

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำตั้งเรื่อง

เนื่องจากในปัจจุบันการนำเอทานอลมาใช้ประโยชน์มีเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งเพื่อการบริโภค (beverage alcohol) และเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง (fuel alcohol) ซึ่งเอทานอลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้นั้นจะต้องเป็นเอทานอลที่ถูกกำจัดน้ำออกจนเกือบหมด หรือเอทานอลไร้น้ำ (anhydrous ethanol) ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าหรือเท่ากับ 99.5 %โดยน้ำหนัก โดยสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงเพื่อทดแทนน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล (2) ใช้ผสมกับน้ำมันเบนซิน เรียกว่า แก๊สโซฮอล์ (gasohol) หรือผสมกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ดีโซฮอล์ (diesohol) (3) ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้กับเครื่องยนต์ การใช้เอทานอลบริสุทธิ์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงที่สะดวกในขณะนี้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ คือการใช้ในรูปของการผสมกับน้ำมัน โดยเอทานอลที่ผสมในสัดส่วน 5–30 %โดยปริมาตร (แก๊สโซฮอล์และดีโซฮอล์, 2547) จะสามารถใช้เป็นสารทดแทนสารเอ็มทีบีอี (methyl tertiary butyl ether; MTBE) ที่เป็นสารเพิ่มออกซิเจนและออกเทนในน้ำมันได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในหลายประเทศ เช่น บราซิล สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย ฟิลิปปินส์ รวมถึงประเทศไทยด้วย ซึ่งการใช้ น้ำมันเบนซินผสมกับเอทานอลที่มีความเข้มข้น 99.5 %โดยน้ำหนัก เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ได้ดีกับรถยนต์ในปัจจุบันและสามารถลดมลภาวะทางอากาศได้อย่างดีอีกด้วย เนื่องจากเอทานอลที่มีความเข้มข้น 99 %โดยน้ำหนัก จะมีค่าออกเทนสูงกว่าน้ำมันเบนซินประมาณ 15 % (มูลนิธิสถาบันพลังงานทดแทนเอทานอล-ไบโอดีเซลแห่งประเทศไทย, 2000) หากรัฐบาลมีนโยบายสนับสนุนการใช้เชื้อเพลิงเอทานอลก็จะสามารถลดการนำเข้าสารเพิ่มค่าออกเทนหรือสารเพิ่มออกซิเจนจากต่างประเทศ และส่งผลทำให้อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลในประเทศ จะต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการ

ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมทั่วโลกประมาณ 93 % จะใช้กระบวนการหมักและจะได้น้ำหมักที่มีเอทานอลเข้มข้นประมาณ 10 ถึง 25 %โดยปริมาตร (Kazuhisa, 1997) ดังนั้นเพื่อต้องการให้ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น จะต้องนำน้ำหมักที่ได้เข้าสู่กระบวนการกลั่นลำดับส่วน ซึ่งจะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้น 95.6 %โดยน้ำหนัก และมีน้ำอยู่ 4.4 %โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารละลายเอทานอลและน้ำเป็นของผสมอะซีโอโทรป (azeotropic mixture) กล่าวคือเป็นของผสมที่แยกได้อย่างมีข้อจำกัดโดยวิธีการกลั่นแยกแบบ

ธรรมดา โดยของผสมจะเกิดอะซิโโทรปที่ความเข้มข้นของเอทานอล 95.6 % โดยน้ำหนัก ที่จุดเดือด 78.15 °C และความดัน 101.3 kPa (Seader and Henley, 1998) หากต้องการเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.5 % โดยน้ำหนัก จะต้องทำการกลั่นแบบอะซิโโทรป (azeotropic distillation) ซึ่งเป็นวิธีการกลั่นแยกของผสมโดยใช้คุณสมบัติแบบจุดเดือดร่วม (boiling-point azeotropic) ของของผสม จะต้องเติมสารช่วยกลั่น ได้แก่ เบนซีน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและติดไฟได้ง่าย รวมทั้งความซับซ้อนของการทำงาน ค่าก่อสร้างที่แพงและมีการใช้พลังงาน (ไอน้ำ) มากในการกลั่น นอกจากนี้เอทานอลที่ทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีการนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยาและเวชภัณฑ์เนื่องจากมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ด้วย

กระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวนพอเรชันเป็นกระบวนการแยกสารละลายผ่านเมมเบรนแบบเนื้อแน่น โดยกระบวนการนี้เหมาะสำหรับการแยกสารละลายผสมซึ่งมีองค์ประกอบหนึ่งอยู่ในอัตราส่วนที่ต่ำ โดยเฉพาะสารละลายอะซิโโทรป เช่น สารละลายแอลกอฮอล์-น้ำ หรือสารอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำทิ้ง เนื่องจากมีข้อได้เปรียบทั้งในแง่เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม กล่าวคือประหยัดพลังงาน ไม่ต้องใช้สารเคมีจึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อน และไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากน้ำทิ้งจากกระบวนการมีน้อยมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวหากเราสามารถนำเทคโนโลยีระบบเมมเบรนมาแยกของเหลวผสมโดยใช้กระบวนการเพอแวนพอเรชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเมมเบรนแบบหนึ่งได้ ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลเกือบบริสุทธิ์จากชีวมวลแทนวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดาที่ใช้ในปัจจุบัน

กระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวนพอเรชันได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงการค้า ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 โดยกระบวนการเริ่มแรกเป็นของบริษัท GFT (ปัจจุบัน Sulzer Chemtech) สำหรับแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล 95 % โดยน้ำหนัก เพื่อผลิตเอทานอล 99.5 % โดยน้ำหนัก แทนการกลั่นแบบอะซิโโทรป (Winston and Kamalesh, 1992) แต่อย่างไรก็ตามการนำกระบวนการเพอแวนพอเรชันไปใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมยังมีจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเมมเบรนแบบอื่นๆ เช่น ออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) อัลตราฟิลเตรชัน (ultra filtration) ไมโครฟิลเตรชัน (micro filtration) ในขณะที่กระบวนการเมมเบรนแบบอื่นได้รับการพัฒนาจนถึงขั้นเป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือมีเมมเบรนทางการค้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาถูก รวมทั้งมีเมมเบรนหลากหลายชนิดที่สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารละลายที่ต้องการแยก แต่สำหรับกระบวนการเพอแวนพอเรชันยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับชนิดของเมมเบรน กล่าวคือเมมเบรนที่ผลิตในทางการค้ายังมีไม่หลากหลายชนิด และมีประสิทธิภาพในการแยกไม่สูงมากพอ จึงพบว่าการวิจัยและประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการนี้ในช่วง 20 ที่ผ่านมานี้ นักวิจัยหลายท่านจะเน้นการพัฒนาเมมเบรนสังเคราะห์ที่ให้มีทั้งสมรรถนะในการแยกและค่าฟลักซ์ที่สูงขึ้นสำหรับสารละลายหนึ่งๆ และมีการศึกษาการถ่ายเทมวลสารเพื่อให้เข้าใจกลไกของกระบวนการที่ชัดเจนขึ้น โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาการแยกสารอินทรีย์เจือจางออกจากน้ำ เช่น แอลกอฮอล์-น้ำ โดยใช้เมมเบรนชนิด silicone rubber (Seok et al., 1987) silicalite (Matsuda et al., 2002)

เมมเบรนเชิงประกอบ polydimethylsiloxane (Li et al., 2004) silicone/PVDF/silicone (Chang et al., 2004) 1-trimethyl-1-propyne (Gonzalez-Velasco et al., 2002) และ คีซการแยกน้ำออกจากสารละลายแอลกอฮอล์โดยใช้เมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol (Shaban, 1997) เมมเบรนเชิงประกอบ PVA/PAA (Vauclair et al., 1997) cellulose acetate (Seok et al., 1987) polyimide (Kim et al., 2000) โดยเมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้ ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแบบแผ่นและแบบท่อม้วน สำหรับเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงและแบบท่อ ยังคงมีการนำมาใช้น้อยส่วนใหญ่อ้างอิงอยู่ในขั้นพัฒนาอยู่ สำหรับวัสดุที่ใช้ในการผลิตเมมเบรน สังเคราะห์ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ และในปัจจุบันเริ่มมีการใช้สารอนินทรีย์ ซึ่งได้แก่ ซีโอไลท์ โลหะและเซรามิกส์ เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสารอินทรีย์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวกพอเรชัน มาใช้แยกสารละลายเอทานอล-น้ำ เพื่อทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น โดยศึกษาถึง ประสิทธิภาพการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการเพอแวกพอเรชัน และศึกษา พารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าการแยกและเพอเมอแฟกซ์ของสารละลายเอทานอล-น้ำ ซึ่งได้แก่ชนิด ของเมมเบรน อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายป้อน และเพื่อพยายามแยกเอทานอลให้ มีความบริสุทธิ์ได้สูงอย่างน้อย 99.5 %โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการแยกสารละลาย เอทานอล-น้ำโดยวิธีการดูดซับด้วย

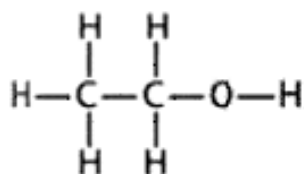
## 1.2 การตรวจเอกสาร

### 1.2.1 เอทานอล (ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol)

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นของเหลวใสไม่มีสี ติดไฟง่าย มีกลิ่นเฉพาะตัว สำหรับสารละลายเจือจางจะมีรสหวาน แต่ถ้าสารละลายเข้มข้นจะมีรสขม

#### 1.2.1.1 องค์ประกอบของเอทานอล

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง ที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน เอทานอลมีขนาดโมเลกุล 0.52 นาโนเมตร และจัดเป็น โมเลกุลมีขั้วจึงสามารถละลายในน้ำได้ โดยในหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หนึ่งหมู่ ดังภาพประกอบ 1.1



ภาพประกอบ 1.1 โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล

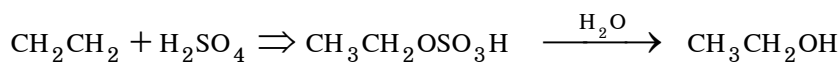
เอทานอลจะหลอมที่  $-114^{\circ}\text{C}$  มีจุดเดือดที่  $78.5^{\circ}\text{C}$  และมีความหนาแน่น 0.789 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากเอทานอลมีจุดเยือกแข็งต่ำ จึงสามารถนำมาใช้เป็นของไหลในเทอร์โมมิเตอร์สำหรับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า  $-40^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นจุดเยือกแข็งของ mercury และนำมาใช้ประโยชน์สำหรับงานอื่นๆ ที่ต้องการอุณหภูมิต่ำ เช่น antifreeze ใน automobile radiator นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลายสี ยา และแลคเกอร์ ใช้เช็ดทำความสะอาด และใช้เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ (เหล้า ไวน์และเบียร์) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถนำมาผสมในน้ำมันเบนซินซึ่งจะช่วยเพิ่มค่าออกเทนได้ เรียกว่า แก๊สโซฮอล์ สำหรับประเทศไทยเลือกใช้แก๊สโซฮอล์สูตร E10 ซึ่งก็คือน้ำมันเบนซิน 91 (90%) ผสมกับเอทานอล (10%) ปริมาณที่ผสมคิดโดยปริมาตร

#### 1.2.1.2 กระบวนการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตเอทานอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

##### ก. เอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี

(chemical synthesis) เป็นการผลิตจากอนุพันธ์สารปิโตรเลียม เช่น เอทิลีนด้วยปฏิกิริยาการระเหยน้ำ (dehydration) โดยเอทิลีนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์โดยใช้กรดซัลฟูริกตามด้วยน้ำ ดังสมการ



เอทิลีน กรดซัลฟูริก

เอทานอล

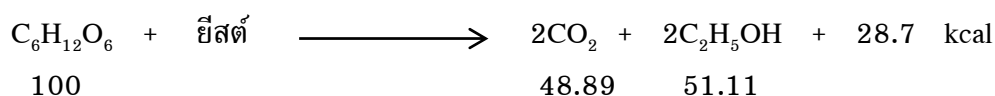
ข. กระบวนการหมัก (fermentation process)

ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมทั่วโลกประมาณ 93 % จะใช้กระบวนการหมัก ซึ่งวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเอทานอลจะเป็นสารประกอบจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังนี้

