

## บทที่ 2

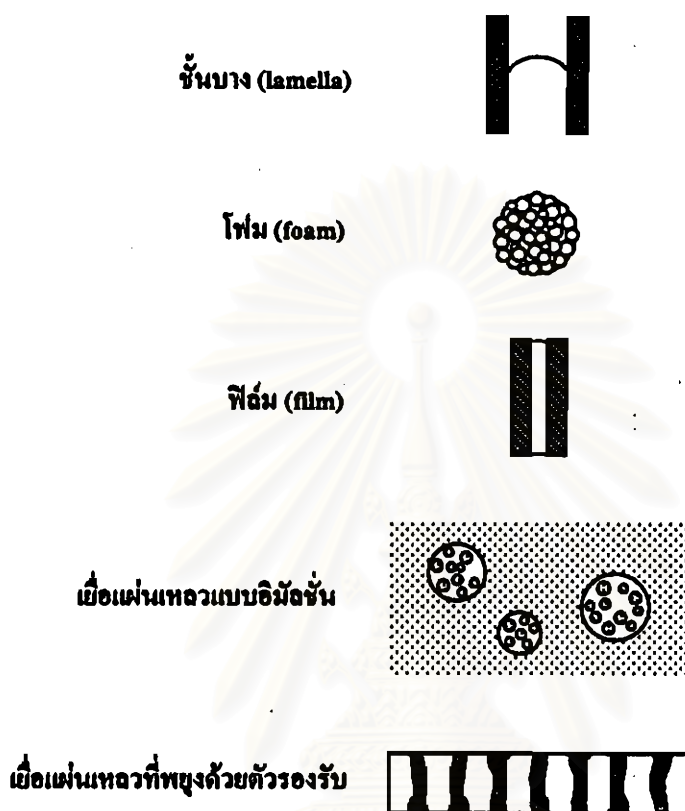
### เยื่อแผ่นเหลว

บทนี้จะอธิบายกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้น กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบต่าง ๆ รวมถึงชนิดของสารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว ตามลำดับ

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane process) ประกอบไปด้วย วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) ซึ่งเป็นวัฏภาคที่ประกอบไปด้วยสารสกัด (extractant) ละลายในตัวทำละลาย และวัฏภาคสารละลายสองวัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคสารละลายป้อน (feed phase) ซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ และวัฏภาคสารละลายสดริป (strip phase) ซึ่งเป็นวัฏภาคที่รองรับองค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาจากวัฏภาคสารละลายป้อน วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคสารละลาย เมื่อนำวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างวัฏภาคสารละลาย องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งสามารถถ่ายเทผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวได้จะละลายในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวในรูปที่ละลายได้ไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายสดริปที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะละลายในวัฏภาคสารละลายสดริป ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการจากวัฏภาคสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายสดริปได้

เพื่อให้เกิดกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจึงจำเป็นต้องสร้างชั้นของเยื่อแผ่นเหลวขึ้นมาขึ้นระหว่างวัฏภาคสารละลายสองวัฏภาค รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวที่น่าจะเกิดขึ้นได้

โดยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่ากรณีอื่น ๆ (Schultz, 1988)



รูปที่ 2.1 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ (Shultz, 1988)

ส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวในรูปแบบต่าง ๆ ที่มีผู้ทดลองศึกษา โดยอธิบายวิธีการเตรียมเยื่อแผ่นเหลว อุปกรณ์ที่ใช้ และจุดเด่นจุดด้อยของกระบวนการ

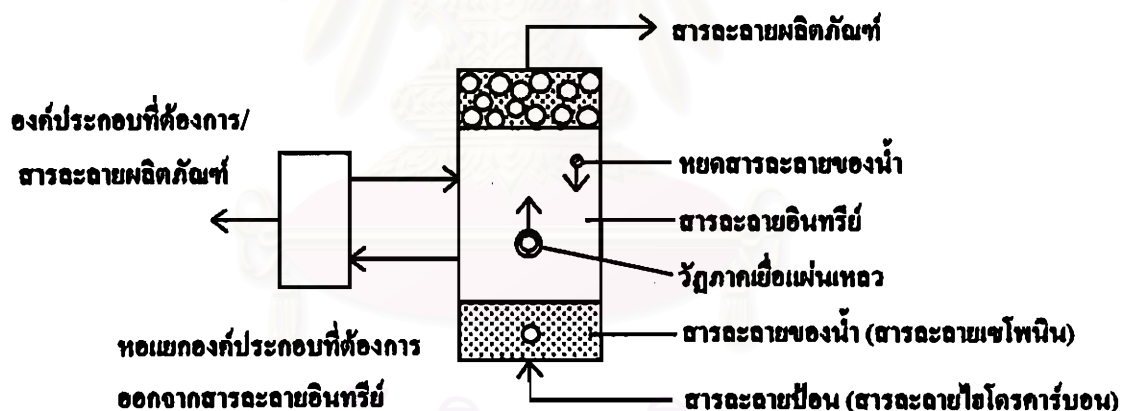
กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ (unsupported liquid membranes) และเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (supported liquid membranes)

