อน ซึ่งจะมีส่วนประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ วัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะมีสารสกัดละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ และวัฏภาคสารละลายสตริบซึ่งทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากการถ่ายเทมาจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลว โดยวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นวัฏภาคที่กั้นระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายสตริบ ดังนั้นวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวที่ดีนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคสารละลายเอเควียส มีชั้นฟิล์มที่บาง และมีความเสถียร

### 2.2.1 กลไกการถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวลในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นการถ่ายเทแบบคู่ควบ (Couple transport) คือ มีการถ่ายเทมวลของไอออนสองชนิดเกิดขึ้นพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว โดยการถ่ายเทมวลแบบคู่ควบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ตามชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับสารสกัด [Porter, 1990] ได้ดังนี้

### 2.2.1.1 การถ่ายเทแบบสวนทาง (Counter-Transport)

เป็นการถ่ายเทที่ไอออนทั้งสองแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวในทิศทางตรงกันข้ามกัน เกิดขึ้นเมื่อไอออนที่ต้องการสกัดมีประจุบวก ( $M^{n+}$ ) และสารสกัดที่ใช้เป็นกรด (RH) ซึ่งกลไกการสกัดและนำกลับแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบสวนทาง [วีรวุฒิ ปัตทวิคองคา, 2542]

จากรูปที่ 2.1 กลไกการสกัดไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลว มี 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ไอออนโลหะจากสารละลายป้อน ( $M^{n+}$ ) เคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มบางไปสู่ผิวบริเวณสัมผัสที่ I ซึ่งเป็นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลว ด้วยแรงขับจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะ (Concentration gradient)

ขั้นตอนที่ 2 ไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสที่ I จะทำปฏิกิริยากับสารสกัด (RH) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะ ( $MR_n$ ) และไฮโดรเนียมไอออน ( $H^+$ ) ซึ่งปฏิกิริยาการสกัดแสดงดังสมการที่ (2.1)



ขั้นตอนที่ 3 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะที่เกิดขึ้น ณ บริเวณผิวสัมผัสที่ I จะแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปสู่ผิวสัมผัสที่ II ด้วยแรงขับจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน

ขั้นตอนที่ 4 สารประกอบเชิงซ้อนที่บริเวณผิวสัมผัสที่ II จะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับทำให้ไอออนโลหะถูกปล่อยออกมายังสารละลายสตริป เกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่เสถียรกับสารละลายสตริป ส่วนสารสกัดจะแพร่กลับไปยังผิวสัมผัสที่ I ด้วยแรงขับจากความแตกต่างของความเข้มข้น และเกิดปรากฏการณ์นี้ซ้ำไปซ้ำมา ปรากฏการณ์การนำกลับไอออนโลหะแสดงดังสมการที่ (2.2)



ขั้นตอนที่ 5 ไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสที่ II จะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางไปสู่กระแสของสารละลายสตริปด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ถูกสตริปออกมา

จากกลไกข้างต้น กระบวนการสกัดและนำกลับไอออนโลหะจะเกิดปรากฏการณ์ซ้ำไปซ้ำมาอย่างต่อเนื่อง อันเนื่องมาจากแรงขับของความแตกต่างของความเข้มข้น (pH gradient) ซึ่งเป็นสภาวะในการดำเนินการ และความแตกต่างของความเข้มข้น

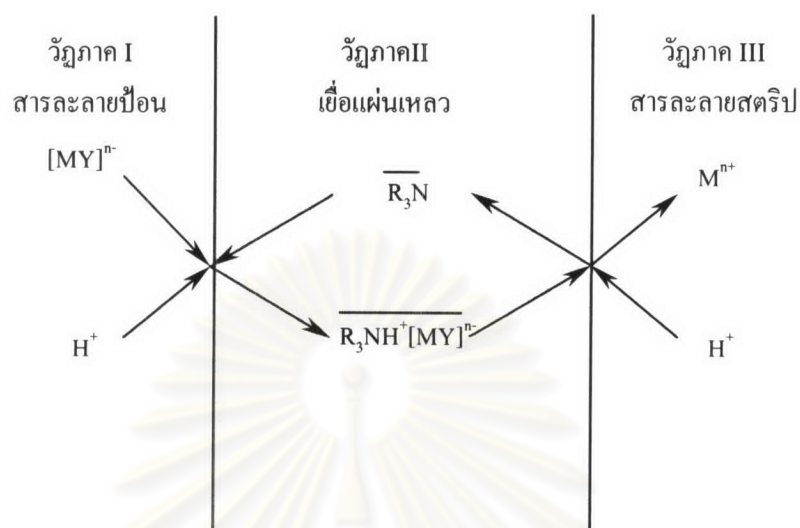
### 2.2.1.2 การถ่ายเทแบบทางเดียวกัน (Co-Transport)

การถ่ายเทลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่เป็นเบส ( $R_3N$ ) และสารละลายสตริปที่เป็นเบสเช่นกัน โดยที่ไอออนของโลหะในรูปประจุลบ  $[MY]^-$  และไฮโดรเนียมไอออน ( $H^+$ ) จะเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งกลไกการสกัดและนำกลับแสดงดังรูปที่ 2.2

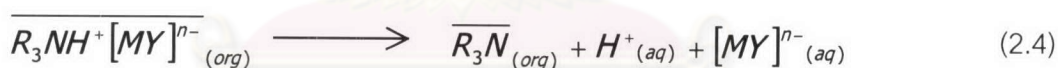
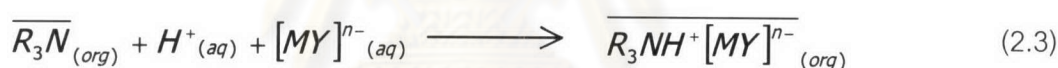
ในการเกิดปฏิกิริยาการสกัดนั้น ทั้งไอออนโลหะที่อยู่ในรูปประจุลบและไฮโดรเนียมไอออนที่อยู่ในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัด  $R_3N$  ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน  $R_3NH^+[MY]^-$  ดังสมการที่ (2.3) และจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสนี้ สารประกอบเชิงซ้อน  $R_3NH^+[MY]^-$  จะเกิดปฏิกิริยานำกลับเกิด



เป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับดังสมการที่ (2.4) และได้สารสกัด  $R_3N$  กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว [ประกร รามกุล, 2544]