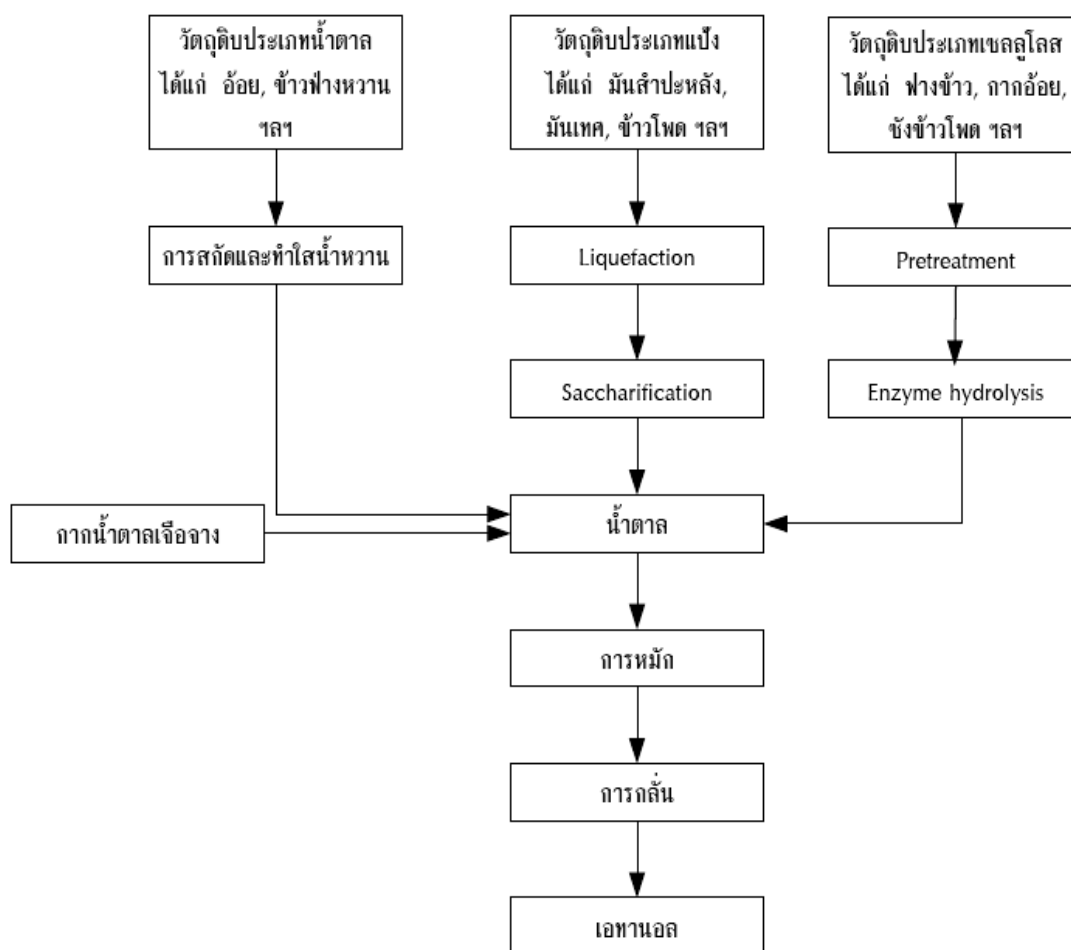
(1) วัตถุดิบประเภทน้ำตาล ได้แก่ น้ำอ้อย กากน้ำตาล และบีทน้ำตาล ยีสต์สามารถใช้วัตถุดิบประเภทนี้ได้โดยตรงและไม่ต้องผ่านกระบวนการใด

(2) วัตถุดิบประเภทแป้ง ได้แก่ ธัญพืช ข้าวโพด มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง ในการผลิตเอทานอลนั้น แป้งจะต้องถูกย่อย (Starch hydrolysis) ให้ได้น้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเสียก่อน จึงจะสามารถเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลได้ ซึ่งการย่อยแป้งประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ การย่อยครั้งแรกหรือการทำให้เหลว (Liquefaction) การย่อยครั้งสุดท้ายหรือการทำให้หวาน (Saccharification)

(3) วัตถุดิบประเภทเซลลูโลส ได้แก่ ฟางข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น แผนผังการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบทางการเกษตร แสดงดังภาพประกอบ 1.2 ในกระบวนการผลิตหากใช้วัตถุดิบประเภทแป้งและเซลลูโลสจะต้องนำมาย่อยให้เป็นน้ำตาลก่อน โดยการใช้กรดแบคทีเรียหรือเอนไซม์ ส่วนวัตถุดิบที่เป็นน้ำตาลสามารถนำมาหมักกับเชื้อยีสต์ได้เลยซึ่งประกอบด้วยสองขั้นตอนดังนี้คือ ขั้นตอนแรกยีสต์จะใช้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) เป็นอาหารและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลโดยกระบวนการ glycolysis ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ดังสมการ



โดยตามทฤษฎีน้ำตาลกลูโคส 100 % จะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอทานอล 48.89 และ 51.11 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดการสูญเสียได้เป็นสารประกอบอื่นๆหรือใช้ในการสร้างเซลล์ของยีสต์ทำให้ได้เอทานอลประมาณ 48 % โดยน้ำหนัก เมื่อได้เอทานอลแล้ว ขั้นตอนที่สองเป็นการทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นและบริสุทธิ์สูงขึ้น



ภาพประกอบ 1.2 การผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตร  
ที่มา: Kazuhisa, 1997

1.2.1.3 การทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นและบริสุทธิ์สูงขึ้นสามารถทำได้ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก. การกลั่นลำดับส่วน (fractional distillation) เหมาะสำหรับกลั่นแยกของเหลวที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน หรือแยกสารละลายที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายเป็นสารที่ระเหยง่ายทั้งคู่ ซึ่งถ้ากลั่นแบบธรรมดาเพียงครั้งเดียวจะได้สารที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น การกลั่นน้ำผสมเอทานอลต้องกลั่นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง จึงจะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นทุกครั้ง แต่ในทางปฏิบัติแทนที่จะนำของเหลวไปกลั่นซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและใช้เวลานาน จึงได้นำไปกลั่นในคอลัมน์ลำดับส่วนหรือในหอกลั่นซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับเป็นการกลั่นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งจะได้เอทานอลมีความเข้มข้น 95.6 % โดยน้ำหนักและมีน้ำอยู่ 4.4 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารละลายเอทานอลและน้ำเป็นของผสมอะซิโโทรป ซึ่งเป็นของผสมที่แยกได้

อย่างมีข้อจำกัดด้วยวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดา โดยของผสมเกิดอะซิโโทรปที่สัดส่วนเอทานอล 95.6 % โดยน้ำหนัก

ข. การกลั่นแบบอะซิโโทรป (azeotropic distillation) ซึ่งเป็นวิธีการกลั่นแยกของผสมโดยใช้คุณสมบัติแบบจุดเดือดร่วมของของผสม โดยโรงงานผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ในปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้วิธีการนี้ เนื่องจากจะต้องเติมสารช่วยกลั่น ได้แก่ เบนซีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและติดไฟได้ง่าย รวมทั้งความซับซ้อนของการทำงาน ค่าก่อสร้างที่แพงและมีการใช้พลังงาน (ไอน้ำ) มากในการกลั่น

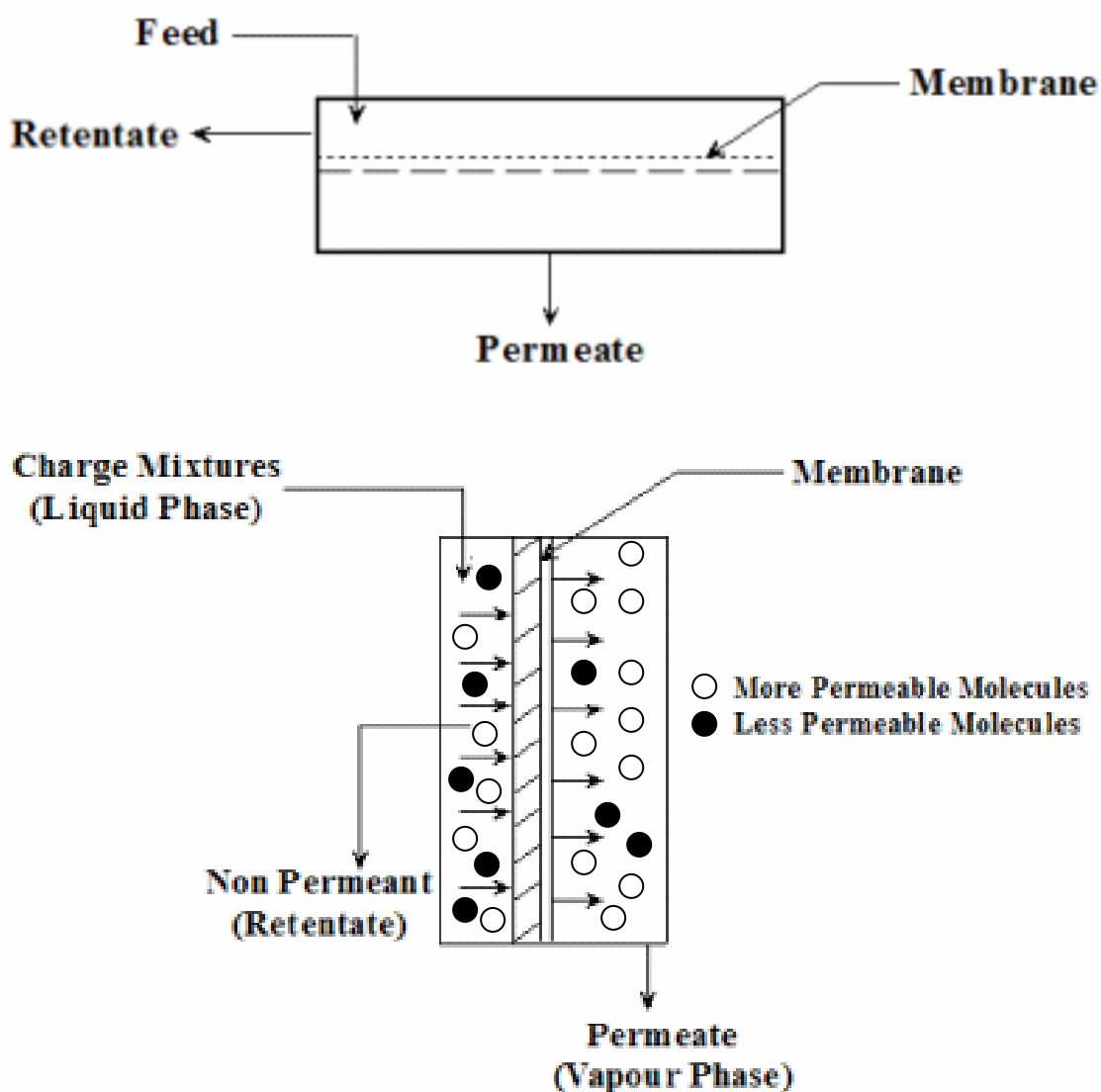
ค. การดูดซับ (adsorption) โดยใช้ molecular sieve dehydrator ซึ่งเป็นสารจำพวก zeolite ที่เป็นตัวดูดความชื้นของอากาศดูดซับน้ำออกจากเอทานอลที่ได้จากการกลั่น ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีการกลั่นแบบอะซิโโทรป

ง. การแยกด้วยกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวนพอเรชัน ซึ่งจะใช้หลักการทำงานของเมมเบรน (permeate membrane) ร่วมกับการระเหย (evaporation) ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีการอื่นๆ คือ ประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายดูดซับ จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำทิ้งจากกระบวนการมีน้อยมาก

### 1.2.2 กระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวนพอเรชัน

เป็นกระบวนการสำหรับการแยกองค์ประกอบหนึ่งๆ ออกจากสารละลายผ่านเมมเบรนแบบเนื้อแน่น โดยกระบวนการนี้มีพื้นฐานมาจากกระบวนการเมมเบรนแบบออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) และแก๊สเพอเมชัน (gas permeation) ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา กระบวนการเพอแวนพอเรชันได้รับความสนใจและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน ซึ่งสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ของการแยกหรือชนิดของสารละลาย คือ 1. การแยกน้ำออกจากสารละลายอินทรีย์ เช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเพื่อผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 2. การแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลายเจือจาง เช่น การแยกแอลกอฮอล์ออกจากสารละลายแอลกอฮอล์เจือจาง และการแยกฟีนอลหรือสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากน้ำทิ้ง 3. การแยกของผสมอินทรีย์ เช่น การแยก o-xylene จาก p-xylene เมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้สามารถแบ่งตามคุณสมบัติในการเลือกผ่านได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งเลือกผ่านน้ำมากกว่าสารอินทรีย์และเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งเลือกผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ สำหรับเมมเบรนชนิดหนึ่งจะเหมาะสำหรับสารละลายชนิดหนึ่งๆ เท่านั้น

หลักการของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวนพอเรชัน คือ องค์ประกอบหนึ่งในสารละลายของเหลวป้อนสามารถแพร่และละลายผ่านเมมเบรนสังเคราะห์ โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนเนื่องจากผลต่างของศักย์ภาพทางเคมี กล่าวคือองค์ประกอบต่างชนิดกันในสารละลายมีความสามารถในการละลายและการแพร่ผ่านเมมเบรนได้ไม่เท่ากันดังแสดงในภาพประกอบ 1.3

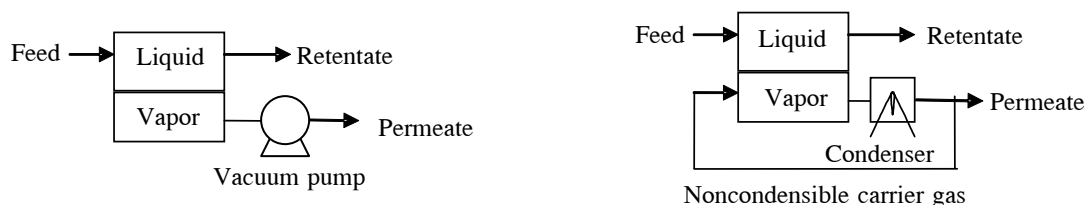


ภาพประกอบ 1.3 หลักการของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวปพอเรชัน

ที่มา: Mahesh and Guest, 2004

สารละลายที่สามารถผ่านเมมเบรนได้เรียกว่า เอมิเอท (permeate) จะอยู่ในสถานะไอซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากควบคุมความดันด้านเอมิเอทให้มีค่าต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวของสารละลายที่สามารถผ่านเมมเบรน สำหรับวิธีการลดความดันด้านเอมิเอทที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปมี 2 วิธีคือการใช้ปั๊มสุญญากาศและใช้แก๊สตัวพา (carrier gas) ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 1.4 (a) และ (b) ตามลำดับ โดยในการเปลี่ยนเฟสของของเหลวป้อนเป็นไอในเอมิเอทจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการระเหยร่วมด้วยซึ่งทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายป้อน และการเก็บตัวอย่างที่เป็นไอของเอมิเอทสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้สารนั้นกลั่นตัวเป็นของเหลว





(a) Vacuum – driven pervaporation

(b) Carrier gas pervaporation

ภาพประกอบ 1.4 วิธีการลดความดันด้านเพอมีเอทสำหรับเพอแวปพอเรชัน

ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992

### 1.2.2.1 ทฤษฎี

กระบวนการเพอแวปพอเรชัน (pervaporation process) เป็นกระบวนการแยกของผสมโดยใช้เมมเบรน ซึ่งการเคลื่อนที่ของของเหลวผสมผ่านเมมเบรนสามารถอธิบายด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (solution-diffusion mechanism)

สมมติฐานพื้นฐานของการซึมผ่านเมมเบรนโดยกระบวนการเพอแวปพอเรชัน คือ

- 1) ของเหลวผสมที่ป้อนเข้าสู่เมมเบรนจะสัมผัสด้านหนึ่งของเมมเบรนและจะถูกละลายหรือดูดซับเข้าสู่เมมเบรน
- 2) แต่ละองค์ประกอบในของเหลวผสมจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนโดยกลไกการแพร่ด้วยอัตราการแพร่ที่แตกต่างกัน
- 3) องค์ประกอบที่สามารถซึมผ่านเมมเบรนจะเคลื่อนที่มาสู่อีกด้านหนึ่งของเมมเบรนและเกิดการระเหยเป็นแก๊สเนื่องจากความดันที่ลดลง

ก. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อศักยภาพของเมมเบรน

ตามกลไกการละลาย-การแพร่ ค่าพลักซ์จะสูงขึ้นเมื่อสายโซ่ของพอลิเมอร์ในเมมเบรนมีความสามารถในการเคลื่อนไหว และชนิดของสารป้อนมีความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนได้เพิ่มขึ้น คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแพร่ของสารคือ โครงสร้างทางเคมีที่ใช้ผลิตเมมเบรน จำนวนการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ในเมมเบรนและความมีรูพรุนของเมมเบรน อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโมเลกุลของสารกับเมมเบรน และการแพร่ของสารสามารถกำหนดในรูปของค่าคงที่ความสามารถในการซึมผ่าน (permeability constant) โดยใช้ความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส ดังนี้

$$P = P_0 e^{-E_p / RT} \quad (1.1)$$

โดยที่  $E_p$  คือ พลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านสารของเมมเบรน,  $\text{kJ mol}^{-1}$

$I_0$	คือ	ค่าคงที่สภาพการซึมผ่านสารของเมมเบรน (permeability constant), kg. m. m <sup>-2</sup> Pa <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
$R$	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส, 8.314×10 <sup>-3</sup> kJ mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$T$	คือ	อุณหภูมิ, K
	ข.	คุณลักษณะของเพอเวปพอเรชัน
	(1)	การคำนวณหาเพอเมเทฟลักซ์ (permeate flux)

$$J_i = \frac{W_i}{A_i} \quad (1.2)$$

โดยที่	$J_i$	คือ	เพอเมเทฟลักซ์ของสารชนิด $i$ , kg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>
	$W_i$	คือ	น้ำหนักของสารที่ผ่านเมมเบรนในช่วงเวลา $t$ , kg
	$A$	คือ	พื้นที่ผิวของเมมเบรน, m <sup>2</sup>
	$t$	คือ	เวลาที่เพอเมเทสซึมใน cold trap, h

(2) การคำนวณหาค่าการแยก (separation factor)

- อัตราส่วนสมดุล คือ อัตราส่วนของสัดส่วนมวลของสารชนิดนั้นๆ ใน 2 เฟสที่จุดสมดุล สำหรับกรณีของไอ-ของเหลว (vapor-liquid) จะนิยามโดยค่า  $K$  ( $K$ -value) หรืออัตราส่วนที่สมดุลระหว่างไอและของเหลว คือ

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (1.3)$$

โดยที่	$K_i$	คือ	ค่า $K$ ของสารชนิด $i$
	$y_i$	คือ	เศษส่วนเชิงมวลของสารชนิด $i$ ในสถานะไอ
	$x_i$	คือ	เศษส่วนเชิงมวลของสารชนิด $i$ ในสถานะของเหลว

ดังนั้น  $y_i = K_i x_i$  และ  $\sum y_i = 1$  จะได้  $\sum K_i x_i = 1$  และ  $\sum \left( \frac{y_i}{K_i} \right) = 1$

- การแยกสารที่มี 2 องค์ประกอบหรือมากกว่า จะสามารถนิยามอยู่ในรูปของอัตราส่วนสมดุล เรียกว่า separation factor สำหรับกรณีของ vapor-liquid ความสามารถในการระเหยสัมพัทธ์ (relative volatility) สามารถนิยามตามสมการดังนี้

$$\alpha_{ij} = \frac{K_i}{K_j} = \left( \frac{y_i}{x_i} \right) / \left( \frac{y_j}{x_j} \right) = \frac{(y_i / y_j)_{permeate}}{(x_i / x_j)_{feed}} \quad (1.4)$$

โดยที่  $\alpha_{ij}$  คือ ค่าการแยก (separation factor ) ของของผสมสำหรับสารชนิด  $i$  และ  $j$

$y_i, y_j$  คือ เศษส่วนเชิงมวลของสารชนิด  $i$  และ  $j$  ในเฟอมิเอท

$x_i, x_j$  คือ เศษส่วนเชิงมวลของสารชนิด  $i$  และ  $j$  ในสารป้อน

$$\alpha_{ij} = \frac{(v_i \rho_i / v_j \rho_j)_P}{(v_i \rho_i / v_j \rho_j)_f} \quad (1.5)$$

โดยที่  $\rho_i, \rho_j$  คือ ความหนาแน่นของสารชนิด  $i$  และ  $j$

$V_i, V_j$  คือ เศษส่วนเชิงปริมาตร (volume fraction) ของสารชนิด  $i$  และ  $j$   
สมมุติว่าความหนาแน่นของสารป้อนและสารที่ซึมผ่านเมมเบรนมีค่าเท่ากัน

จะได้

$$\alpha_{ij} = \frac{(v_i / v_j)_P}{(v_i / v_j)_f} \quad (1.6)$$

### 1.2.3 ข้อดีของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวกพอเรชั่น

กระบวนการเพอแวกพอเรชั่นมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการแยกอื่นๆ ดังนี้คือ

1.2.3.1 ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำเพราะสามารถแยกโดยใช้ความดันต่ำ ตัวอย่างเช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเพื่อผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ ถ้าใช้กระบวนการเพอแวกพอเรชั่นจะมีข้อได้เปรียบทางด้านพลังงานกว่าการกลั่นหรือการต้มระเหย

1.2.3.2 ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เนื่องจากกระบวนการเพอแวกพอเรชั่นสามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งเฟอมิเอทและรีเทนเทท เช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลโดยใช้เมมเบรนที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) จะได้รีเทนเททคือ เอทานอลเข้มข้น สำหรับเฟอมิเอทส่วนใหญ่เป็นน้ำซึ่งมีเอทานอลปนออกมาเพียงเล็กน้อย โดยสามารถนำกลับไปแยกใหม่ได้อีกครั้งโดยใช้เมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

1.2.3.3 สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิห้องได้ เนื่องจากเป็นการแยกสารตามคุณสมบัติการเลือกผ่านของเมมเบรนต่อสารละลายป้อนที่ต้องการแยก จึงเหมาะสำหรับแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้

1.2.3.4 สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ไม่ยาก เนื่องจากชุดเมมเบรนมีลักษณะเป็นชุด (module) หรือหน่วย และสามารถนำหน่วยย่อยๆ มาต่อเรียงกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแยกได้

1.2.3.5 สามารถดำเนินการแบบกะ (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) ตลอดจนถึงติดตั้งระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้ไม่ยุ่งยาก

1.2.3.6 เนื่องจากอุปกรณ์เมมเบรนมีการออกแบบให้มีพื้นที่ในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูงจึงมีขนาดกะทัดรัดไม่เปลืองพื้นที่ในการดำเนินการ

1.2.3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเพอเวปพอเรชั่นมีขนาดเล็กกะทัดรัดสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย

1.2.3.8 หลักการทำงานของกระบวนการไม่ถูกจำกัดด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องจุดอะซิโทรอป

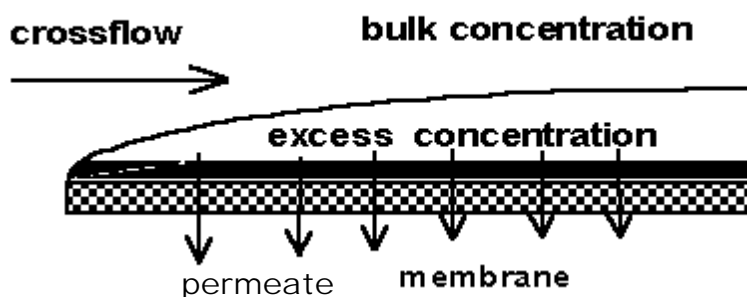
1.2.3.9 ระบบเพอเวปพอเรชั่นไม่ต้องใช้สารเคมีตัวที่สามเหมือนการกลั่นแบบอะซิโทรอป จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

จากข้อได้เปรียบของกระบวนการดังกล่าว หากสามารถนำกระบวนการเมมเบรนแบบเพอเวปพอเรชั่นไปใช้แทนกระบวนการแบบเดิมได้ เช่น สำหรับการแยกเอทานอล-น้ำจากชีวมวลแทนการกลั่นที่ใช้อยู่ หรืออาจจะนำมาใช้แทนบางขั้นตอน เช่น แทนการกลั่นแบบอะซิโทรอปก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์

#### 1.2.4 ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอเวปพอเรชั่น

ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอเวปพอเรชั่นมีเช่นเดียวกับกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนแบบอื่นๆ มีดังนี้คือ

1.2.4.1 Concentration polarization (CP) ซึ่งหมายถึง การสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงกว่าในบริเวณที่อยู่ห่างออกไป (bulk solution) ดังภาพประกอบ 1.5 ซึ่งแสดงการเกิด Concentration polarization (CP) และการเกิด CP จะลดสมรรถนะของการแยกโดยจะเพิ่มความต้านทานต่อการไหลของสารละลายทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลงเนื่องจากทำให้เกิดการอุดตัน (fouling) การลด CP สามารถทำได้โดยการออกแบบอุปกรณ์ให้มีการป้อนสารละลายผ่านเมมเบรนแบบไหลขวางและที่ความเร็วสูง ซึ่งจะช่วยให้สารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนที่สะสมเกิดการแพร่กลับไปใน bulk solution สำหรับกระบวนการเมมเบรนแบบเพอเวปพอเรชั่น CP จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากการป้อนสารละลายผ่านเมมเบรนส่วนใหญ่จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งจะช่วยให้สารที่สะสมบนผิวหน้าเมมเบรนหลุดออกไป



ภาพประกอบ 1.5 การเกิด Concentration polarization (CP)

ที่มา: Roberto, 2005

1.2.4.2 Fouling หมายถึง การสะสมหรือการอุดตันของสารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนบนผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งมีผลทำให้ฟลักซ์ลดลงและค่าการแยกเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเกิดการอุดตัน (fouling) จะเพิ่มความต้านทานต่อการไหลของสารละลาย ซึ่งเกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเมมเบรนและสารละลายที่ต้องการแยก สิ่งสะสมและอุดตันจะไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม

#### 1.2.4.3 ความคงตัวของเมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิเมอร์ จึงมีความคงตัวจำกัด เช่น เมมเบรนชนิดพอลิซัลโฟนสามารถใช้งานในช่วง pH 1-13 ซึ่งใช้งานได้ในช่วงกว้างกว่าเมมเบรนจำพวกเซลลูโลส ซึ่งมีความคงตัวอยู่ในช่วง pH 4-8 และอุณหภูมิก็มีผลต่อเมมเบรน โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาเมมเบรนพอลิเมอร์ที่ทนอุณหภูมิได้สูง 60-100 °C เมมเบรนบางชนิดไม่ทนต่อคลอรีนหรือตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนเมมเบรนที่ผลิตจากเซรามิกมีความคงตัวต่อสารเคมีและอุณหภูมิดีมาก สามารถฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำได้ ทนต่อจุลินทรีย์ แต่ความสามารถในการแยกยังด้อยกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ซึ่งขณะนี้มีการพัฒนาแต่ค่อนข้างจำกัดและราคาแพง