## 2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ

ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ เยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนไหวได้ จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เยื่อแผ่นเหลวแบบเคลื่อนที่ได้ (mobilized liquid membrane) เยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ได้แก่

### 2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวในหลอดตก (liquid membrane in droplet column)

N.N. Li ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับเยื่อแผ่นเหลวในหลอดตกในปี 1967 (Li, 1967 อ้างถึงใน Marr และ Kopp, 1982) ซึ่งนับได้ว่าเป็นการศึกษากระบวนการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับเป็นครั้งแรก



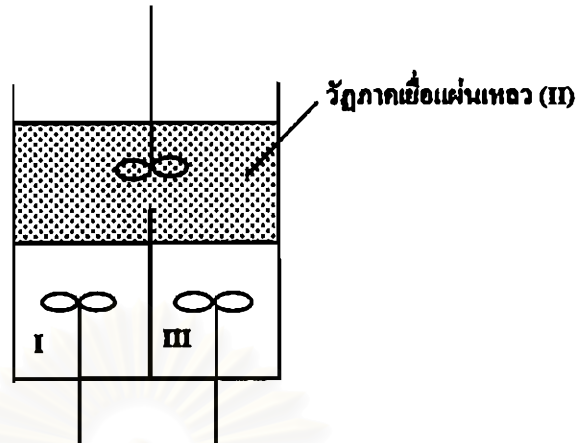
รูปที่ 2.2 ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหลอดตก (Marr และ Kopp, 1982)

หลอดตกที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.2 (Marr และ Kopp, 1982) จะถูกบรรจุด้วยสารละลายอินทรีย์จนเกือบเต็ม โดยให้มีชั้นของสารละลายเซโปนิน (saponin) ในน้ำที่มีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 1 โดยปริมาตรอยู่ด้านล่างของหลอดตก ถ้าให้หยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าความตึงผิวต่ำกว่าสารละลายอินทรีย์ในหลอดตกเคลื่อนที่ผ่านจากทางด้านล่างของหลอด

สกัด เมื่อหยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนเคลื่อนที่ผ่านชั้นของสารละลายเซโพนิน หยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนจะถูกห่อหุ้มด้วยชั้นฟิล์มของสารละลายเซโพนินในลักษณะเหมือนฟองสบู่ที่ห่อหุ้มอากาศ หยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนที่ผิวมีสารละลายของน้ำคลุมอยู่จะเคลื่อนที่ผ่านวิภาคสารละลายอินทรีย์จากด้านล่างขึ้นไปด้านบนของหอสกัดเนื่องจากความถ่วงจำเพาะของสารละลายไฮโดรคาร์บอนที่น้อยกว่า ทำให้องค์ประกอบบางชนิดถ่ายเทออกจากหยดสารละลายไฮโดรคาร์บอนโดยที่ไม่มีการรวมตัวกันระหว่างวิภาคต่าง ๆ หยดของสารละลายไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นต้องมีขนาดอยู่ในช่วงเซนติเมตรเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นขอบเขตของสารละลายของน้ำกับสารละลายอินทรีย์ได้ แต่ข้อจำกัดของกระบวนการในการแยกวิภาคออกจากกันอย่างสมบูรณ์หลังจากหยดสารละลายไฮโดรคาร์บอนรวมตัวกันที่ด้านบนของหอสกัดเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้เองกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดจึงถูกจำกัดอยู่ในระดับการทดลองเท่านั้น