รูปที่ 2.2 กลไกการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบทางเดียวกัน



สารสกัด  $R_3N$  ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับครั้งที่หนึ่งแล้วนั้นจะแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกครั้ง เพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนต่อไปอีก วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป

### 2.2.2 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลว

รูปแบบการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลว สามารถแบ่งได้เป็นลักษณะใหญ่ๆ ได้ 3 ลักษณะคือ เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane) เยื่อแผ่นที่ได้รับการพอง (Supported Liquid Membrane) และเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Pseudo-Liquid Membrane) ซึ่งเยื่อแผ่นเหลวแต่ละชนิดมีการดำเนินการและรายละเอียด ดังนี้

### 2.2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane, ELM)

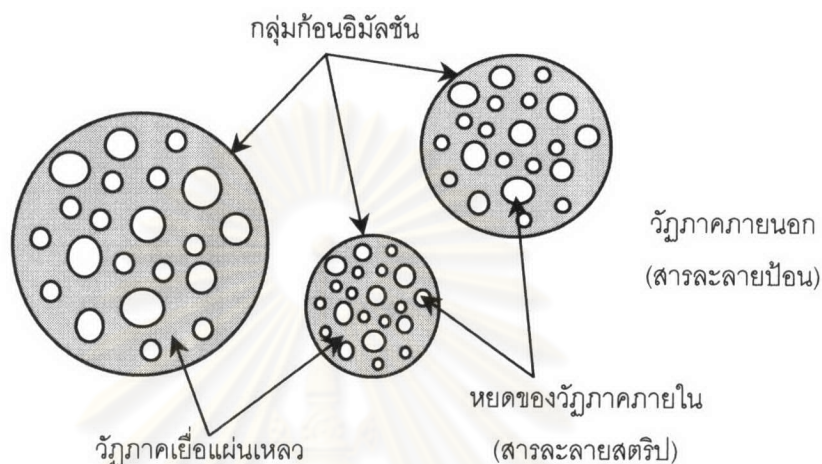
กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน หรือ Liquid Surfactant Membrane หรือ Mobilized Liquid Membrane เป็นเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้พื้นฐานการสกัดด้วยตัวทำละลาย แต่กระบวนการนี้จะเป็นการรวมขั้นตอนการสกัดและนำกลับไว้ในขั้นตอนเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถแยกสารที่ต้องการและทำให้เข้มข้นขึ้นได้ในเวลาเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีอัตราการแลกเปลี่ยนถ่ายโอนมวลสูงเนื่องจากเม็ดอิมัลชันมีขนาดเล็กจึงทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการแลกเปลี่ยนสูง สามารถสกัดสารออกจากสารละลายที่มีความเจือจางมากๆ และใช้พลังงานต่ำ

การประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันเริ่มต้นในปลายทศวรรษที่ 1960 เมื่อ Li และคณะได้จดสิทธิบัตร (Patented) ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันสำหรับการกำจัดเกลือ (Desalination) ในระดับอุตสาหกรรม และการแยกไฮโดรคาร์บอน [Araki and Tsukube, 1990] กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันประกอบด้วยวัฏภาคสำคัญ 3 วัฏภาคดังนี้

- 1) วัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) หรือวัฏภาคภายนอก (External phase) เป็นวัฏภาคของสารละลายป้อนซึ่งมีสารที่เราต้องการละลายอยู่
- 2) วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว หรือวัฏภาคน้ำมัน (Oil phase) ประกอบไปด้วยตัวทำละลาย สารละลายอินทรีย์ สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และสารสกัด วัฏภาคนี้ทำหน้าที่ถ่ายโอนสารที่ต้องการจากวัฏภาคภายนอกไปเก็บอยู่ในวัฏภาคภายใน
- 3) วัฏภาคภายใน (Internal phase) เป็นวัฏภาคของสารละลายสตริปทำหน้าที่กักเก็บสารที่ต้องการซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวมา เกิดเป็นวัฏภาคของสารละลายผลิตภัณฑ์ที่เข้มข้น

ในกระบวนการสกัดและนำกลับด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันจะเริ่มต้นจากการเตรียมอิมัลชัน ซึ่งเป็นอิมัลชันระหว่างวัฏภาคที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน นั่นคือวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคภายใน โดยนำวัฏภาคทั้งสองกวนด้วยความเร็วรอบสูงๆ และเพื่อรักษาสภาพความคงตัวของอิมัลชันตลอดกระบวนการสกัด ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารลดแรงตึงผิวหรือตัวประสาน (Emulsifier) อิมัลชันที่เตรียมควรจะมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากยิ่งเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเท่าใดพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของทรงกลมจะยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลมากขึ้น และเพื่อรักษาสภาพความคงตัวของอิมัลชันที่เหมาะสมในการสกัด เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดของสารละลายของวัฏภาคภายในที่อยู่ในอิมัลชันควรมีขนาด 1-3  $\mu\text{m}$  ในขณะที่อิมัลชันกระจาย

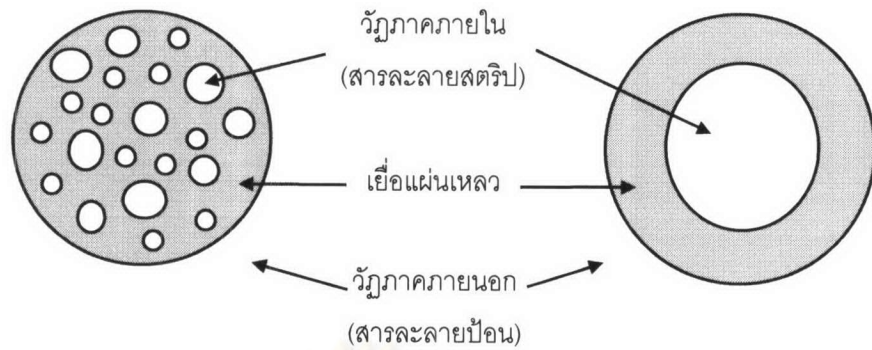
ตัวอยู่ในวิภาคภายนอก โดยการกวนทำให้เกิดกลุ่มก้อน (Globule) ขนาดเล็กๆ ของอิมัลชันจะต้องควบคุมให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มก้อนให้อยู่ในช่วง 100-200  $\mu\text{m}$  ทั้งนี้ขนาดดังกล่าวขึ้นอยู่กับความแรงของการกวน ความหนืดของสารละลายทั้ง 2 ชนิดที่เกิดเป็นอิมัลชัน และความเข้มข้นของตัวประสาน ลักษณะการกระจายของกลุ่มอิมัลชันแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะการกระจายของกลุ่มอิมัลชัน