#### 1.2.5 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการเพอแวกพอเรชันส่วนใหญ่ผลิตมาจากวัสดุอินทรีย์ที่เป็นพอลิเมอร์ และในปัจจุบันเริ่มมีการใช้สารอนินทรีย์ ซึ่งได้แก่ โลหะ แก้ว และเซรามิกส์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและพัฒนาเมมเบรนอนินทรีย์ชนิดใหม่จากซีโอไลต์ (zeolite) การเลือกชนิดของวัสดุเพื่อนำมาผลิตเมมเบรนขึ้นอยู่กับการใช้งาน ชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตเมมเบรนในทางการค้ามีดังนี้คือ

1.2.5.1 พอลิเมอร์สำหรับผลิตเมมเบรนเพื่อใช้งานในระบบเพอแวกพอเรชันแสดงดังตาราง 1.1 มีดังนี้คือ

ตาราง 1.1 พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการผลิตเมมเบรนสำหรับกระบวนการเพอแวนพอเรชัน

Membrane material	Abbreviation	Type	Supplier	Membrane thickness ( $\mu\text{m}$ )
Polyvinyl alcohol <sup>a</sup>	PVA		GFT	-
Cellulose acetate <sup>a</sup>	CA		Hocchst Celanese	-
Silicones <sup>a</sup>	-		MTR	-
Polydimethylsiloxane	PDMS	Unfilled	Rhone Poulenc	80 to 150
		Silica-filled	Dow Corning	175
		Radiation cured	GFT	80
		Silica-filled	Mempro	140
Polyether block polyamide	PEBA		Atochem	50 to 100
Poly (ethylene-co-vinyl acetate)	PEVA		3 M	75
Polysulfone	PSF		General Electric	35
Cellulose acetate butyrate	CAB		Kodak	55
Polytetrafluoroethylene	PTFE		Fluorofilm	25
Polyethylene	PE		Nesco	95
Ethylene propylene diene rubber	EPDM		Exxon	40
Ethylcellulose	EC		Kodak	25
Poly(butylmethacrylate)	PBMA		Aldrich	25
Polyisoprene	PIP		Aldrich	35

ที่มา: Sonja et al., 1998, <sup>a</sup> Winston and Kamalesh, 1992

### 1.2.5.2 สารอนินทรีย์สำหรับผลิตเมมเบรน

เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุอนินทรีย์จะมีคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เหนือกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ สารอนินทรีย์ที่นิยมนำมาผลิตเมมเบรนสังเคราะห์ ได้แก่ เซรามิกส์ โลหะ แก้ว และซีโอไลท์ (zeolite) ซึ่งปัจจุบันมีการนำเมมเบรนอนินทรีย์มาใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ไมโครฟิลเตรชันและการแยกแก๊สเท่านั้น สำหรับกระบวนการเพอแวกพอเรชันการผลิตเมมเบรนอนินทรีย์ยังมีการวิจัยและกำลังพัฒนาอยู่ โดยวัสดุอนินทรีย์ชนิดใหม่ที่นำมาผลิตเมมเบรน ได้แก่ สารจำพวกซีโอไลท์ เช่น silicalite, ZSM-5 เนื่องจากพบว่าการกระจายของรูพรุนแคบจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในกระบวนการเพอแวกพอเรชันและการแยกแก๊ส

### 1.2.6 เมมเบรนสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเพอแวกพอเรชัน

เมมเบรนสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเพอแวกพอเรชันเป็นเมมเบรนแบบเนื้อแน่น (dense membrane) หรือไม่มีรูพรุน (nonporous membrane) เช่นเดียวกับกระบวนการเมมเบรนแบบออสโมซิสผันกลับและแก๊สเพอเมอชัน มีลักษณะผิวเนื้อแน่นและบาง เป็นเมมเบรนที่มีความหนาแน่นของเนื้อพอลิเมอร์สูง มีช่องว่างในเนื้อพอลิเมอร์น้อย (น้อยกว่า 40%) กลไกการไหลของสารละลายผ่านเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเป็นแบบการละลาย-การแพร่ สารที่สามารถผ่านเมมเบรนได้จะละลาย (solution) ในเนื้อเมมเบรนแล้วผ่านไปโดยการแพร่ (diffusion) ผ่านผิวเนื้อแน่นนั้นเนื่องจากมีแรงขับเคลื่อน (driving force) เป็นความดัน ความเข้มข้นหรือความต่างศักย์ไฟฟ้า การแยก (separation) ขององค์ประกอบต่างๆ ในสารละลายป้อน ซึ่งเป็นของผสมเกิดจากการที่แต่ละองค์ประกอบมีอัตราการละลายและการแพร่แตกต่างกัน เมมเบรนแบบนี้จะให้ค่าการแยกหรือการเลือกผ่าน (selectivity) ที่ดี แต่ให้อัตราการผ่าน (permeation rate) ต่ำ เมมเบรนแบบเนื้อแน่นสามารถแบ่งย่อยตามชนิดของโครงสร้างได้อีก 3 ชนิดย่อยๆ ดังนี้คือ

1.2.6.1 เมมเบรนแบบสมมาตร (symmetric or isotropic membrane) เป็นเมมเบรนซึ่งพื้นที่ผิวในสัณฐานวิทยา (morphology) ทุกระนาบมีลักษณะผิวเหมือนกันทุกระนาบ เช่นเนื้อแน่นเหมือนกันทุกระนาบตลอดแนวลึก ดังแสดงในภาพประกอบ 1.6

1.2.6.2 เมมเบรนแบบไม่สมมาตร (asymmetric or anisotropic membrane) เป็นเมมเบรนซึ่งพื้นที่ผิวในระนาบมีลักษณะผิวไม่เหมือนกันตลอดแนวลึก ดังแสดงในภาพประกอบ 1.7 อาจมีชั้นผิวและชั้นรองรับเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันแต่โครงสร้างของชั้นผิวและชั้นรองรับต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากกลไกในการผลิต

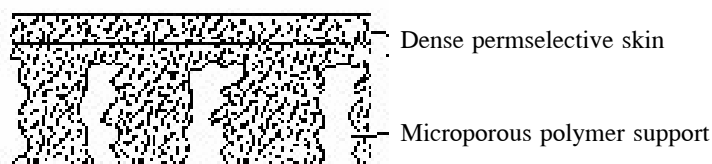
1.2.6.3 เมมเบรนเชิงประกอบ (composite membrane) จัดเป็นเมมเบรนชนิดไม่สมมาตร โครงสร้างของเมมเบรนประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนบนเป็นชั้นเมมเบรนบางหรือ active layer จะเป็นชั้นที่ควบคุมการผ่านของสาร ส่วนชั้นล่างจะเป็นชั้นเสริมหรือชั้นรองรับ (support) มีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นโครงสร้างเสริมความแข็งแรงทางกลของเมมเบรนดังแสดงในภาพประกอบ 1.8 พอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเป็นชั้นผิวและชั้นรองรับเป็นคนละชนิดกัน การผลิตชั้น

ผิวส่วนมากอาศัยการเกิดปฏิกิริยาบนชั้นรองรับ เช่น การเกิดพอลิเอไมด์โรเซชันของมอนอเมอร์ ความหนาของเมมเบรนทั้งหมดประมาณ 150–200 ไมโครเมตร จะมีความหนาของชั้นผิวที่บางมากเพียง 100–200 นาโนเมตร



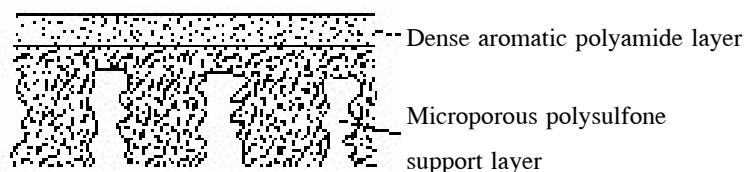
ภาพประกอบ 1.6 เมมเบรนแบบสมมาตร

ที่มา: Baker, 2004



ภาพประกอบ 1.7 เมมเบรนแบบไม่สมมาตร

ที่มา: Seader and Henley, 1998



ภาพประกอบ 1.8 เมมเบรนเชิงประกอบ

ที่มา: Seader and Henley, 1998

ชนิดของเมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรมต้องการคุณสมบัติการเลือกผ่านที่ดีและอัตราการแพร่ผ่านสูง ดังนั้นในกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวกพอเรชันจึงเลือกใช้เมมเบรนแบบไม่สมมาตรและแบบเชิงประกอบเป็นส่วนใหญ่ โดยเลือกให้โครงสร้างมีผิวหน้าเป็นแบบเนื้อแน่นบางเพื่อเพิ่มการเลือกผ่านและให้ส่วนล่างเป็นแบบมีรูพรุนและหนาเพื่อเพิ่มอัตราการแพร่ผ่านและทำหน้าที่เป็นส่วนรองรับ (support)

นอกจากนี้เมมเบรนสำหรับกระบวนการเพอแวกพอเรชันยังสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 2 กลุ่ม ดังนี้คือ เมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic) และเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)



ก. เมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic)

เป็นเมมเบรนที่เลือกผ่านน้ำมากกว่าสารอินทรีย์ ซึ่งมีการพัฒนาจากพอลิเมอร์หลายชนิด ตัวอย่างเมมเบรนที่มีศักยภาพและมีการนำไปใช้งานแล้ว เช่น เมมเบรนชนิด Polyvinyl alcohol (PVA), Polytetrafluoroethylene, crosslinked PVA เมมเบรนเชิงประกอบ PVA/PAN, Cellulose acetate, Polysulfone แสดงดังตาราง 1.2 ซึ่งแสดงประสิทธิภาพของเมมเบรน hydrophilic บางชนิดที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำ จะเห็นได้ว่าเมมเบรนให้ค่าการแยกสูงแต่ให้ค่าฟลักซ์ต่ำ เมมเบรนที่ให้ค่าการแยกสูง เช่น PVA และ Carboxymethylcellulose

ตาราง 1.2 ประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic) ที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการเพอแวกพอร์เรชัน

Membrane material	Ethanol Feed Concentration (wt%)	Temperature (°C)	Selectivity ( $\alpha$ )	Flux (kg/m <sup>2</sup> h)
Polyvinyl alcohol (GFT)	92-100	90-100	-	0-0.9
Polyvinyl alcohol (GFT)	0-100	60	High	0-4
Polyvinyl alcohol (GFT)	60-100	75-100	50-2000	0-2
Polyvinyl alcohol	0-100	60	High	0-2.4
Cellulose acetate	0-100	25	5-12	0.1-0.5
Cellulose triacetate	5-95	20	1-3.6	0.3-1.2
Carboxymethylcellulose	81-95	25	2400-5900	0.005-0.1
Polysulfone	15-95	20-50	3-6	-
Acrylic acid-acrylamide GPC	0-90	40	1-20	0-10
Polyacrylic acid-polycation	20-100	70	<1-2000	0.5-20
Polyvinylfluoride/acrylic acid	80	70	-	1.8
Polyvinylidene fluoride-N-vinylimidazole	0-95	70	-	0-6
Nafion <sup>TM</sup>	30-98	40	Low	<0.5

ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992

ปัจจุบันยังมีความพยายามที่จะพัฒนาเมมเบรนแบบ hydrophilic จากพอลิเมอร์ชนิดใหม่หรือใช้พอลิเมอร์ผสม ตลอดจนใช้วิธีการเชื่อมขวาง และการปรับสภาพผิวเพื่อให้ได้เมมเบรนที่มีทั้งค่าการแยกและค่าฟลักซ์สูงขึ้น

#### ข. เมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

เมมเบรนชนิดนี้ต้องมีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ เพื่อแยกสารละลายอินทรีย์เจือจางออกจากน้ำหรือทำให้ได้สารอินทรีย์ที่เข้มข้น ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรนชนิดนี้ เช่น เมมเบรนชนิด Silicone rubber, Polydimethylsiloxane (PDMS), Polypropylene, Polyacrylic acid, Polyetheramides, zeolite- filled silicone rubber สำหรับประสิทธิภาพของเมมเบรน hydrophobic บางชนิดที่ใช้ในการแยกสารละลายอินทรีย์-น้ำ แสดงในตาราง 1.3

ตาราง 1.3 ประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ที่ใช้ในการแยกสารละลายอินทรีย์-น้ำโดยกระบวนการเพอแวกพอเรชัน

Membrane material	Organic Feed Concentration (wt%)	Temperature (°C)	Selectivity ( $\alpha$ )	Organic Flux (kg/m <sup>2</sup> h)
Polypropylene	Acetone(45)	30	3	0.1-1.2
Silicone rubber	Butanol(0-8)	30	45-65	<0.035
Silicone rubber	IPA(27-100)	25	0.5-12	-
Silicone rubber	IPA(9-100)	25	9-22	0.03-0.11
Polyetheramides	Acetic acid(1.5-9)	50	-	0.18-0.28
Polyacrylic acid	Acetic acid(48)	15	2-8	0.4-0.55
Silicone rubber	Ethyl acetate(0.5-4)	30	High	-
GFT ethanol membrane (PDMS)	Ethanol(87-100)	60	150-10 <sup>4</sup>	0-1.6

ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992

### 1.2.7 วิธีการผลิตเมมเบรนสังเคราะห์แบบเนื้อแน่น

การเตรียมเมมเบรนแบบเนื้อแน่นสามารถผลิตได้หลายวิธี (รัตนา, 2541)

ดังนี้คือ

#### 1.2.7.1 เมมเบรนผลิตจากสารละลายพอลิเมอร์

ซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์และตัวทำละลายและอาจจะมีตัวไม่ละลาย