### 2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน (stirred cells)

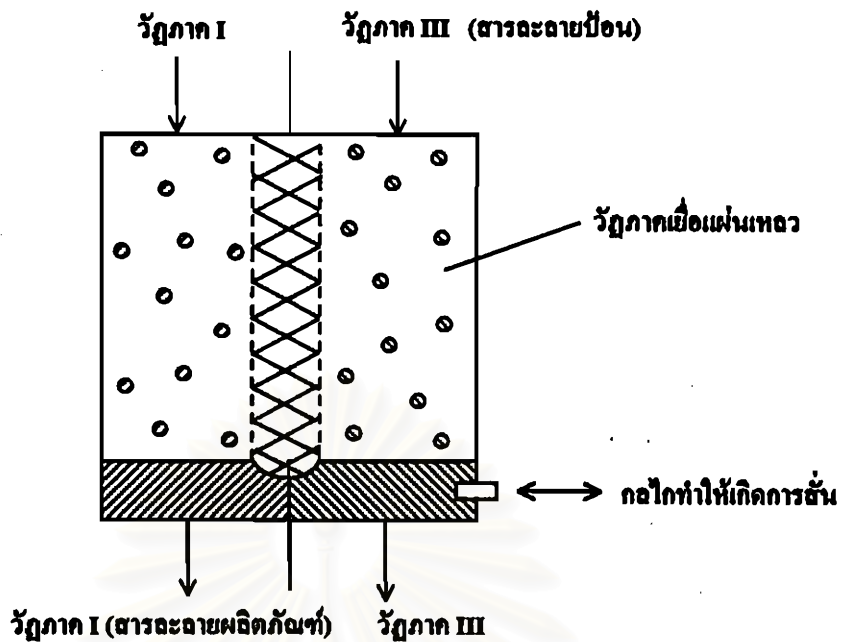
เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววนดังรูปที่ 2.3 (Mat และ Kopp, 1982) มีโครงสร้างที่ง่ายในการนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีในการทดลองศึกษาความต้านทานที่ผิวสัมผัส (interfacial resistance) กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้เตรียมโดยนำวิภาคสารละลายสองชนิดที่รวมกันได้ (วิภาค I และ วิภาค III) มาบรรจุในอุปกรณ์โดยมีแผ่นกั้นเพื่อมิให้วิภาคสารละลายทั้งสองรวมตัวกัน จากนั้นจึงนำวิภาคสารละลายชนิดที่สาม (วิภาค II) ซึ่งไม่รวมตัวกันกับวิภาคสารละลายสองชนิดแรกมาบรรจุในอุปกรณ์โดยให้วิภาคสารละลายชนิดที่สามสัมผัสกับวิภาคสารละลายทั้งสองชนิดแรก การถ่ายเทมวลในกระบวนการนี้เกิดขึ้นในทิศทางจากวิภาคสารละลาย (วิภาค I) ผ่านวิภาคเยื่อแผ่นเหลว (วิภาค II) ไปยังวิภาคสารละลาย (วิภาค III) หรือในทิศทางกลับกัน สำหรับกรณีที่วิภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นวิภาคสารละลายของน้ำ วิภาคสารละลายอินทรีย์ที่ใช้จะต้องหนักมากกว่า กระบวนการนี้มีข้อจำกัดที่อัตราการถ่ายเทมวลต่ำและเยื่อแผ่นเหลวที่ใช้มีปริมาณมาก (Izatt, 1988)



รูปที่ 2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน (Marr และ Kopp, 1982)