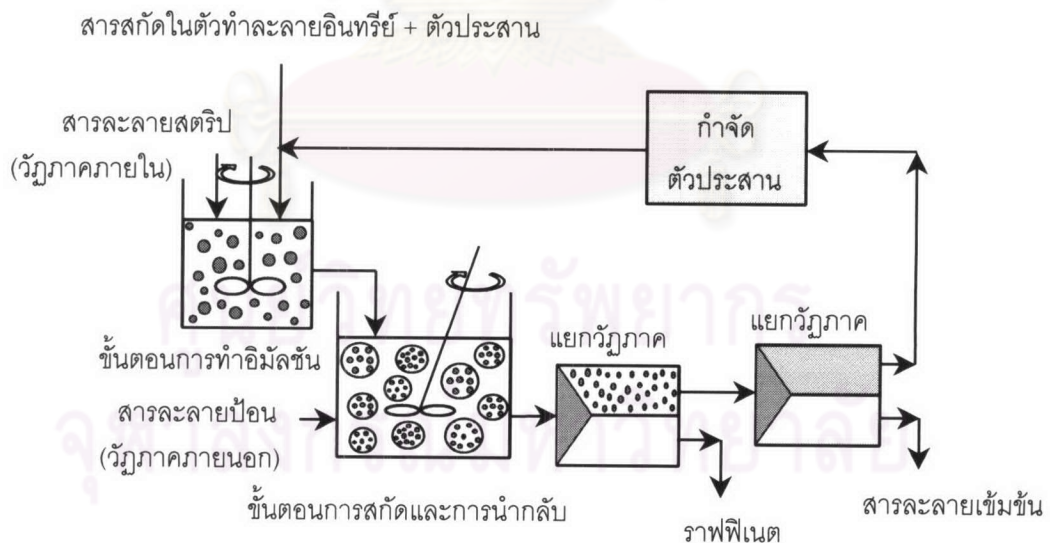
เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ w/o/w (Water-in-oil-in-water) เมื่อวิภาคภายในเป็นสารละลายเอเคียส และ o/w/o (Oil-in-water-in-oil) เมื่อวิภาคภายในเป็นสารละลายอินทรีย์ ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงมี 2 ชนิดเช่นเดียวกัน คือ ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic surfactant) และชนิดไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surfactant) โดยการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการนำเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันมาประยุกต์ใช้ เพราะถ้าใช้มากเกินไปจะเป็นการเพิ่มความต้านทานในการถ่ายโอนมวลที่ผิวสัมผัสกับวิภาคภายในและภายนอก และยังทำให้อิมัลชันคงตัวมากซึ่งยากที่จะแยกออกจากกันได้

จากข้างต้นเมื่อได้อิมัลชันแล้วจะมีการนำไปสัมผัสกับสารละลายป้อนด้วยเครื่องปั่นกวน (Mixer) เกิดเป็นอิมัลชันเชิงซ้อน (Double emulsion) ขึ้น ลักษณะของอิมัลชันเชิงซ้อนแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ก. หยอดอิมัลชันที่เกิดขึ้นจริง ข. หยอดอิมัลชันในอุดมคติ

ปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันจะเกิดขึ้นโดยการถ่ายโอนมวลจากการปั่นกววน หลังจากนั้นจะยุติการกววนเพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างกราฟิเน็ตกับอิมัลชัน หลังจากนั้นจะนำอิมัลชันที่มีตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดไปบำบัดต่อไป การบำบัดเป็นการแตกอิมัลชัน เพื่อนำตัวถูกละลายที่สกัดได้ในสารละลายสตรีปไปใช้งาน และนำสารละลายเยื่อแผ่นไปใช้ในการเตรียมอิมัลชันขึ้นมาใหม่ กระบวนการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการดำเนินการด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน

แม้ว่าในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันจะใช้สารลดแรงตึงผิวหรือตัวประสานเพื่อรักษาเสถียรภาพของหยดอิมัลชัน แต่พบว่าสารลดแรงตึงผิวหรือตัวประสานที่ใช้จะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มรอบหยดอิมัลชัน ทำให้เกิดการขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวล ทำให้อัตรา

การถ่ายโอนมวลต่ำ แม้ว่าสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรมีค่าสูงมากก็ตาม อีกทั้งขั้นตอนการแยกตัวออกจากกันกระทำได้อย่างง่ายซึ่งต้องใช้วิธีการกำจัดตัวประสาน (Demulsifier) โดยการบำบัดแยกตัวประสานมี 2 วิธี คือ การบำบัดทางเคมีด้วยการเติมสารลดตัวประสาน (Demulsifier) วิธีนี้แม้จะมีประสิทธิภาพ แต่ทำให้สมบัติของของเหลวในระบบเปลี่ยนไป ทำให้ไม่สามารถนำสารละลายเยื่อแผ่นมาใช้ได้ใหม่ ส่วนวิธีที่สองคือ การบำบัดทางกายภาพ โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (Electrostatic coalescer) แม้วิธีนี้จะไม่ทำให้คุณสมบัติของของเหลวเปลี่ยนแปลง แต่อุปกรณ์มีความยุ่งยาก ราคาแพง และมีอันตราย เพราะขั้นตอนการแยกตัวประสานที่ยุ่งยาก และอาจเกิดปัญหาการรั่วของอิมัลชัน ทำให้เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันนี้ไม่สามารถพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมได้เท่าที่ควร