(non solvent) สารพองตัว (swelling agent) และสารอื่นๆ นำสารละลายมาทำเป็นแผ่นบางๆ หรือ cast บนแผ่นรองรับแล้วปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยจนหมด จะได้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่มีช่องว่างน้อยและมีความเป็นผลึกสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดอื่นๆ ตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดคุณสมบัติของเมมเบรนแบบนี้คือ อัตราการระเหยของตัวทำละลาย (evaporation/desolvation) องค์ประกอบของสารละลายและความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศขณะระเหย

#### 1.2.7.2 เมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์หลอมเหลว

พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกเมื่อหลอมเหลวจะสามารถทำให้มีรูปร่างตามต้องการได้ เมื่อทำให้เย็นตัวเป็นเมมเบรนจะมีรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ (เช่น แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุล เป็นต้น) และการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวหรือทำให้หลอมเหลว

#### 1.2.7.3 เมมเบรนที่เกิดระหว่างพอลิเมอร์ไรเซชัน

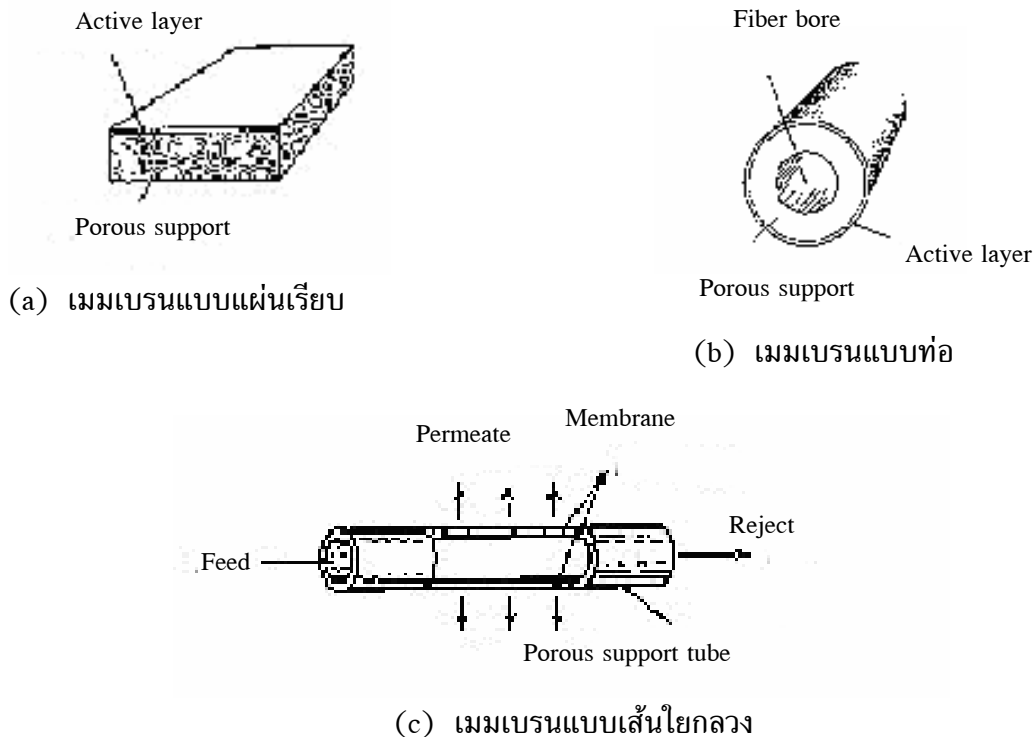
หมายถึง ในขณะที่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่งอาจมีการเชื่อมขวางและการเกิดการเคลื่อนย้ายของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (chain transfer) เกิดขึ้นด้วย มีการทำให้พอลิเมอร์ตกผลึกอย่างช้าๆ และทำให้เป็นแผ่นฟิล์ม อัตราเร็วของปฏิกิริยามีผลต่อโครงสร้างของเมมเบรน ถ้าเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันช้าๆ จะได้เมมเบรนเนื้อแน่นหรือมีความเป็นผลึกสูง

#### 1.2.7.4 เมมเบรนแบบบางมาก (ultrathin membrane)

เป็นเมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่มีความหนาระหว่าง 50-5,000 Å ข้อดีของเมมเบรนแบบนี้คือ มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient) สูงเพราะบางมาก การพัฒนาเมมเบรนแบบนี้ไปสู่การผลิตเมมเบรนแบบไม่สมมาตรซึ่งใช้กันอยู่เป็นส่วนใหญ่ การผลิตเมมเบรนแบบบางมากอาจเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์เจือจางโดยการจุ่มแผ่นแก้วลงในสารละลาย สารละลายจะเกาะบนแผ่นแก้ว เมื่อแช่ลงในน้ำเมมเบรนจะลอกหลุดออก หรืออาจทำเป็นแผ่นบางบนแผ่นรองรับ

### 1.2.8 อุปกรณ์เมมเบรน (membrane module)

เมมเบรนที่ผลิตขึ้นทั้งที่มีรูปแบบเป็นเมมเบรนแบบไม่สมมาตรและเมมเบรนเชิงประกอบที่ใช้กันส่วนใหญ่มีรูปร่าง 3 แบบ แสดงดังภาพประกอบ 1.9 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ เมมเบรนแบบแผ่นเรียบจะมีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร และหนา 200 ไมโครเมตร โดยส่วนบนของชั้นผิวเนื้อแน่นจะมีความหนา 500-5000 Å แสดงดังภาพประกอบ 1.9 (a)



ภาพประกอบ 1.9 รูปร่างของเมมเบรน

ที่มา: Seader and Henley, 1998

เมมเบรนแบบท่อส่วนใหญ่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 0.5-5 เซนติเมตร และมีความยาวสูงถึง 6 เมตร ชั้นผิวส่วนบนเนื้อแน่นและบางจะอยู่บนผิวด้านนอกของท่อ ดังภาพประกอบ 1.9 (b) ส่วนชั้นรองรับที่มีความพรุนจะผลิตจากเส้นใยแก้วหรือโลหะ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงแสดงดังภาพประกอบ 1.9 (c) ซึ่งส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 45 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 85 ไมโครเมตร ยาว 1.2 เมตร และความหนาของชั้นผิวเนื้อแน่น 0.1-1 ไมโครเมตร เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงจะมีพื้นที่ผิวของเมมเบรนต่อปริมาตรของอุปกรณ์สูง ในการใช้งานต้องบรรจุหรือประกอบเมมเบรนในหน่วยอุปกรณ์ให้มีพื้นที่เมมเบรนตามต้องการ ซึ่งเรียกว่า module ได้มีการออกแบบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างต่างกันซึ่งแสดงในภาพประกอบ 1.10-1.12 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ แบบท่อ แบบเส้นใยกลวงและแบบท่อม้วน หลักการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งานคือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรนกะทัดรัดคือ มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง เป็นต้น อุปกรณ์เมมเบรนสำหรับกระบวนการเพอเวปอเรชันส่วนใหญ่จะเป็นแบบแผ่นและกรอบและแบบท่อม้วน สำหรับอุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงและแบบท่อม้วนกำลังมีการพัฒนาอยู่ ตัวอย่างการนำอุปกรณ์เมมเบรนแบบต่างๆ ไปใช้งานสำหรับเพอเวปอเรชันแสดงดังตาราง 1.4

ตาราง 1.4 บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์เมมเบรนแบบต่างๆเพื่อใช้งานสำหรับเพอเวปพอเรชัน

Organization	Primary Applications	Module Configuration	Membrane Material
GFT	Dehydration of liquid organics	Plate and frame	Polyvinyl alcohol composite
MTR	Organics recovery from wastewater	Spiral wound	Silicones
Lurgi	Dehydration of liquid organics Dehydration of vapor	Plate and frame Plate and frame	Polyvinyl alcohol composite Polyvinyl alcohol composite
Tokuyama Soda	Dehydration of IPA	Hollow-fiber bundles	Chitisan
Kalsep	Dehydration of liquid organics	Tubular bundles Spiral wound	Ion exchange composites
Hocchst Celanese	MeOH/MTBE	Plate and frame	Cellulose acetates
Mitsui	Dehydration of liquid organics		Polyvinyl alcohol composite

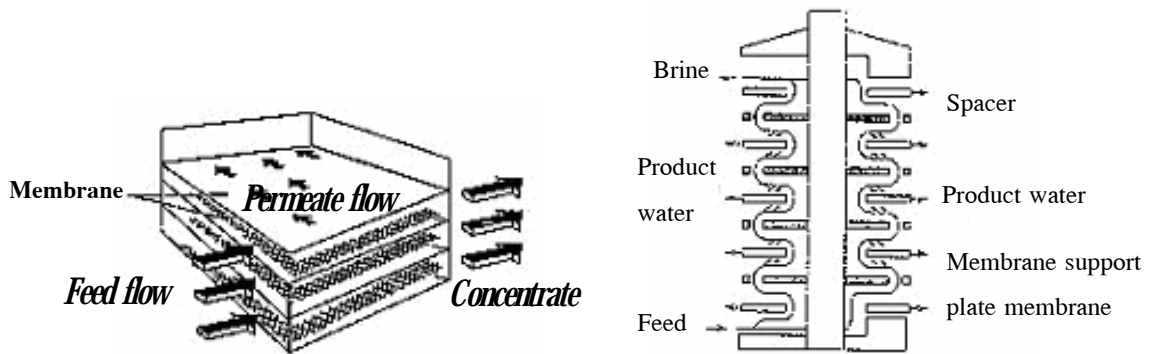
ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992

#### 1.2.8.1 อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ (plate and frame module)

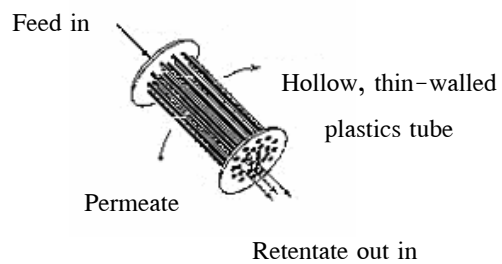
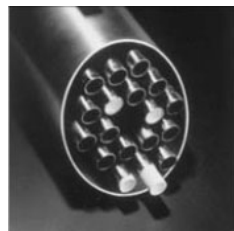
เมมเบรนแบบแผ่นจะใช้อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ ซึ่งมีลักษณะตามภาคตัดขวางเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมมเบรนจะประกบติดกันด้วยแผ่นกั้นซึ่งจะมีช่องว่างเพื่อให้เพอเมอเทสามารถไหลผ่านได้แสดงดังภาพประกอบ 1.10 อุปกรณ์แบบนี้มีการออกแบบโครงสร้างอย่างง่ายและสามารถนำมาใช้งานได้สะดวก

#### 1.2.8.2 อุปกรณ์แบบท่อ (tubular module)

เมมเบรนแบบท่อแสดงดังภาพประกอบ 1.11 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยปกติในตัวบรรจุ (housing) ประกอบด้วยท่อเมมเบรนหลายๆ ท่ออาจสูงถึง 30 ท่อ สารละลายป้อนจะไหลเข้าด้านในท่อและเพอเมอเทซึ่งไหลผ่านจะถูกเก็บมารวมกัน ชุดอุปกรณ์แบบนี้มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์ต่ำกว่าแบบแผ่นและกรอบ นอกจากเมมเบรนจะผลิตมาจากพอลิเมอร์แล้วยังนิยมผลิตเมมเบรนจากเซรามิกส์แบบท่อและอาจจะเป็นแบบโมนอลิท (monolith)



ภาพประกอบ 1.10 อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ

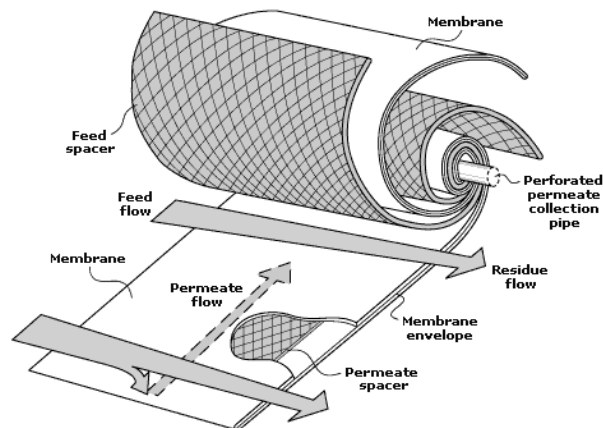


ภาพประกอบ 1.11 อุปกรณ์แบบท่อ

ที่มา: Seader and Henley, 1998

1.2.8.3 อุปกรณ์แบบท่อม้วน (spiral wound module)