### 2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดของ Boyadzhiev (Boyadzhiev column)

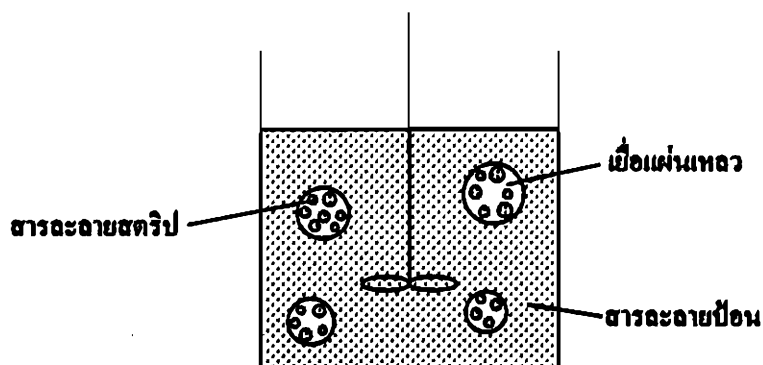
หอสกัดแบบเขย่า (pulse column) ที่เสนอโดย Boyadzhiev (Boyadzhiev และ Kyuchoukov, 1980) จะแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยใช้แผ่นกั้นพอลิเมอร์ที่มีช่องว่างซึ่งวางไว้ในแนวตั้ง แผ่นกั้นนี้ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อให้วฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเคลื่อนที่ผ่านได้แต่ป้องกันมิให้หยดสารละลายเคลื่อนที่ผ่านดังแสดงในรูปที่ 2.4 วฏภาคเยื่อแผ่นเหลวถูกบรรจุอยู่ในหอสกัดทั้งสองส่วน วฏภาคสารละลายป้อนและวฏภาคสารละลายศตริปจะถูกป้อนเข้าด้านบนทางฝั่งซ้ายหรือทางฝั่งขวาของหอสกัดในลักษณะเป็นหยดกระจายไปในวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว เมื่อมีการเขย่าหอสกัดวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสองฝั่งของแผ่นกั้นทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกในวฏภาคสารละลายป้อนที่ฝั่งหนึ่งถ่ายเทผ่านวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังวฏภาคสารละลายศตริปที่อีกฝั่งหนึ่งได้ กระบวนการนี้มีจุดเด่นตรงสามารถเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทมวลได้มากขึ้นแต่เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้ยังคงมีปริมาณมากอยู่ อย่างไรก็ตามมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเทคนิคนี้ให้มีรูปแบบที่ง่ายต่อการใช้งานต่อไป (Marr และ Kopp, 1982)



รูปที่ 2.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวในหอสกัดของ Boyadzhiev (Boyadzhiev และ Kyuchoukov, 1980)

#### 2.1.4 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (emulsion liquid membrane; ELM)

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันถูกเตรียมโดยนำวัฏภาคสารละลายสองชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันมาปั่นควนด้วยความเร็วสูงมากเกิดเป็นอิมัลชันในลักษณะที่วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) ห่อหุ้มวัฏภาคสารละลายสตริปหรือวัฏภาคภายใน (internal phase) เอาไว้ แต่อิมัลชันเหล่านี้มักไม่เสถียรดังนั้นจึงต้องเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเพื่อรักษาเสถียรภาพของอิมัลชันระหว่างปฏิบัติการ จากนั้นจึงกระจายเม็ดอิมัลชันในวัฏภาคสารละลายป้อนหรือวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ซึ่งเป็นสารละลายที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว แต่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคสารละลายสตริปได้ รูปที่ 2.5 แสดงถึงระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน การถ่ายเทมวลในระบบนี้เกิดในทิศทางจากวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังวัฏภาคสารละลายสตริป การถ่ายเทจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนวัฏภาคสารละลายสตริปมีความเข้มข้นเพียงพอต่อความต้องการ จากนั้นจึงแยกอิมัลชันออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนแล้วทำการแตกอิมัลชันเพื่อแยกวัฏภาคสารละลายสตริปออกมา ส่วนเยื่อแผ่นเหลวก็จะถูกนำกลับมาใช้เตรียมอิมัลชันต่อไป



รูป 2.5 ระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Schultz, 1988)

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิด (Ho และ Li, 1992; Marr และ Kopp, 1982) ได้แก่ อิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (water-in-oil (w/o) emulsion) ในกรณีที่ว่าภาวสารละลายสตริปเป็นสารละลายของน้ำ และอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (oil-in-water (o/w) emulsion) ในกรณีที่ว่าภาวสารละลายสตริปเป็นสารละลายอินทรีย์ เมื่อนำอิมัลชันของน้ำในน้ำมันมากระจายในภาวสารละลายป้อนที่เป็นสารละลายของน้ำ ระบบจะเรียงลำดับจากภาวภาคด้านในไปยังภาวภาคด้านนอกดังนี้ น้ำ/น้ำมัน/น้ำ (w/o/w) ในลักษณะเดียวกันจากอิมัลชันของน้ำมันในน้ำจะได้ระบบ น้ำมัน/น้ำ/น้ำมัน (o/w/o) ดังนั้นจึงมีสารลดแรงตึงผิวสองประเภทได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surfactant) สำหรับอิมัลชันน้ำในน้ำมัน และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic surfactant) สำหรับอิมัลชันน้ำมันในน้ำ