### 2.2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพยุง (Supported Liquid Membrane, SLM)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้วัสดุภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นวัสดุภาคที่ไม่เคลื่อนที่ และจะถูกยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับด้วยแรงแคปิลลารี (Capillary force) [Marr and Copp, 1982; Schulz, 1988] ดังนั้นจึงสามารถเรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้ว่า Immobilized Liquid Membrane ซึ่งการยึดตรึงเยื่อแผ่นเหลวเพื่อไม่ให้เคลื่อนที่ไว้ภายในรูพรุนจุลภาคทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวประสานซึ่งเป็นปัญหาในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน โดยรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic microporous) ซึ่งเป็นรูพรุนจุลภาคที่ยอมให้เฉพาะวัสดุภาคที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือฝังยึดอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคเท่านั้น ส่วนรูพรุนจุลภาคอีกชนิดคือ รูพรุนจุลภาคที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic microporous) ซึ่งเป็นรูพรุนจุลภาคที่ยอมให้เฉพาะวัสดุภาคของสารละลายอินทรีย์เคลื่อนผ่านหรือฝังยึดอยู่ภายในรูพรุนจุลภาคเท่านั้น

เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพยุงนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ตามลักษณะของตัวรองรับ ได้แก่ ตัวรองรับแบบแผ่นบาง (Flat sheet) ตัวรองรับแบบเกลียววน (Spiral-wound) และตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

#### 2.2.2.2.1 ตัวรองรับแบบแผ่นบาง

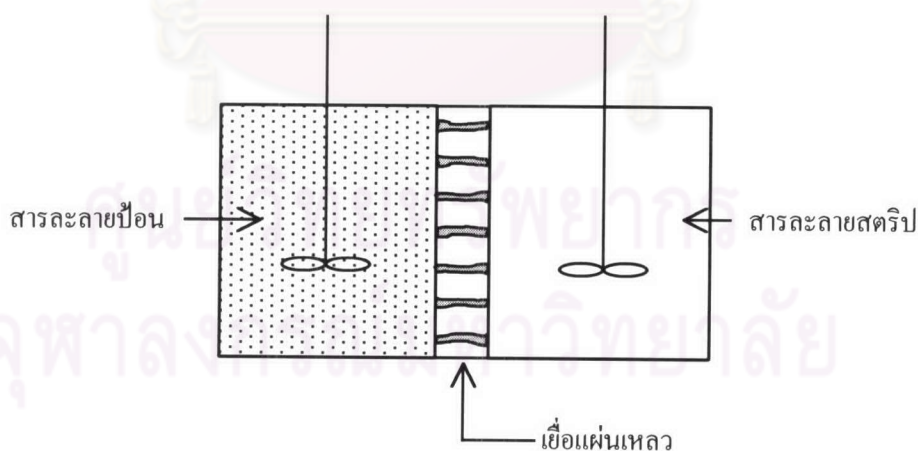
ตัวรองรับชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความพรุน (Porosity) สูง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ อาทิเช่น พอลิพรอพิลีน พอลิซิลิโคน พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน เป็นต้น ลักษณะรูพรุน

จุลภาคของตัวรองรับแบบแผ่นบางโดยแผ่นรองรับที่ทำจากพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปพจนจุลภาคของตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่ทำจากพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบแผ่นบางจะซึ่งยึดพุงเยื่อแผ่นเหลวจะกั้นกลางระหว่างวัฏภาคของสารละลายป้อนกับสารละลายสตริป โดยเยื่อแผ่นเหลวจะถูกเคลือบฝัง (Impregnate) ภายในรูปพจนด้วยสัมพรรคภาพของอิเล็กตรอน (Electron affinity) และแรงแคปิลารี ลักษณะกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับชนิดแผ่นบางแสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งกระบวนการสกัดและนำกลับจะเกิดขึ้น โดยประสิทธิภาพในการสกัดและนำกลับนั้นจะเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลด้วยการปั่นกววนในวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายสตริป



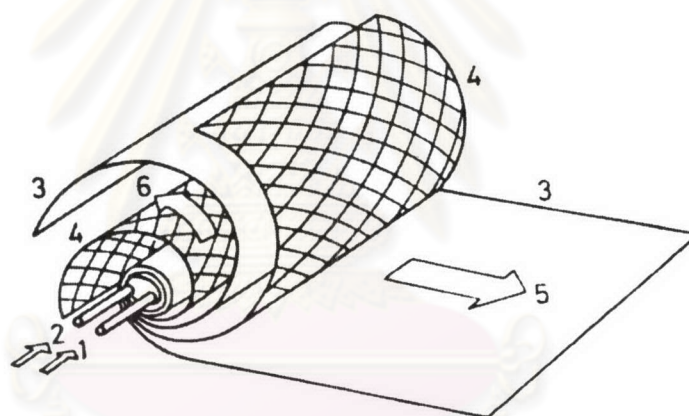
รูปที่ 2.7 กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับชนิดแผ่นบาง [Kamasawa et al., 1983]

แม้ว่าเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบแผ่นบางจะมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น มีเสถียรภาพสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวถูกยึดตรึงในรูปพจนจุลภาคของตัวรองรับแบบแผ่นบาง และไม่มีการใช้ตัวประสานซึ่งทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องการขวางกั้นการถ่ายโอนมวล

เป็นต้น แต่ตัวรองรับชนิดนี้ก็ยังมีข้อด้อยในเรื่องพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่ำกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันหลายเท่า มีความยุ่งยากในการเตรียมเยื่อแผ่นเหลว และเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวมีขอบเขตจำกัดเช่นกัน

#### 2.2.2.2.2 ตัวรองรับแบบเกลียววน

ตัวรองรับแบบเกลียววนได้รับการพัฒนามาจากตัวรองรับแบบแผ่นบาง โดยการนำมาม้วนห่อให้กะทัดรัดขึ้น เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลต่อปริมาตร นอกจากนี้เสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวจะดีขึ้น เนื่องจากสารละลายเอเควียสทั้งสองวัฏภาค (วัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป) จะไหลเป็นเกลียววนนานไปกับผิวสัมผัสของตัวรองรับ เป็นการลดการรบกวนที่มีต่อเยื่อแผ่นเหลว ทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีอายุการใช้งานได้นาน [Schulz, 1988] ลักษณะของตัวรองรับแบบเกลียววนและการไหลของวัฏภาคต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.8