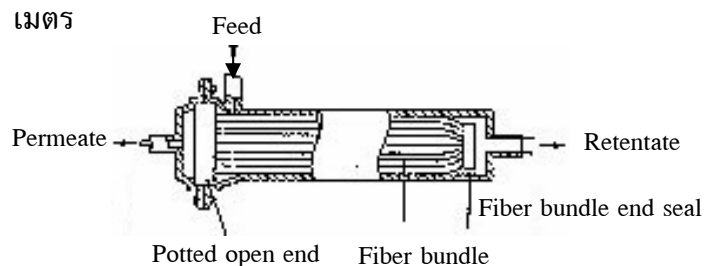
เป็นการนำเมมเบรนแผ่นเรียบม้วนรอบแกนโดยมีแผ่นกั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึง 40 เซนติเมตร แผ่นเมมเบรนชั้นหนึ่งๆ ประกอบด้วยแผ่นเมมเบรน 2 แผ่น โดยเมมเบรนทั้ง 2 แผ่นจะถูกกั้นด้วยแผ่นกั้นเพื่อให้เพอมีเอทและสารป้อนสามารถไหลผ่านได้ สารละลายป้อนจะไหลตามแนวแกนและเพอมีเอทจะไหลภายในท่อ ข้อดีของอุปกรณ์แบบนี้คือ มีความแข็งแรงสามารถทนต่อการใช้งานที่ความดันสูงๆ ได้ มีขนาดกระทัดรัด และโอกาสเกิด concentration polarization มีน้อย อุปกรณ์แบบท่อม้วนแสดงดังภาพประกอบ 1.12



ภาพประกอบ 1.12 อุปกรณ์แบบท่อม้วน

#### 1.2.8.4 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง (hollow fiber module)

เมมเบรนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เล็กมากคือ น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ในชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเมมเบรนแบบเส้นใยจำนวนมากคือมากกว่า 1 ล้านเส้นใย สารละลายป้อนจะถูกป้อนจากด้านในของเส้นใยและเก็บเพอมีอเทจจากด้านนอกของเส้นใย ข้อดีของเมมเบรนแบบนี้คือ เป็นเมมเบรนที่มีความยืดหยุ่น สามารถดำเนินการได้ 2 ทางคือ inside-out หรือ out-inside อุปกรณ์จะมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์เมมเบรนแบบอื่นๆ แต่ให้ประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียคือ มีราคาแพง การวิจัยและพัฒนาขี้น้อยอยู่ และเมมเบรนเกิดการอุดตันได้ง่าย อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงแสดงดังภาพประกอบ 1.13 จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-0.25 เมตร และยาว 1 เมตร



ภาพประกอบ 1.13 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง

ที่มา: Seader and Henley, 1998

ตาราง 1.5 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของอุปกรณ์เมมเบรนทั้ง 4 แบบ

	plate and frame	spiral- wound	tubular	hollow fiber
Packing density, $m^2/m^3$	30-500	200-800	30-200	500-9,000
Resistance to fouling	good	moderate	Very good	poor
Ease of cleaning	good	fair	excellent	poor
Relative cost	high	low	high	low
Main applications	D,RO,PV,UF, MF	D,RO,GP,UF,MF	RO,UF	D,RO,GP,UF

Note: D = dialysis, RO = reverse osmosis, GP = gas permeation, PV = pervaporation, UF = ultra filtration, MF = micro filtration

ที่มา: Seader and Henley, 1998

ซึ่งจากตาราง 1.5 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงจะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์มากที่สุด แม้ว่าอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบมีราคาสูงและมีความหนาแน่นปานกลาง แต่สามารถนำมาใช้ได้กับกระบวนการเมมเบรนเกือบทุกกระบวนการยกเว้นกระบวนการแยกแก๊ส และเป็นอุปกรณ์เมมเบรนแบบเดียวที่ใช้อย่างกว้างขวางสำหรับกระบวนการเพอแวกพอเรชัน สำหรับอุปกรณ์แบบท่อม้วนจะเป็นอุปกรณ์ที่นิยมสำหรับนำมาใช้งานอย่างมาก เนื่องจากราคาต่ำ และสามารถต้านทานต่อการอุดตันได้สูง อุปกรณ์แบบท่อมีการใช้งานค่อนข้างจำกัดจะเหมาะสำหรับการใช้งานที่มีโอกาสเกิดการอุดตันได้สูงซึ่งจำเป็นต้องมีการล้างเมมเบรน

### 1.2.9 การนำระบบเพอแวกพอเรชันไปประยุกต์ใช้งาน

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีจำนวนโรงงานที่เกี่ยวข้องกับเพอแวกพอเรชันเพิ่มมากขึ้น จาก 20 เป็น 50 โรงงาน โดยมีกำลังการผลิตอย่างน้อยที่สุดวันละ 5,000 ลิตร และมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เหตุผลที่มีการนำกระบวนการนี้มาใช้เพิ่มมากขึ้นทั้งในยุโรป เอเชีย และอเมริกาเหนือ ก็เนื่องมาจากลดค่าใช้จ่ายในเรื่องของพลังงาน มีราคาต้นทุนรวมของระบบค่อนข้างต่ำ ไม่ถูกจำกัดด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องจุดอะซิโทรปปราศจากมลพิษ น้ำทิ้งจากกระบวนการมีน้อยมาก ไม่ต้องการตัวทำละลายดูดซับ อุปกรณ์สำหรับกระบวนการมีขนาดเล็กสามารถนำไปรวมกับการกลั่นที่มีอยู่เดิมได้สะดวกโดยนำไปแทนที่ขั้นตอนการกลั่นแบบอะซิโทรป และราคาต้นทุนสำหรับการดำเนินการต่ำ สำหรับในสหรัฐอเมริกาจะพิจารณาข้อได้เปรียบในแง่สิ่งแวดล้อมมากกว่าการประหยัดพลังงาน

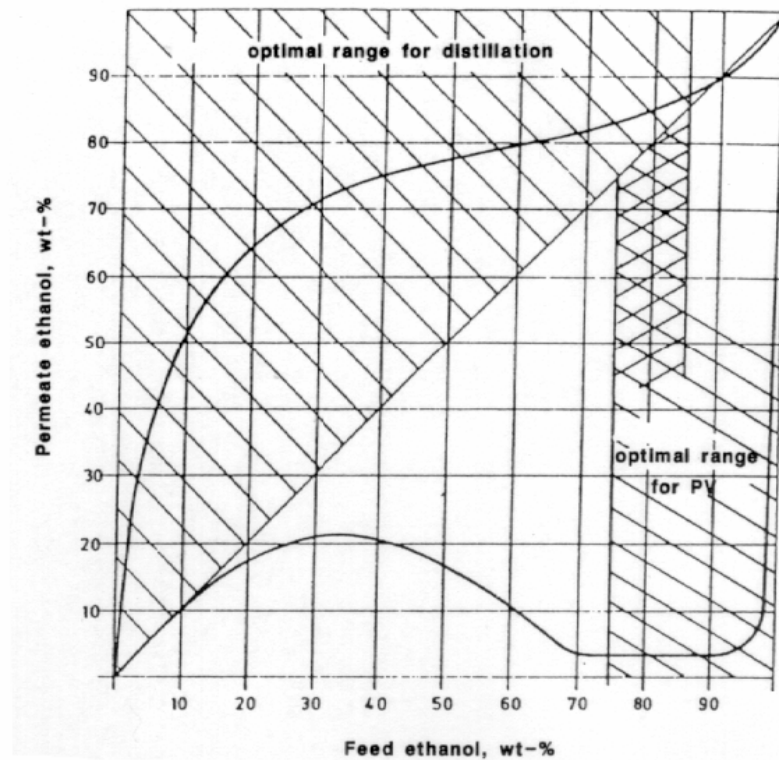
การประยุกต์ใช้งานสำหรับกระบวนการนี้สามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์การแยกออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้คือ

#### 1.2.9.1 การแยกน้ำออกจากของเหลวอินทรีย์

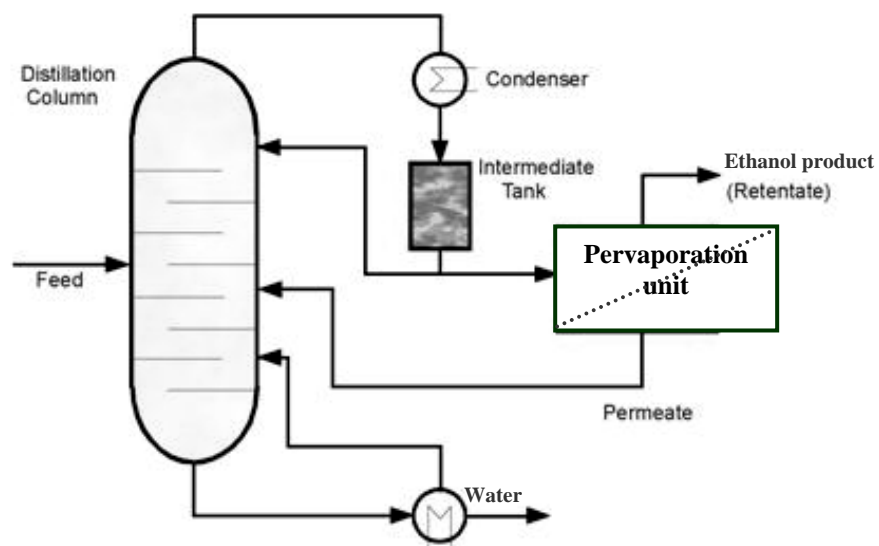
ซึ่งมีโรงงานมากกว่า 100 โรงงานที่นำระบบเพอแวกพอเรชันมาใช้สำหรับแยกน้ำออกจากของเหลวอินทรีย์ เช่น การแยกน้ำออกจากเอทานอล (ethanol dehydration) ที่ได้จากกระบวนการหมัก ในการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงโดยการกลั่นจะพบกับปัญหา คือ มีจุดอะซิโทรป ซึ่งทำให้ความเข้มข้นในเฟสของเหลวและไอเท่ากัน ซึ่งแสดงดังในภาพประกอบ 1.14 การผลิตเอทานอลความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอะซิโทรปจะต้องเติมองค์ประกอบตัวที่สาม เช่น เบนซีน หรือเพิ่มขั้นตอนการกลั่นแบบอะซิโทรป ซึ่งถ้านำระบบเพอแวกพอเรชันมาใช้แทน เช่น เพื่อแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล 95 % เป็น 99.5 % พบว่ามีความได้เปรียบทั้งในแง่เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการกลั่นควบคู่กับเพอแวกพอเรชันเพื่อผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ที่เรียกว่า กระบวนการผสม (hybrid process) ดังแสดงในภาพประกอบ 1.15 ซึ่งเป็นการผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 % โดยน้ำหนัก จากความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 60 % โดยน้ำหนัก โดยสารป้อนถูกส่งไปยังหอกลั่นที่ความดันบรรยากาศ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากด้านล่างของหอกลั่นคือ น้ำเกือบบริสุทธิ์และจะได้เอทานอลบริสุทธิ์ 95 % โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นเอทานอลที่กลั่นได้จะถูกส่งไป



ยังขั้นตอนเพอแวกพอเรชั่น โดยที่เพอมีเอทคือ เอทานอลเข้มข้น 25 %โดยน้ำหนักและรีเทนเททคือเอทานอลเข้มข้น 99.5 %โดยน้ำหนัก



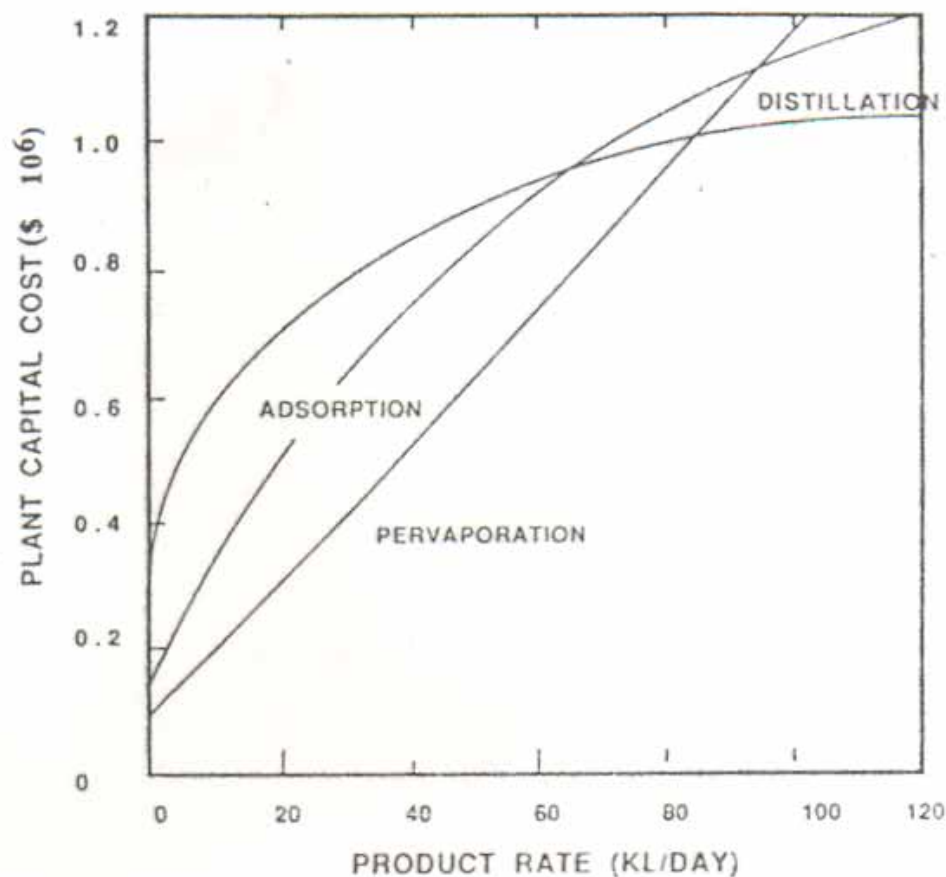
ภาพประกอบ 1.14 Liquid-vapor equilibrium สำหรับสารละลายเอทานอล - น้ำ