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันมีจุดเด่นที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างภาวภาคสูงมาก โดยอาจมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างภาวภาคสูงถึง 3000 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร (Marr และ Kopp, 1982) อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังคงมีปัญหาบางประการได้แก่ การเติมสารลดแรงตึงผิวในการทำอิมัลชันเพื่อให้อิมัลชันเสถียรมากขึ้นทำให้การแตกอิมัลชันเพื่อแยกภาวสารละลายสตริปออกมาทำได้ยากขึ้น (Gu, 1992) ยิ่งไปกว่านั้นค่าฟลักซ์ (flux) ซึ่งเป็นค่าปริมาณการถ่ายเทมวลต่อพื้นที่ต่อเวลาอาจต่ำลงเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมารวมตัวกันที่ผิวสัมผัสระหว่างภาวภาค (interfacial film) ทำให้การถ่ายเทมวลเข้าและออกจากภาวสารละลายสตริปถูกจำกัดโดยสารลดแรงตึงผิว ปัญหาหลักอีกอย่างหนึ่งคือการแตกอิมัลชันเพื่อแยกภาวสารละลายสตริปที่อยู่ภายในอิมัลชันออกมา

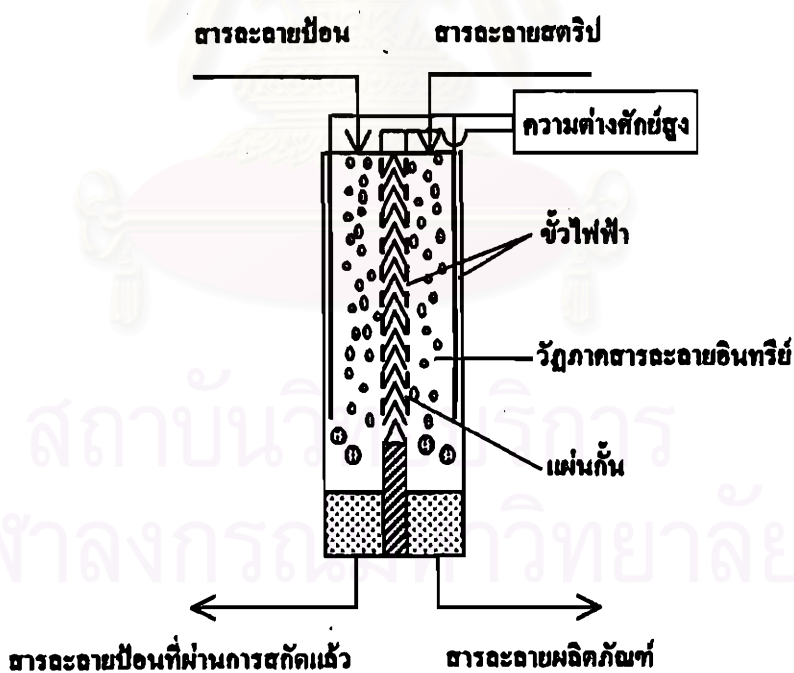
หลังจากที่วิทยาศาสตร์หลายศตวรรษที่ปรับปรุงองค์ประกอบที่ต้องการแยกเข้ามาเต็มที่แล้วและการนำวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวมาทำอิมัลชันใหม่ (re-emulsified) กับวิทยาศาสตร์หลายศตวรรษเพื่อใช้สกัดองค์ประกอบที่ต้องการแยกออกจากวิทยาศาสตร์หลายปีก่อน วิธีการพื้นฐานในการแตกอิมัลชันมีสองวิธีด้วยกันคือ การบำบัดทางเคมี (chemical treatment) และการบำบัดทางกายภาพ (physical treatment) (Tavlarides, 1987) การบำบัดทางเคมีเป็นการเติมสารลดการประสาน (demulsifier) ลงไปในอิมัลชัน วิธีการนี้มีประสิทธิภาพมาก แต่ตัวลดการประสานอาจเปลี่ยนคุณสมบัติของวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก การบำบัดทางกายภาพจะเป็นการใช้ประจุไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อแตกอิมัลชัน วิธีการการบำบัดแบบนี้มีประสิทธิภาพดีและเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการแตกอิมัลชัน แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่ใช้จะมีความยุ่งยากและซับซ้อน ปัญหาอีกประการหนึ่งของกระบวนการนี้คือ การที่อิมัลชันแตกออกขณะปฏิบัติการทำให้วิทยาศาสตร์หลายศตวรรษปนกับวิทยาศาสตร์หลายปีก่อนซึ่งเป็นการลดประสิทธิภาพของการสกัด