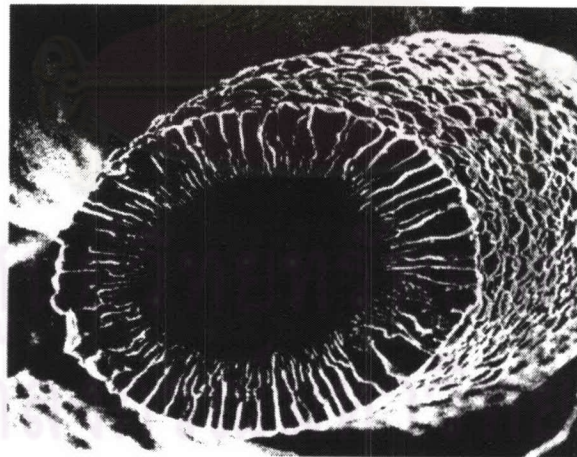
รูปที่ 2.8 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบเกลียววน [Teramoto et al., 1987] โดยหมายเลขที่ 1 คือ ทางเข้าของสารละลายป้อน หมายเลขที่ 2 คือ ทางเข้าของสารละลายสตรีป หมายเลขที่ 3 คือ เยื่อแผ่นเหลว หมายเลขที่ 4 คือ แผ่นกัน หมายเลขที่ 5 คือ สารละลายป้อนและ หมายเลขที่ 6 คือ สารละลายสตรีป

จากรูปที่ 2.8 ลักษณะพิเศษของตัวรองรับแบบเกลียววน คือ มีความทนทานต่อความดันสูง มีความกะทัดรัด มีการปนเปื้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวต่ำ ค่าความดันลดที่ท่อเพอมีอเทมีค่าต่ำ และง่ายต่อการออกแบบ นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญอีกประการสำหรับตัวรองรับชนิดนี้คือ มีค่าแพ็คกิ้งเดนซิตีสูง (มากกว่า 900 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร) [Rautenbach and Albrecht, 1989]

เนื่องจากตัวรองรับแบบเกลียววนมีการม้วนห่อตัวรองรับเป็นเกลียววน ทำให้ความยาวของตัวรองรับเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวล และสามารถเรียงซ้อนตัวรองรับเป็นชั้นๆ โดยการเรียงสลับกันเพื่อแบ่งชั้นวัฏภาคต่างๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนเซลล์ในการสกัด ทำให้ประสิทธิภาพการสกัดและนำกลับเพิ่มมากขึ้น [Teromoto et al., 1987] อย่างไรก็ตามการใช้ตัวรองรับแบบเกลียววนยังมีข้อด้อยหลายประการ อาทิเช่น มีสัดส่วนของพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรต่ำกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชันมาก การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวมีความยุ่งยากซับซ้อน และตรวจสอบเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวได้ยากกว่าตัวรองรับแบบแผ่นบาง นอกจากนี้เสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวมีอายุการใช้งานจำกัดเช่นเดียวกับตัวรองรับแบบแผ่นบาง

### 2.2.2.2.3 ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง

ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงเป็นตัวรองรับที่ได้รับการพัฒนาจากตัวรองรับแบบแผ่นบางเช่นเดียวกับตัวรองรับแบบเกลียววน โดยเริ่มแรกตัวรองรับมีลักษณะเป็นท่อกลม (Tubular tube) แต่พบว่าสัดส่วนการถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาตัวรองรับเป็นการนำเส้นใยที่มีขนาดเล็กมาจัดรวมเป็นหน่วยเดียวกัน เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวล ลักษณะรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง แสดงดังรูปที่ 2.9

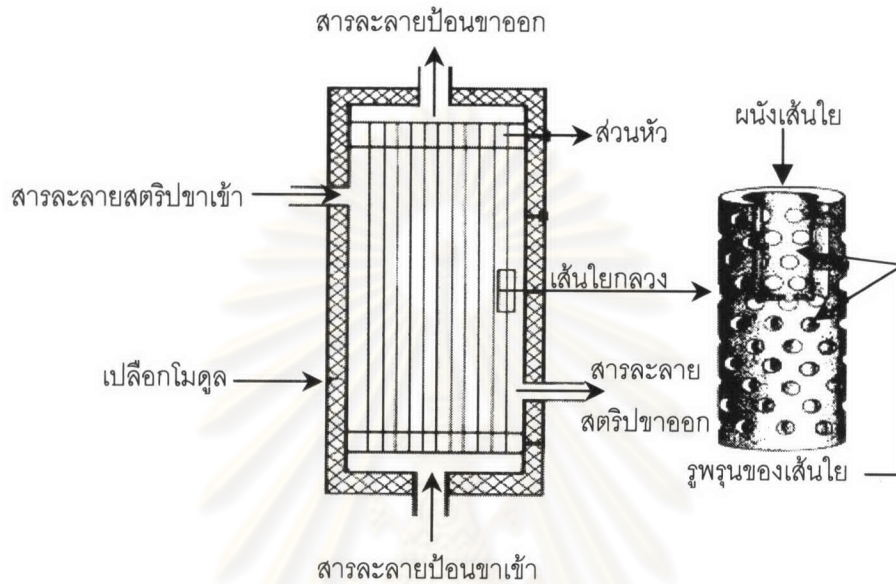


รูปที่ 2.9 ลักษณะรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง

จากรูปที่ 2.9 รูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงจะยึดพุงเยื่อแผ่นเหลวไว้ โดยชุดอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยเส้นใยกลวงจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนมวล ซึ่งชุดอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงกว่าชุดตัวรองรับชนิดอื่นๆ ที่มีขนาด



เท่าๆ กัน [Jianhan and Cangmin, 1988; Tanigaki et al., 1988] อย่างไรก็ตามในกระบวนการจำเป็นต้องมีการกรองแยกชั้นต้น (Prefiltration) เพื่อป้องกันการอุดตันภายในเส้นใยเนื่องจากเส้นใยกลวงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กมากนั่นเอง ลักษณะเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแสดงได้ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

จากรูปที่ 2.10 เยื่อแผ่นเหลวถูกเตรียมให้ยึดพุงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง ภูมิภาคของสารละลายจะถูกป้อนให้ไหลภายในท่อเส้นใยกลวง และสารละลายสตริป จะถูกป้อนให้ไหลภายนอกท่อเส้นใยกลวง การดำเนินการในอุปกรณ์เส้นใยกลวงสามารถบังคับให้เกิดการไหลผ่านไปครั้งเดียว (One-through operation) หรือมีการไหลวนของสารละลายแบบต่อเนื่องก็ได้ (Continuously circulate operation) ส่วนทิศทางการไหลสามารถเกิดได้ทั้งการไหลแบบทางเดียวกัน (Co-current flow) หรือไหลสวนทางกัน (Counter-current flow) ก็ได้ เยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นภูมิภาคของสารอินทรีย์เมื่อถูกยึดตรึงอยู่ในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับของเส้นใยกลวงนั้นจะกั้นระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับสารละลายสตริปเช่นเดียวกันกับตัวรองรับชนิดอื่นๆ และเกิดกลไกการสกัดและนำกลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคที่สัมผัสกัน