ภาพประกอบ 1.15 กระบวนการผสม (hybrid process) ระหว่างการกลั่นกับเพอแวกพอเรชั่น เพื่อผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 %โดยน้ำหนัก

ที่มา: Seader and Henley, 1998

ผลจากการประยุกต์ใช้กระบวนการเพอแวปอเรชันสำหรับการแยกน้ำออกจากของเหลวอินทรีย์ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง ดังภาพประกอบ 1.16 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตกับอัตราการผลิต ( $\text{m}^3/\text{day}$ ) สำหรับกระบวนการเพอแวปอเรชัน กระบวนการดูดซับ และกระบวนการกลั่นแบบเดิม และตาราง 1.6 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตสำหรับโรงงานการผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมีกำลังการผลิต  $1 \text{ m}^3/\text{day}$  จะพบว่าต้นทุนการผลิตโดยใช้ระบบเพอแวปอเรชันจะต่ำกว่ากระบวนการกลั่นประมาณครึ่งหนึ่งและไม่เกิดมลพิษ ต้องการพลังงานไอน้ำ (steam) ต่ำ แต่ต้องใช้กำลังไฟฟ้าเยอะกว่าการกลั่น และการดูดซับ เนื่องจากในการดำเนินการของระบบจำเป็นต้องใช้พลังงานจากปั๊มสุญญากาศ สำหรับโรงงานต้นแบบ (pilot plant) ที่ผลิตเอทานอลซึ่งมีกำลังการผลิต 1,000 ตัน/ปี แสดงในภาพประกอบ 1.17 ซึ่งเป็นของบริษัท Sulzer Chemtech



ภาพประกอบ 1.16 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเอทานอลกับอัตราการผลิต ( $\text{m}^3/\text{day}$ ) สำหรับกระบวนการเพอแวปอเรชัน กระบวนการดูดซับและกระบวนการกลั่น  
ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992

ตาราง 1.6 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเอทานอลสำหรับโรงงานการผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมีกำลังการผลิต  $1 \text{ m}^3/\text{day}$

	pervaporation	distillation	adsorption
System cost (\$)	75,000	140,000	90,000
Pumps (kW)	3	2	2
Steam (kg/hr.)	45 at 1.8 bars	70 at 7.3 bars	90 at 7.3 bars, 220 °C
Entrainer (L/day)	-	3	-

ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992



ภาพประกอบ 1.17 โรงงานต้นแบบ (pilot plant) ที่มีกำลังการผลิตเอทานอล 1,000 ตัน/ปี ของบริษัท Sulzer Chemtech  
ที่มา: Sulzer Chemtech, 2006

นอกจากกระบวนการนี้จะใช้แยกน้ำออกจากเอทานอลแล้วยังมีการนำไปใช้แยกน้ำจากของผสมอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ซึ่งนับว่ายังเป็นอุตสาหกรรมใหม่ทั้งในสหรัฐอเมริกา ยุโรป และเอเชีย ซึ่งมีข้อได้เปรียบในแง่สิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายต่างๆ ซึ่งแสดงดังตาราง 1.7

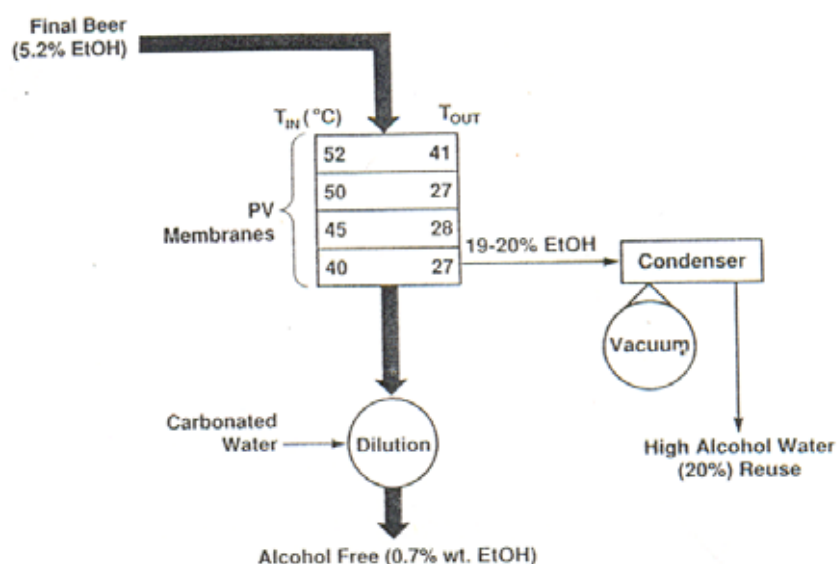
ตาราง 1.7 การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายต่างๆ ด้วยกระบวนการเพอแวนพอเรชัน

solvent	Water Content	
	Feed (wt%)	Product (ppm)
n- Butanol	5.4	800
Methanol	7.1	1650
Ethanol/IPA	0.6	610
Ethanol/MeOH	2.9	780
Ethanol/benzene	14.1	320

ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992

### 1.2.9.2 การแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ

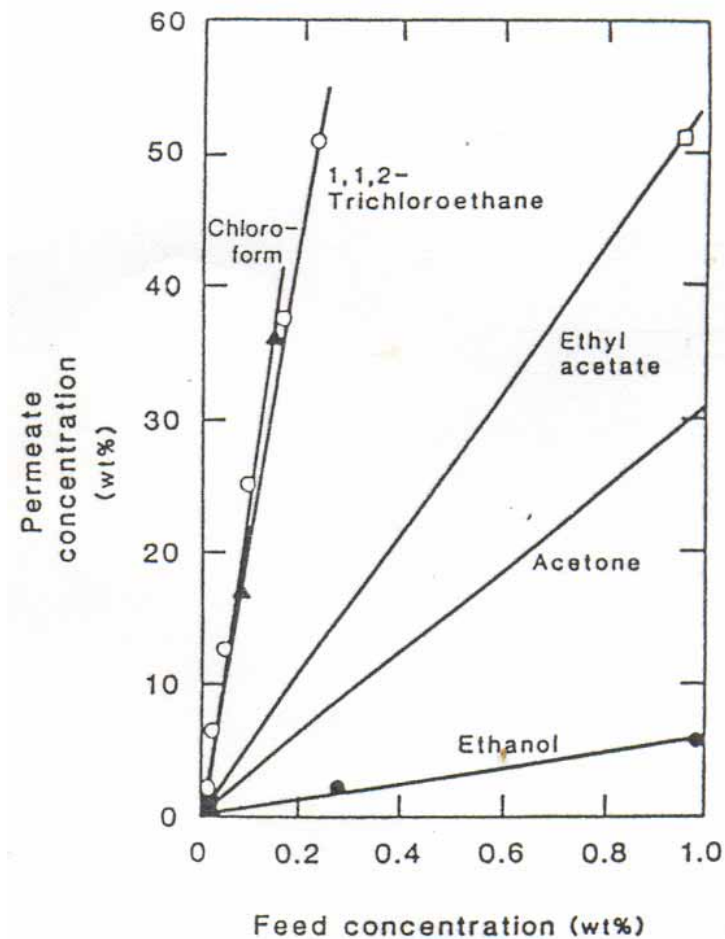
การพัฒนาเมมเบรนและกระบวนการมีการใช้งานในเชิงการค้าเมื่อปี ค.ศ. 1989 เมมเบรนที่ใช้จะเป็นชนิด hydrophobic ซึ่งเลือกให้สารอินทรีย์ผ่านมากกว่าน้ำ การพัฒนาเมมเบรนสำหรับใช้แยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ พบว่าเมมเบรนสามารถทนทานต่อสารเคมีได้ดีแต่ความสามารถในการแยกค่อนข้างจำกัด เมมเบรนที่มีการพัฒนาและรู้จักกันเป็นอย่างดีคือ เมมเบรนชนิด silicone rubber โดยกระบวนการเริ่มแรกเป็นของบริษัท GFT สำหรับแยกเอทานอลออกจากเบียร์เพื่อผลิตเบียร์ที่มีแอลกอฮอล์ต่ำหรือมีแอลกอฮอล์ประมาณ 0.7% ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 1.18



ภาพประกอบ 1.18 การแยกเอทานอลออกจากเบียร์เพื่อผลิตเบียร์ที่มีแอลกอฮอล์ต่ำเป็นของบริษัท GFT ด้วยกระบวนการเพอแวนพอเรชัน

ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการที่น่าเป็นไปได้ เช่น การแยกสารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในน้ำใต้ดินและในน้ำทิ้ง เช่น ethyl acetate, carboxylic acid (citric, lactic และ acetic) และอะโรมาติก เช่น ฟีนอลและเบนซีน ดังแสดงในภาพประกอบ 1.19 แสดงความสามารถในการแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านเมมเบรนชนิด silicone rubber ซึ่งเป็นเมมเบรนแบบทอแก้ว



ภาพประกอบ 1.19 ความสามารถในการแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านเมมเบรนชนิด silicone rubber ซึ่งเป็นเมมเบรนแบบทอแก้ว  
ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992

### 1.2.9.3 การแยกของผสมอินทรีย์

สำหรับการแยกของผสมอินทรีย์โดยใช้ระบบเพอแวกพอเรชันในปัจจุบันกำลังมีการพัฒนาอยู่ ตัวอย่างการใช้งานสำหรับแยกของผสมอินทรีย์แสดงดังตาราง 1.8

ตาราง 1.8 ตัวอย่างการใช้งานเพอแวกพอเรชั่นสำหรับแยกของผสมอินทรีย์

กลุ่ม/ชนิดของของผสมอินทรีย์	ตัวอย่างของผสมอินทรีย์
Aromatics/paraffins	benzene/hexane
Branched hydrocarbons from n-paraffins	Isooctane/hexane
Olefins/ paraffins	Pentene/pentane
Isomeric mixtures	xylenes
Chlorinated hydrocarbons from hydrocarbons	Chloroform from hexane
Purification of dilute streams	IPA from heptane/hexane

ที่มา: Winston and Kamalesh, 1992

ตาราง 1.9 สารเคมีที่ได้จากการแยกหรือสามารถทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีเพอแวกพอเรชั่น

ประเภทของสาร	ชื่อสาร	ประเภทของสาร	ชื่อสาร
Alcohol	Methanol	Ethers	Methyl tert-butyl ether
	Ethanol		(MTBE)
	Propanol (both Isomers)		Ethyl tert-butyl ether
	Butanol (all Isomers)		(ETBE)
	Pentanol (all Isomers)		Di-isopropyl ether
	Cyclohexanol		(DIPE)
Ketone	Acetone	Aliphatics	Chlorinated hydrocarbons
	Butanone		(various)
	Methyl isobutyl ketone		Dichloromethane
	(MIBK)		Perchloroethylene
Aromatics	Benzene	Amines	Triethylamine
	Toluene		Pyridine
	Phenol		Aniline
Organic Acid	Acetic acid	Ester	Methyl acetate
			Ethyl acetate
			Butyl acetate

ที่มา: Mahesh and Guest, 2004

Seok et al. (1987) ศึกษาการแยกของผสมอะซิโตน 2 ชนิด คือ ของผสมระหว่างเอทานอล-น้ำและไอโซโพรพานอล-น้ำ โดยใช้เมมเบรน 2 ชนิดคือ เมมเบรนชนิด cellulose acetate (CA) และ silicone rubber ซึ่งมีลักษณะอุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง ที่อุณหภูมิ 25 °C ทำการทดลองโดยรวมเมมเบรนทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน กล่าวคือในส่วนแรกจะแยกเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลเจือจางโดยใช้เมมเบรนชนิด silicone rubber และแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเข้มข้นโดยใช้เมมเบรนชนิด CA ในส่วนที่สองผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ สารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรน (reject stream) พบว่าค่าการแยกรวมจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างสารที่ไม่ผ่านเมมเบรนกับอัตราการป้อน  $\left(\frac{R_{CA}}{F}\right)$  กล่าวคือค่าการแยกรวมจะสูงเมื่อ  $\left(\frac{R_{CA}}{F}\right)$  มีค่าลดลง สำหรับของผสมระหว่างเอทานอล-น้ำ พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อน 40 %โดยโมล อัตราการไหล 13.5 มิลลิโมล/นาที่ ผ่านเมมเบรนชนิด silicone rubber ที่อัตราการไหล 10.6 มิลลิโมล/นาที่ เอทานอลในรีเทนเทท 27.9 %โดยโมล และเอทานอลเมื่อผ่านเมมเบรน CA เท่ากับ 89 %โดยโมล

Tsuyumoto et al. (1995) ศึกษาการเคลื่อนที่ของสารละลายเอทานอลผ่านเมมเบรนชนิด polyion complex โดยกระบวนการเพอแวกพอเรชัน ซึ่งทำการทดลองที่ความดันและความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนต่างๆ กัน พบว่าอัตราการแพร่ผ่านของน้ำผ่านเมมเบรนน้อยลง เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนลดลงหรือความดันเพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นอัตราการแพร่ผ่านของน้ำขึ้นอยู่กับแอกติวิตี (activity) ของน้ำในเมมเบรน

Kim et al. (2000) ทำการสังเคราะห์เมมเบรนเชิงประกอบชนิด polyimide โดยวิธี interfacial polymerization/thermal imidization และศึกษาการแยกของผสมน้ำออกจากเอทานอลโดยวิธีเพอแวกพอเรชัน ผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด polyimide ที่อุณหภูมิ 40 °C ความดัน 5 มิลลิเมตรปรอท ด้วยอัตราการป้อน 210 ลิตร/นาที่ องค์ประกอบของสารละลายป้อน 90 %โดยน้ำหนักของเอทานอล พบว่าเมมเบรนเชิงประกอบที่เตรียมภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมจะแสดงค่าการแยกสูง คือมากกว่า 240 และเพอเมอแฟล็กซ์ 1.7 กิโลกรัม/เมตร<sup>2</sup> ชั่วโมง แสดงว่าการเตรียมเมมเบรนเชิงประกอบโดยวิธีนี้เหมาะสำหรับการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล

Gonzalez-Velasco et al. (2002) ศึกษากระบวนการเพอแวกพอเรชันของของผสมระหว่างเอทานอล-น้ำโดยใช้เมมเบรนชนิด 1-trimethyl-1-propyne (PTMSP) ซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 75 °C ความดัน 2 มิลลิเมตรปรอท พบว่าได้ค่าการแยกประมาณ 10.7 ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนคือ 10 %โดยน้ำหนักและค่าการแยกจะลดลงเหลือ 8 หลังจากทำการทดลองไปแล้ว 450 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการแยกและอัตราการแพร่ผ่านจำเพาะจะลดลงกับระยะเวลาในการทดลอง เนื่องจากเมมเบรนเกิดการบวมตัวสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทดลองนานขึ้น

Li et al. (2002) ทำการสังเคราะห์เมมเบรน B-ZSM-11 และศึกษา

คุณสมบัติของเมมเบรน รวมทั้งทดสอบศักยภาพของเมมเบรนโดยการนำไปใช้แยกเอทานอลออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอแวกพอเรชัน ที่อุณหภูมิ 333 K ความดัน 0.2 kPa องค์ประกอบของแอลกอฮอล์ในสารละลายป้อน 1-50 %โดยน้ำหนัก พบว่าเพอเมทิคฟลักซ์มากที่สุดคือ 1.7 กิโลกรัม/เมตร<sup>2</sup>ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของสารละลายเมทานอล-น้ำ 5 %โดยน้ำหนัก และค่าฟลักซ์ของแอลกอฮอล์จะลดลงตามจำนวนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการเลือกผ่านสาร (selectivity) ของเมมเบรน จะมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์ 1 %โดยน้ำหนักและ selectivity สำหรับสารละลายเมทานอล-น้ำ, เอทานอล-น้ำ, 1-โพรพานอล-น้ำ และ 2-โพรพานอล-น้ำ คือ 28 97 34 และ 26 ตามลำดับ

Molina et al. (2002) ศึกษาและเปรียบเทียบการแยกสารละลายแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ คือ เมทานอล เอทานอลและไอโซโพรพานอลออกจากน้ำ โดยวิธีเพอแวกพอเรชัน เมมเบรนที่ใช้มีคุณสมบัติเลือกให้สารอินทรีย์ผ่าน (organophilic) 2 ชนิดคือ CMG-OM-010 และ 1060 Sulzer ซึ่งมีพื้นที่ผิว 131 ตารางเมตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C องค์ประกอบของแอลกอฮอล์ในสารละลายป้อน 13-20 %โดยน้ำหนัก หลังจากทำการทดลองได้ 5 ชั่วโมง พบว่าเมมเบรน CMG-OM-010 แสดงค่าการแยก (separation factor) ของแอลกอฮอล์ทั้ง 3 ชนิดได้ดีกว่าเมมเบรน 1060 Sulzer และที่อุณหภูมิ 70 °C เมมเบรนจะให้ค่าการแยกที่ดีที่สุด กล่าวคือสารละลายเอทานอล-น้ำมีค่าการแยกประมาณ 7 และความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่แพร่ผ่านเมมเบรนประมาณ 30-60 %โดยน้ำหนัก เมมเบรนทั้งสองชนิดจะให้ค่าฟลักซ์ทำนองเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับแอลกอฮอล์ชนิดเดียวกัน แต่จะแตกต่างกันในแอลกอฮอล์ต่างชนิดกัน สำหรับเพอเมทิคฟลักซ์ของผสมระหว่างเอทานอล-น้ำโดยใช้เมมเบรน CMG-OM-010 เท่ากับ 0.75-2.25 กิโลกรัม/เมตร<sup>2</sup>ชั่วโมง

Chang et al. (2004) ทำการสังเคราะห์เมมเบรนเชิงประกอบ silicone/PVDF และศึกษาศักยภาพของเมมเบรนด้วยกระบวนการเพอแวกพอเรชัน เพื่อแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ พบว่าเมมเบรนเชิงประกอบชนิดนี้มีความสามารถในการเลือกให้เอทานอลผ่านเป็นอย่างดี โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของเอทานอลต่ำๆ และค่าการแยกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของชั้น silicone และทำการสังเคราะห์เมมเบรนเชิงประกอบที่มีชั้นของ silicone/PVDF/silicone สลับกันหลายชั้น พบว่าเมมเบรนเชิงประกอบที่ประกอบด้วย silicone 4 ชั้น จะมีศักยภาพสูงที่สุด คือค่าการแยก 31 เพอเมทิคฟลักซ์ 0.9 กิโลกรัม/เมตร<sup>2</sup>ชั่วโมง และ pervaporation separation index (PSI) คือ 27,000 ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 % โดยน้ำหนัก



### 1.2.10 กระบวนการดูดซับ (adsorption)

กระบวนการดูดซับเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์จากซีรัม โดยในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลในประเทศไทยจะนิยมใช้วิธีนี้แทนการกลั่นแบบอะซิโตรีป เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิมแล้ว กระบวนการนี้สามารถประหยัดพลังงานได้ดีกว่าแต่จะประหยัดพลังงานได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเมมเบรน

กระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นโดยอาศัยความสามารถเฉพาะตัวของสารในการดึงโมเลกุลของสารให้มาเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เรียกปรากฏการณ์ที่สารมาเกาะที่ผิวของตัวดูดซับว่า “กระบวนการดูดซับ” ตัวที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า “ตัวดูดซับ” (adsorbent) ส่วนโมเลกุลที่มาเกาะที่ผิวตัวดูดซับเรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ” (adsorbate) ปรากฏการณ์การดูดซับนี้เกิดขึ้นระหว่างสองพื้นผิว โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งได้แก่ พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง หรือพื้นผิวระหว่างแก๊สกับของแข็ง

ตัวดูดซับที่นิยมใช้สำหรับการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ คือ molecular sieve ชนิด 3 °A zeolite ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งตัวดูดซับชนิดนี้เหมาะสำหรับการกำจัดน้ำในปริมาณน้อยๆ ออกจากสารละลายอินทรีย์ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็ก (0.26 nm) สามารถเข้าไปในช่องว่างภายในโครงสร้างของ zeolite ได้ ขณะที่โมเลกุลของสารอินทรีย์ เช่น เอทานอล (0.52 nm) จะไม่ถูกดูดซับ โมเลกุลของน้ำ (adsorbate) สามารถยึดติดกับพื้นผิวของ zeolite (adsorbent) ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waal's force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางกายภาพและสามารถให้ความร้อนของการดูดซับออกมาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับความร้อนของปฏิกิริยาเคมี (Salem และ Ben, 1999)

#### 1.2.10.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

##### (ก) สมบัติของตัวดูดซับ

(1) พื้นผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นผิวที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน หากรูพรุนมีมากทำให้มีพื้นที่ผิวดูดซับมาก ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้นด้วย การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนขนาดใหญ่แต่ปากรูพรุนมีขนาดเล็ก ก็ไม่ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

##### (ข) สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

(1) ความสามารถในการละลาย สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อนที่จะเกิดการดูดซับ ซึ่งถ้าไม่มีการทำลายพันธะก็จะไม่สามารถเกิดการดูดซับได้

(2) น้ำหนักและขนาดโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น และโมเลกุลที่มีโครงสร้างแบบกิ่งจะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรง

(3) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) การดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิวตัวดูดซับ เช่น หาก pH ลดลง จะส่งผลทำให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) ที่พื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น

(4) อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับอ่อนลง

มีรายงานการวิจัยหลายฉบับได้ทำการศึกษากการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ ด้วยกระบวนการดูดซับ ซึ่งมีทั้งการดูดซับในวัฏภาคของเหลวและแก๊ส ดังนี้คือ

Carmo และ Gubulin (1997) ศึกษาจลนพลศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการดูดซับด้วย molecular sieve ชนิด 3 °A zeolite ซึ่งมีลักษณะรูปร่างต่างกัน 2 แบบ คือแบบทรงกลมและทรงกระบอก โดยมีเป้าหมายเพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่มีความเหมาะสมที่สุด ผลจากการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าตัวดูดซับแบบทรงกลมและทรงกระบอกมีความสามารถในการดูดซับเหมือนกันในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา คือ 25-60 °C และความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในการคำนวณได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Langmuir สำหรับการศึกษากจลนพลศาสตร์ พบว่าขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ศึกษา กล่าวคือตัวดูดซับที่มีรูปร่างทั้งสองลักษณะ จะให้ความสามารถในการแพร่ผ่าน (diffusivity) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับแบบทรงกลมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการดูดซับลดลง แต่ค่า diffusivity คงที่ คือ  $1.67 \times 10^{-5}$  ตารางเซนติเมตร.นาที่<sup>-1</sup>

Salem และ Ben (1999) ศึกษาผลของความร้อนของการดูดซับต่อการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำด้วย molecular sieve ทางการค้า ชนิด 3 °A zeolite เนื่องจากพบว่าในกระบวนการจะมีการคายความร้อนออกมาสูง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อพัฒนา thermal curve ผ่าน bed ซึ่ง thermal curve จะเกิดขึ้นและออกจาก bed เมื่อโมเลกุลของน้ำถูกดูดซับบนตัวดูดซับ โดยช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ 24-34 °C และช่วงความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนคือ 2.8- 6.6 %โดยน้ำหนัก พบว่าที่อัตราการป้อนหนึ่งๆ ปริมาณของน้ำหลังจากที่สารละลายผ่านตัวดูดซับ และพีคของอุณหภูมิจะสูงขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน และที่ความเข้มข้นหนึ่งๆ พบว่าการลดอัตราการป้อนจะส่งผลทำให้ทั้งความเข้มข้นของน้ำหลังจากที่ผ่านตัวดูดซับและพีคของอุณหภูมิลดลง อย่างไรก็ตามการกำจัดความร้อนโดยการหล่อเย็นจะสามารถทำให้ปริมาณน้ำหลังจากที่ผ่านตัวดูดซับมีค่าน้อยมาก ๆ ได้

Guan และ Hu (2003) ศึกษาทำนายและวิเคราะห์การกำจัดน้ำออกจากสารละลายเอทานอลโดยกระบวนการดูดซับแบบ pressure swing ด้วยแบบจำลอง electrical analogue ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 93.54 % โดยน้ำหนัก ความดัน 2–5 bar อุณหภูมิ 120–150 °C พบว่าการเพิ่มความดันของสารป้อนสามารถเพิ่ม recovery และ productivity และยังพบว่าการติดตั้ง anisotropic valve ระหว่างคอลัมน์กับถังเก็บสารละลาย หลังจากที่ผ่านมาการดูดซับอาจจะทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลหลังจากผ่านการดูดซับน้ำออกเข้มข้นสูงถึง 99.5 % โดยน้ำหนัก recovery เท่ากับ 60 % และ productivity เท่ากับ 110 กรัม. กิโลกรัมของตัวดูดซับ<sup>-1</sup>. ชั่วโมง<sup>-1</sup> ที่ความดัน 3.5 bar การกำจัดตัวถูกดูดซับให้หลุดออกจากตัวดูดซับ (desorption) ในระบบสุญญากาศ คือที่ 0.4 bar อาจเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลเป็น 99.9 % โดยน้ำหนัก recovery เท่ากับ 60 % และ productivity เท่ากับ 17 กรัม. กิโลกรัมของตัวดูดซับ<sup>-1</sup>. ชั่วโมง<sup>-1</sup> ที่ความดัน 3.5 bar และ 99.5 % โดยน้ำหนัก recovery เท่ากับ 75 % และ productivity เท่ากับ 30 กรัม. กิโลกรัมของตัวดูดซับ<sup>-1</sup>. ชั่วโมง<sup>-1</sup>

### 1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำโดยวิธีเพอแวกพอเรชันและการดูดซับ
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการแพร่ผ่านและค่าการแยกของของผสมโดยใช้เมมเบรนสังเคราะห์ต่างชนิดกันโดยวิธีเพอแวกพอเรชัน
3. เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแยกเอทานอล-น้ำโดยวิธีเพอแวกพอเรชัน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายป้อน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงกระบวนการแยกเอทานอล-น้ำด้วยกระบวนการเพอแวกพอเรชันและการดูดซับ
2. ทราบถึงประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการแยกเอทานอล-น้ำด้วยกระบวนการเมมเบรนแบบเพอแวกพอเรชันและการดูดซับ
3. ทราบถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกเอทานอล-น้ำโดยวิธีเพอแวกพอเรชัน เช่น ชนิดของเมมเบรน อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายป้อน
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้