### 2.1.5 เยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้า (electrostatic pseudo liquid membrane; ESPLIM)

ESPLIM เป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากหอสกัดที่ Boyadzhiev และ Kyuchoukov คิดค้นขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อลดความยุ่งยากของระบบเยื่อแผ่นเหลว จากหลักฐานของสนามไฟฟ้าที่ว่า ภายใต้สนามไฟฟ้ากำลังสูง หยดน้ำในวิทยาศาสตร์น้ำมันจะแตกกระจายออกเป็นหยดเล็ก ๆ จำนวนมาก (Martin et al., 1983 อ้างถึงใน Gu, 1990) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การกวนด้วยกระแสไฟฟ้า (electrostatic agitation)” ดังนั้นเมื่อนำสนามไฟฟ้ามาใช้กับกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้า จึงทำให้วิทยาศาสตร์หลายของน้ำกระจายตัวในวิทยาศาสตร์หลายอินทรีย์ได้ดีขึ้น ระบบเยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังรูป 2.6 วิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวจะถูกบรรจุอยู่ในหอสกัด หอสกัดที่ใช้ในกระบวนการนี้แบ่งออกเป็นสองฝั่งคือ ฝั่งสกัดและฝั่งสกัดรีไซเคิล โดยใช้แผ่นกั้นที่ออกแบบเป็นพิเศษ ส่วนล่างของหอสกัดเป็นบริเวณที่ออกแบบมาเพื่อรองรับการรวมตัวกันของหยดวิทยาศาสตร์หลายของน้ำในฝั่งสกัดและฝั่งสกัดรีไซเคิล วิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด



สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสองฝั่งอย่างอิสระผ่านทางแผ่นกั้น ขณะที่หยดของวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและหยดของวิทยาศาสตร์ละลายสตรีปที่อยู่ในฝั่งสกัดและฝั่งสตรีปแยกจากกันอย่างเด็ดขาด ขั้วไฟฟ้าสองขั้วถูกต่อกร่อมระหว่างฝั่งสกัดและฝั่งสตรีปตามลำดับ เมื่อใส่กระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเข้าระหว่างฝั่งสกัดและฝั่งสตรีป สารละลายของน้ำในสองฝั่งจะแตกกระจายเป็นเม็ดเล็ก ๆ จำนวนมากในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนที่ฝั่งหนึ่งถ่ายเทผ่านวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวไปยังวิทยาศาสตร์ละลายสตรีปที่อีกฝั่งหนึ่งได้ กระบวนการนี้มีจุดเด่นหลายประการ ได้แก่ มีค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลสูง ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว ระบบไม่ซับซ้อน ใช้พลังงานต่ำ และลดปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวลง แต่กระนั้นกระบวนการนี้ยังมีข้อจำกัดของตัวเองคือ วิทยาศาสตร์ละลายอินทรีย์ที่ใช้ต้องมีความเป็นขี้ดต่ำ วิทยาศาสตร์ที่กระจายตัวต้องเป็นวิทยาศาสตร์ละลายของน้ำเท่านั้น และยังต้องใช้สารละลายอินทรีย์เป็นปริมาณมาก นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างใหม่จึงจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมอีก (Gu, 1990)



รูปที่ 2.6 ระบบเยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยกระแสไฟฟ้า (Gu, 1990)