ข้อดีของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้คือเยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงกว่าเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน หลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเกิดเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายโอนมวลในการสกัด และมีสัดส่วนของพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นเหลวที่พุงบนตัวรองรับชนิดอื่นที่มีขนาดเดียวกัน ซึ่งเป็นจุดเด่นของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้นั่นเอง

การเลือกใช้เยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกตัวรองรับที่เหมาะสม เนื่องจากจะมีผลต่อสมบัติและเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว ลักษณะโครงสร้างของตัวรองรับที่ดีสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) มีความพรุนสูง เพื่อให้มีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง
- 2) ผนังบาง ความหนาควรไม่เกิน 50 ไมโครเมตรจึงเกิดการถ่ายโอนมวลที่ดี สำหรับในกรณีที่ผนังบางเกินไปจะทำให้เยื่อแผ่นฉีกขาดได้ง่าย และอายุการใช้งานสั้นลง
- 3) มีรูพรุนจุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวจะถูกยึดตรึงภายในรูพรุนด้วยแรงแคปิลลารี ซึ่งขึ้นกับขนาดของรูพรุน ถ้ารูพรุนมีขนาดใหญ่แรงยึดเหนี่ยวนี้จะน้อยลง ทำให้เกิดการสูญเสียสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้ง่าย แต่ถ้ารูพรุนมีขนาดเล็กมากเกินไปอาจทำให้เกิดการอุดตันได้ง่าย
- 4) ทนต่อสารเคมี และความเป็นกรด-ด่าง
- 5) ราคาไม่แพง

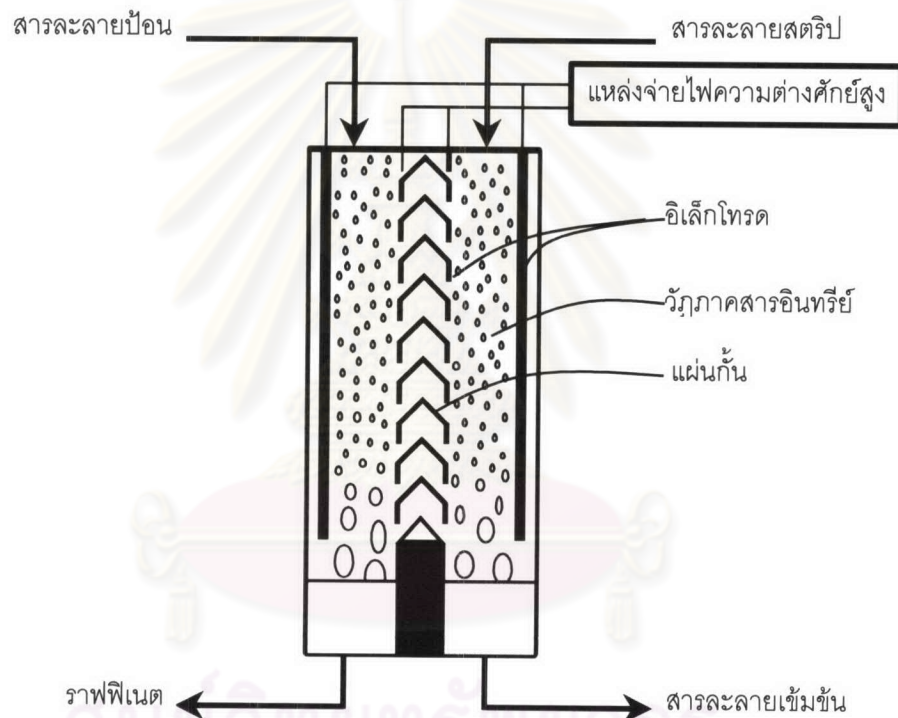
การประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับมักใช้ในการกำจัดและนำกลับโลหะจากน้ำทิ้ง ซึ่งคล้ายคลึงกับการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นชนิดอิมัลชัน โดยข้อดีและข้อด้อยของเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอิมัลชัน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพองกับชนิดอิมัลชัน

| ข้อดี   | ข้อด้อย  |
|---|--|
| 1) ใช้สารละลายอินทรีย์และสารสกัดในปริมาณน้อย                  | 1) ราคาของวัสดุที่ใช้ในการพองสูง   |
| 2) ไม่เกิดการผสมย้อนกลับ (back mixing)                        | 2) เกิดความดันลดในกรณีที่ใช้เส้นใยกลวงมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยและแพ็คกิ้งเดนซิตีสูง |
| 3) มีการรั่วซึมจากวัฏภาคสารอินทรีย์ไปสู่วัฏภาคสารละลายป้อนต่ำ | 3) จำเป็นต้องใช้สารละลายป้อนที่สะอาด หรืออาจต้องมีการกรองขั้นต้น (prefiltration)   |
| 4) ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว                                   | 4) ต้องมีการทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ   |
| 5) มีเสถียรภาพ  | 5) แรงตึงผิวระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายป้อนต้องมีค่าสูงกว่า 15 mN/m            |
| 6) สามารถประยุกต์ใช้ในการแยกแก๊สได้                           |  |

### 2.2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ คิดค้นโดย Gu และคณะในปี ค.ศ. 1988 [Gu, 1992] ซึ่งมีการพัฒนามาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลัมน์ (ชนิดหอสกัดแบบหยด) หลักไฟฟ้าสถิตย์ และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเข้าด้วยกัน โดยเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้สามารถแก้ไขข้อบกพร่องของกระบวนการแยกอื่นๆ เช่น ความยุ่งยากซับซ้อนในการดำเนินการของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายและระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ความมีเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวและการปนเปื้อนผลสมกันของวัฏภาคต่างๆ เป็นต้น [Gu,1990;1992] โดยลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์

จากรูปที่ 2.11 ชุดอุปกรณ์เป็นถังปฏิกรณ์ที่ทำขึ้นเป็นพิเศษโดยถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์สตริป มีแผ่นกั้น (Baffle plate) เป็นโลหะตัวอักษรรูปตัววีคว่ำเรียงต่อกัน เว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่ากันโดยมีลวดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอาไว้ อีกทั้งยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่นโลหะทึบสำหรับแบ่งกันวัฏภาคระหว่างราฟไฟเนตกับสารละลายเข้มข้น (Concentrated solution) ในเซลล์สกัดและเซลล์การนำกลับ มีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) จุ่มแช่อยู่ซึ่งต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟกระแสตรงความต่างศักย์

สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ ขั้นตอนทำงานเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัสดุของสารละลายอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์จนได้ระดับปริมาตรที่ต้องการ โดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี้จะเป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้า จากนั้นป้อนสารละลายป้อนและสารละลายสไตรีนพร้อมกันเป็นหยดเล็กๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของวัสดุ เกิดการสกัดแยกและสไตรีนออกตามกลไกการสกัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิตย์เป็นปัจจัยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้จะออกแบบเป็นพิเศษเพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อนผลผลิตของวัสดุต่างๆ โดยหากมีหยดของสารละลายป้อนหรือสารละลายสไตรีนหลุดเข้าไปในช่องของแผ่นกั้นซึ่งกั้นวัสดุทั้งสอง หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดวัสดุของสารละลายมีรูปร่างยืดยาวออกเป็นรูปทรงรี เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (Polarization) ของวัสดุสารละลาย ดังนั้นเมื่อมีหยดของวัสดุภาคของสารละลาย ซึ่งอยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตย์จะรวมกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของวัสดุภาคของสารละลายกับวัสดุภาคของเยื่อแผ่นเหลวจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ที่จะส่งผลให้วัสดุภาคทั้งสองเคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ อีกทั้งยังมีแผ่นกั้นที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งจะช่วยให้หยดของวัสดุภาคที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้น ให้รวมตัวกันเองและตกกลับไปยังเซลล์ของมันตามเดิม

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตย์จะมีข้อดีอยู่มากมาย อาทิเช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวัสดุภาคต่างๆ ต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ อาทิเช่น ขนาดและการกระจายตัวของหยดวัสดุภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรไม่สูง วัสดุภาคของสารละลายอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ และใช้กับกระบวนการที่วัสดุภาคของสารละลายอินทรีย์เป็นวัสดุภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวัสดุภาคต่างๆ ในกระบวนการต่ำ อันเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นต้น

จากข้างต้นเมื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน ชนิดที่รับการพอง และชนิดไฟฟ้าสถิตย์ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ

| เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน          |  | เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพอง |   | เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์  |  |
|------------------------------------|--|------------------------------|---|-------------------------------|--|
| ข้อดี                              | ข้อด้อย                                | ข้อดี                        | ข้อด้อย                                     | ข้อดี                         | ข้อด้อย  |
| - มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูงมาก | - ปัญหาการใช้สารลดแรงตึงผิวและการกำจัด | - มีประสิทธิภาพสูง           | - มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ             | - เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูง | - มีกำลังการผลิตต่ำ  |
| - มีกำลังการผลิตมาก                | - ปัญหาการปนเปื้อน                     | - ไม่ใช่สารลดแรงตึงผิว       | - ปัญหาทางด้านอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว | - มีประสิทธิภาพสูงมาก         | - สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขี้ด้า                          |
| - มีกระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน     | - ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณสูง            | - ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณต่ำ  |   | - ปัญหาการปนเปื้อนต่ำ         | - ใช้กับกระบวนการที่สารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น |
|                                    | - ใช้พลังงานสูง                        | - ใช้พลังงานต่ำ              |   | - ไม่ใช่สารลดแรงตึงผิว        | - ปัญหาอันตรายทางด้านไฟฟ้า                                 |
|                                    |  |                              |   |                               | - ใช้สารอินทรีย์ในปริมาณมาก                                |

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าเยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพองมีประสิทธิภาพในการดำเนินการสกัดและนำกลับสารที่เราต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน และไม่ต้องใช้พลังงานสูงในการดำเนินการซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตย์ที่ต้องใช้ไฟฟ้าเข้าร่วมซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายในขณะดำเนินการได้ นอกจากนี้เยื่อแผ่นเหลวที่ได้รับการพองยังใช้สารสกัดและสารละลายอินทรีย์ในปริมาณต่ำจึงคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์

ในงานวิจัยนี้จะใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในการดำเนินการทดลอง เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงกว่าตัวรองรับชนิดอื่นๆ และสามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้มากกว่าระบบอื่น [Schulz, 1988]

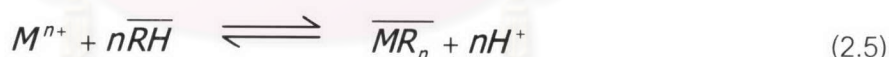
## 2.3 ชนิดของสารสกัดและตัวทำละลายอินทรีย์

### 2.3.1 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด [Tavlarides et al., 1987] ดังนี้

#### 2.3.1.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractants)

สารสกัดประเภทนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยคือ สารสกัดที่เป็นกรด และสารสกัดที่เป็นคีเลต (Chelating extractants) สารสกัดในกลุ่มแรกจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น  $-COOH$ ,  $=P(O)OH$  และ  $-SO_3H$  เป็นต้น ขณะที่สารสกัดกลุ่มที่สองจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองกลุ่มเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ดังสมการ (2.5)



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ โดยสมการ (2.5) แสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ซึ่งความสามารถในการสกัดไอออนโลหะนั้นขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลายเอควิวส และธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ

สารสกัดที่เป็นกรดที่พบว่ามียุทธประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ ได้แก่อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic acids) ซึ่งในสารสกัดที่เป็นกรดนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (Di-2-

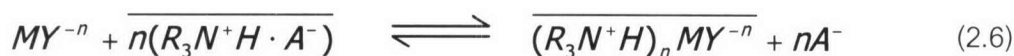
ethylhexyl phosphoric acid, D2EHPA) เนื่องจากข้อดีของการใช้สารสกัด D2EHPA คือ มีเสถียรภาพทางเคมี มีจลนศาสตร์ของการสกัดที่ดี สามารถสกัดและนำกลับได้ง่าย มีความสามารถในการละลายในสารละลายเอเควียสต่ำ สามารถสกัดไอออนโลหะได้หลายชนิด และสามารถหาได้ง่ายในทางการค้า