## 2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ

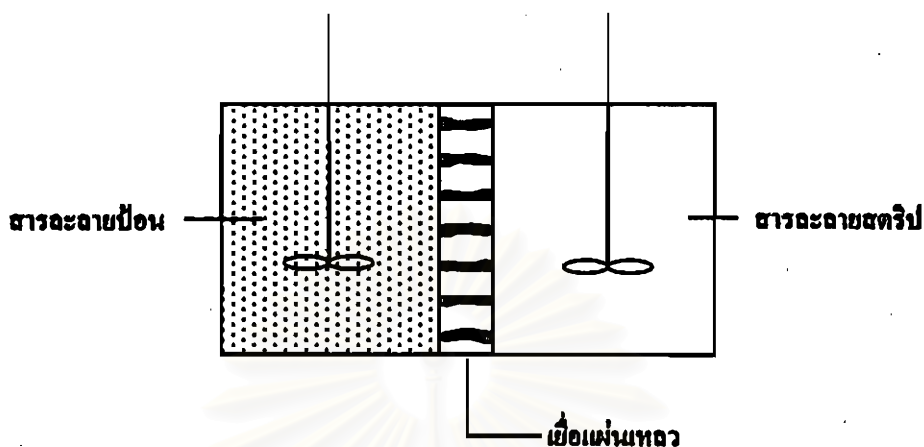
สำหรับกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ เยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นจะถูกตรึงอยู่กับที่จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เยื่อแผ่นเหลวแบบเคลื่อนที่ไม่ได้ (immobilized liquid membrane) เยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้จะใช้ตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนเป็นตัวรองรับ โดยเยื่อแผ่นเหลวจะถูกตรึงไว้ในรูพรุนด้วยแรงคาпилลารี (capillary force) (Marr และ Kopp, 1982; Schultz, 1988) ตัวรองรับที่เป็นรูพรุนมีรูปร่างหลายแบบได้แก่ แบบแผ่นแบน (flat sheet) แบบแผ่นม้วน (spiral - wound) และแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber) ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวพองด้วยตัวรองรับคือ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและสารสกัดที่ใช้มีปริมาณน้อย แต่อย่างไรก็ตามอัตราการถ่ายเทมวลที่ต่ำและการเสื่อมสภาพของเยื่อแผ่นเหลวเป็นจุดอ่อนของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (O'Hara, 1989; Shiau และ Chen, 1993)

การเตรียมกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับทำโดยนำวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวมาเคลือบฝังไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลวพองด้วยตัวรองรับ เมื่อนำตัวรองรับนี้มาขึ้นระหว่างสารละลายสองชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทไอออนโลหะจากสารละลายชนิดแรกไปยังสารละลายอีกชนิดหนึ่ง ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังจะเป็นวัสดุภาคสารละลายอินทรีย์ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังต้องเป็นวัสดุภาคสารละลายของน้ำ

### 2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (flat sheet supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนมีรูปแบบดังแสดงไว้ในรูป 2.7 เยื่อแผ่นเหลวแบบนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายเทมวลเนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่

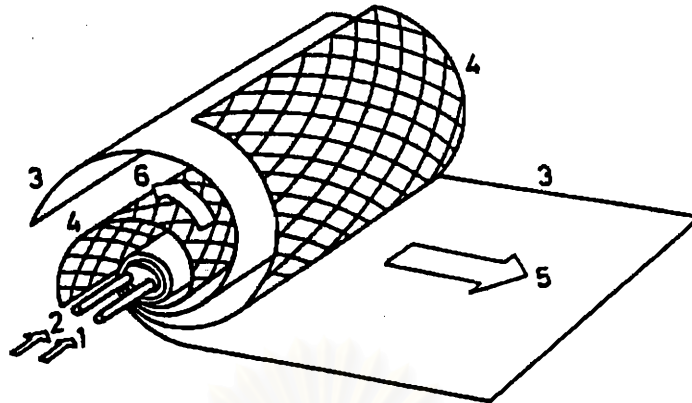
เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลน้อย



รูปที่ 2.7 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Komasawa et al., 1983)

### 2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วน (spiral-type supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วนที่พัฒนาขึ้นโดย Teramoto (Teramoto et al., 1987) แสดงไว้ดังรูปที่ 2.8 โมดูล (module) ของตัวรองรับแบบแผ่นม้วนผลิตขึ้นโดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และแผ่นตาข่าย (mesh spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อ นำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของโมดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี (epoxy) ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว (raffinate) และสารละลายสกัดที่ได้ (strip) จะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของโมดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้คือ โมดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดไม่ซับซ้อน



รูปที่ 2.8 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Teramoto et al., 1987)

หมายเลขที่ 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน

หมายเลขที่ 2 ทางเข้าของสารละลายสดริบ

หมายเลขที่ 3 เยื่อแผ่นเหลว

หมายเลขที่ 4 แผ่นกั้น

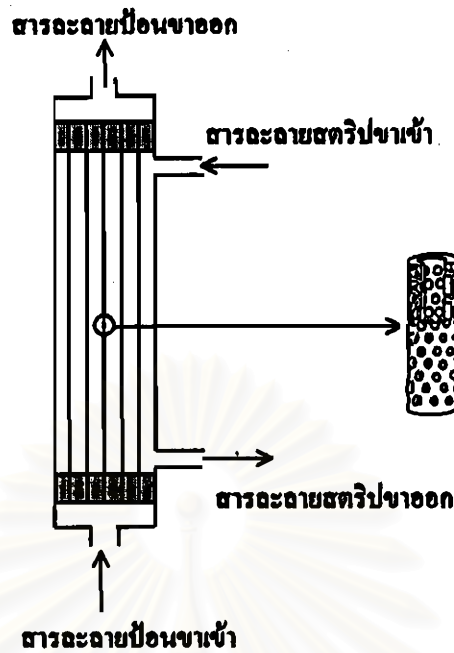
หมายเลขที่ 5 สารละลายป้อน

หมายเลขที่ 6 สารละลายสดริบ

### 2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane; HFSLM)

รูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง (Yang และ Cussler, 1986; Dahuron และ Cussler, 1988) และเยื่อแผ่นเหลวที่เชื่อมสภาพสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ (Danesi และ Rickert, 1986; Nakano et al., 1987; Tanikaki et al., 1988)

โมดูล (module) ของเส้นใยกลวงถูกผลิตในลักษณะที่นำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงในโมดูลรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของโมดูลด้วยเรซิน (resin) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยปกติเส้นใยกลวงมักเป็นตัวรองรับชนิดไม่ชอบน้ำ ดังนั้นเส้นใยกลวงจะถูกเคลือบฝั่งไว้ด้วยวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์ วัสดุภาคสารละลายของน้ำสองชนิดจะไหลภายในเส้นใยกลวง (lumen or tube side) และภายนอกเส้นใยกลวง (shell side)



รูปที่ 2.9 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Izatt, 1989)

ส่วนสุดท้ายจะอธิบายถึงสารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวต่อไป

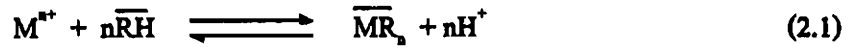
## 2.3 ชนิดของสารสกัด

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

### 2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อยคือ สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant) และ สารสกัดชนิดคีเลท (chelate extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น  $-COOH$ ,  $=P(O)OH$ ,  $-SO_3H$  ส่วนประเภทหลังสาร

สกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ดังสมการ



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ นอกจากนั้นสมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนั้นยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้น ๆ (Tavlarides et al., 1987)

สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (organic derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (monocarboxylic acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะกรดอัลคิลฟอสฟอริก (alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acids ; D2EHPA)

สารสกัดประเภทคีเลตได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วยคอนเนอร์กรุ๊ป (donor groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลตเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียงสองประเภทคือ (ก) ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (acidic leach liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (alkaline)

### 2.3.2 สารสกัดชนิดต่าง (Basic Extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีน และ แอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (quaternary ammonium halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (primary;  $\text{RNH}_2$ ) ชนิดทุติยภูมิ (secondary;  $\text{R}_2\text{NR}$ ) ชนิดตติยภูมิ (tertiary;  $\text{R}_3\text{N}$ ) และ ชนิดจตุภูมิ (quaternary;  $\text{R}_4\text{N}^+$ ) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (anionic species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีชื่อว่า  $\overline{\text{R}_3\text{N}^+\text{HA}^-}$  ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ  $\text{MY}^n$  จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุคังสมการ (2.2) ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้เอมีนเป็นสารสกัดคือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ (ammonium cation และ anion) การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการ 2.4



การเกิดวิฤภาคที่สามทำให้วิฤภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (modifiers) เช่นพวก long-chain aliphatic alcohol (Tavlarides et al., 1987)

### 2.3.3 สารสกัดชนิดขอลเวท (Solvating Extractant)

สารสกัดประเภทขอลเวท (solvating) หรือสารสกัดประเภทกลาง (neutral) เป็นสารสกัดที่ไม่มีเฉพาะคอนเนอร์กรุป จึงไม่สามารถแตกโปรตอนรอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวิฤภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวิฤภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดค่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (central metal atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



หรือ



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดขอลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอินทรีย์ในวิฤภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดขอลเวทดังสมการ 2.5 และสมการ 2.6