สารสกัดที่เป็นคีเลทเป็นสารสกัดที่ประกอบด้วยกลุ่มดอนเนอร์ (Donor groups) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate complexes) ซึ่งในปัจจุบันสารสกัดที่เป็นคีเลทในเชิงพาณิชย์มีอยู่ 2 ประเภท คือ

- (ก) กลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc.) ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical
- (ข) กลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน (8-hydroxyquinoline) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company) ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะ เพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่มาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic leach liquors) หรือจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline solutions) ข้อดีของสารสกัดที่เป็นคีเลท คือ เมื่อใช้ในสารละลายที่เป็นกรดจะมีจลนศาสตร์ที่ช้า แต่ในสารละลายอัลคาไลน์จะเกิดจลนศาสตร์ที่ดี

### 2.3.1.2 สารสกัดชนิดเบส (Basic extractants)

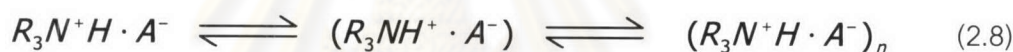
สารสกัดชนิดเบสหรือ Anion exchangers เป็นสารสกัดอินทรีย์ที่สามารถเกิดเป็นรูปของเกลือได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดชนิดนี้ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมแฮไลด์ชนิดจตุรภูมิ (Quaternary ammonium halides) ได้มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salts) ชนิดปฐมภูมิ (Primary,  $\text{RNH}_2$ ) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary,  $\text{R}_2\text{NR}$ ) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary,  $\text{R}_3\text{N}$ ) และชนิดจตุรภูมิ (Quaternary,  $\text{R}_4\text{N}^+$ ) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายเอเควียสเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Anionic species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน ดังสมการ (2.6)



เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนจะต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสม เพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังสมการ (2.7)



นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว  $R_3N^+HA^-$  ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายนี้สัมผัสกับสารละลายเอควียสที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ  $MY^{-n}$  จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการที่ (2.6) ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะ โดยการใช้อะมีนเป็นสารสกัด คือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ โดยการรวมตัวจะทำให้เกิดวัฏภาคที่สาม ดังสมการที่ (2.8)



การเกิดวัฏภาคที่สามนี้ทำให้วัฏภาคของสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifiers) เช่น พวกอัลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ยาว (Long-chain aliphatic alcohols) เช่น โดเดคคานอล (Dodecanol) เป็นต้น

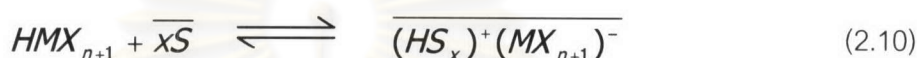
ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการสกัดโลหะด้วยเอมีน คือ ธรรมชาติของสายโซ่คาร์บอน และจำนวนอะตอมคาร์บอนในสายโซ่ โดยปกติอัลกอฮอล์เอมีนเป็นสารสกัดที่ดีที่สุด เอมีนมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 250-600 แต่ปกติที่ใช้กันจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 250-400 ซึ่งพบว่าถ้าน้ำหนักโมเลกุลของน้อยกว่า 250 เอมีนจะมีแนวโน้มในการละลายในน้ำได้ ส่วนถ้าน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 600 เอมีนจะไม่สามารถละลายในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ได้

### 2.3.1.3 สารสกัดชนิดโซลเวท (Solvating extractants)

สารสกัดชนิดโซลเวทหรือสารสกัดที่เป็นกลาง (Neutral extractants) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะกลุ่มดอนเนอร์ จึงไม่สามารถแตกตัวให้โปรตรอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของ



ไอออนที่มีประจุบวก หรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายเอควิวสจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายเอควิวสเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดเบส การสกัดเป็นการรวมตัวกันของอะตอมกลางของสารประกอบเชิงซ้อน หรือรวมกับโปรตรอนในกรณีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ



เมื่อ S คือสารสกัดชนิดโซลเวท จากสมการข้างต้นพบว่าความสามารถในการละลายของสารอินทรีย์ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้ โดยการทำปฏิกิริยารวมกับสารสกัดชนิดโซลเวท

สารสกัดชนิดโซลเวทนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ สารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยพันธะระหว่างออกซิเจน และคาร์บอน เช่น อีเทอร์ เอสเทอร์ แอลกอฮอล์ และคีโตน ส่วนอีกกลุ่มประกอบด้วยพันธะระหว่างออกซิเจนหรือซัลเฟอร์กับฟอสฟอรัส เช่น อัลคิลฟอสเฟต หรืออัลคิลไฮโอฟอสเฟต เป็นต้น

### 2.3.2 ตัวทำละลายอินทรีย์

การเลือกใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในกระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสารสกัดที่เลือกใช้จะถูกนำมาละลายในสารละลายอินทรีย์ เพื่อใช้ในการแยกสารที่สนใจจากสารละลายป้อน ซึ่งสารที่สนใจหรือตัวถูกละลายนั้นย่อมมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และกระจายตัวในตัวทำละลายอินทรีย์ต่างชนิดกันไม่เท่ากัน ดังนั้นตัวทำละลายอินทรีย์ที่เหมาะสมในการเลือกใช้ควรมีคุณสมบัติ ดังนี้ [Venkafachalam, 1998]

- 1) มีค่าการละลายในน้ำต่ำเพื่อลดความสูญเสียอันเนื่องมาจากความสามารถในการละลาย
- 2) สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย อาทิเช่น มีความหนาแน่นต่างจากน้ำเพียงพอ มีความหนืดต่ำ และค่าความตึงผิวค่อนข้างสูง

- 3) ตัวทำละลายควรมีความหนืดปานกลาง ซึ่งช่วยให้วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมีความคงตัว
- 4) มีค่าความคงตัวเมื่อผสมกับสารสกัดที่ใช้ในกระบวนการ
- 5) ไม่เป็นพิษ มีจุดวาบไฟ (Flash point) สูง และไม่ระเหย เพื่อความปลอดภัย
- 6) ราคาถูก หาซื้อง่าย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย