

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำตั้งเรื่อง

เนื่องจากในปัจจุบันการนำเอทานอลมาใช้ประโยชน์มีเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งเพื่อการบริโภค (beverage alcohol) และเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง (fuel alcohol) ซึ่งเอทานอลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้นั้นจะต้องเป็นเอทานอลที่ถูกลำกวดน้ำออกจนเกือบหมดหรือเอทานอลไร้น้ำ ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก โดยสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) ใช้ผสมกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ดีโซฮอล (diesohol) ในอัตราส่วนร้อยละ 15 (2) ใช้ผสมกับน้ำมันเบนซิน เรียกว่า แก๊สโซฮอล (gasohol) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ (3) ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้กับเครื่องยนต์ โดยการเปลี่ยนเอทานอลมาเป็นสาร ETBE (ethyl tertiary butyl ether) สามารถใช้ทดแทนสาร MTBE (methyl tertiary butyl ether) ที่เป็นสารเพิ่มปริมาณออกซิเจนและออกเทนในน้ำมันได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในหลายประเทศ เช่น บราซิล สหรัฐอเมริกา จีน ออสเตรเลีย ฟิลิปปินส์ สวีเดน ฝรั่งเศส สเปน เนเธอร์แลนด์ รวมถึงประเทศไทย การใช้น้ำมันเบนซินผสมกับเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ได้ดีกับรถยนต์ในปัจจุบันและสามารถลดมลภาวะทางอากาศได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก มีค่าออกเทนสูงถึง 113 ซึ่งสูงกว่าน้ำมันเบนซินประมาณร้อยละ 15 (มูลนิธิสถาบันพลังงานทดแทนเอทานอล - ไบโอดีเซลแห่งประเทศไทย, 2000) หากรัฐบาลมีนโยบายสนับสนุนการใช้เชื้อเพลิงเอทานอล ก็จะสามารถลดการนำเข้าสารเพิ่มค่าออกเทนจากต่างประเทศลงได้ และส่งผลทำให้อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลภายในประเทศต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการ

ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมทั่วโลกประมาณร้อยละ 93 ใช้กระบวนการหมักและจะได้น้ำหมักที่มีเอทานอลเข้มข้นประมาณร้อยละ 9-10 โดยน้ำหนัก ดังนั้นเพื่อต้องการให้ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น โดยการนำน้ำหมักที่ได้เข้าสู่กระบวนการกลั่นลำดับส่วนซึ่งจะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารละลายเอทานอลและน้ำเป็นของผสมอะซีโอโทรป (azeotropic mixture) กล่าวคือเป็นของผสมที่แยกได้อย่างมี

ข้อจำกัดโดยวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดา ของผสมจะเกิดอะซีโอโทรปที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก ที่จุดเดือด 78.15 องศาเซลเซียส และความดัน 101.3 กิโลปาสกาล (Seader and Henley, 1998) หากต้องการเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์อย่างน้อยร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก จะต้องทำการกลั่นแบบอะซีโอโทรป (azeotropic distillation) ซึ่งเป็นวิธีการกลั่นแยกของผสมโดยใช้คุณสมบัติแบบจุดเดือดร่วม (boiling-point azeotropic) ของของผสมต้องมีการเติมสารช่วยกลั่นได้แก่ เบนซีน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและติดไฟได้ง่าย อีกทั้งความซับซ้อนของการทำงาน ค่าก่อสร้างที่แพงและมีการใช้พลังงานในการกลั่นที่สูงมาก แต่ปัจจุบันยังคงใช้วิธีการนี้อยู่ร้อยละ 80

กระบวนการเมมเบรนในการแยกก๊าซมีมานานกว่า 100 ปี แต่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเริ่มประมาณ 20 - 25 ปี ที่ผ่านมา การแยกก๊าซโดยใช้เมมเบรนชนิดพอลิเมอร์แบบแน่นเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก มีการนำไปใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น การแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากมีเทน การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการแยกน้ำออกจากก๊าซธรรมชาติและอากาศ การแยกก๊าซฮีเลียม การแยกสารละลายอินทรีย์ออกจากอากาศ การแยกก๊าซออกซิเจนออกจากอากาศ การแยกก๊าซไนโตรเจนออกจากอากาศ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการนำกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันไปใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมยังมีจำกัด เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเมมเบรนแบบอื่นๆ กล่าวคือเมมเบรนที่ผลิตในทางการค้ามีประสิทธิภาพในการแยกไม่สูงมากพอรวมทั้งความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ จึงพบว่ามีนักวิจัยหลายท่านจะเน้นการพัฒนาเมมเบรนสังเคราะห์ให้มีทั้งสมรรถนะในการแยกและค่าฟลักซ์ที่สูงขึ้นสำหรับสารละลายหนึ่งๆ โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาการแยกน้ำออกจากสารละลายแอลกอฮอล์โดยใช้วัสดุที่ทำจากพอลิเมอร์ ได้แก่ เมมเบรนชนิด poly (vinyl alcohol) (Zhen Huang et al., 2005 และ 2006 และ Van Baelen et al., 2005) polyimide (Yonglie Wu et al., 2002 และ Shu-Chin Fan et al., 2002) polysulfone (Tsai et al., 2002) poly (tetrafluoroethylene) (Chen-Yuan Tu et al., 2004) โดยเมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแบบท่อม้วนและแบบเส้นใยกลวง และในปัจจุบันเริ่มมีการใช้สารอนินทรีย์ซึ่งได้แก่ ซีโอไลต์ โลหะและเซรามิกส์ในหลายงานวิจัย เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสารอินทรีย์ ตัวอย่างเช่น zeolite Na-A (Masakazu Kondo et al., 2003 และ Jalal Jafar et al., 2002) zeolite Na-X และ zeolite Na-Y (Hidetoshi Kita et al., 2001) เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำกระบวนการเมมเบรนแบบเวเปอร์เพอมีเอชันมาใช้แยกสารละลายเอทานอล-น้ำเพื่อทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์ขึ้น โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชัน และศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าการแยกและเพอมีเอทฟลักซ์ของสารละลายเอทานอล-น้ำ ซึ่งได้แก่ ชนิดเมมเบรน อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายป้อน

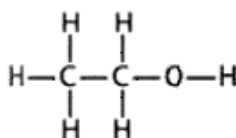
1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 เอทานอล (ethanol)

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง สามารถนำมารับประทานได้ เป็นของเหลวใสไม่มีสี ติดไฟง่าย มีกลิ่นหอมและค่าออกเทนสูง (เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 มีค่าออกเทนสูงถึง 113) สำหรับสารละลายเจือจางมีรสหวานแต่ถ้าสารละลายเข้มข้นจะมีรสขม

1.2.1.1 องค์ประกอบของเอทานอล

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง มีชื่อทางเคมีเรียกว่าเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยในหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนอะตอมดังกล่าวประกอบ
1.1 เอทานอลมีขนาดโมเลกุล 0.52 นาโนเมตรและจัดเป็น โมเลกุลมีขั้วจึงสามารถละลายในน้ำได้



ภาพประกอบ 1.1 โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล

เอทานอลมีจุดหลอมที่อุณหภูมิ -114 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 78.15 องศาเซลเซียสและมีความหนาแน่น 0.789 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เนื่องจากเอทานอลมีจุดเยือกแข็งต่ำ จึงสามารถนำมาใช้เป็นของไหลในเทอร์โมมิเตอร์สำหรับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเยือกแข็งของ mercury และนำมาใช้ประโยชน์สำหรับงานอื่นๆ ที่ต้องการอุณหภูมิต่ำ เช่น antifreeze ใน automobile radiator นอกจากนี้เอทานอลถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น เหล้า ไวน์ และเบียร์ ใช้ในอุตสาหกรรมยา ใช้เป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เช่น สี แล็กเกอร์ ยาเคลือบน้ำมันและซีฟิ่ง (ครีมขัดรองเท้า) เรซิน ใช้เป็นวัตถุคิบในการสังเคราะห์สารเคมีและชีวเคมี ใช้เป็นอาหาร เช่น น้ำส้มสายชู เกลาตินใช้ทางการแพทย์ เช่น ใช้เช็ดแผล ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้เป็นตัวรีเอเจนต์ในห้องปฏิบัติการและอื่นๆ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถนำเอทานอลที่เป็นแอลกอฮอล์นำไปใช้ผสมน้ำมัน (fuel alcohol) เป็นแอลกอฮอล์ที่มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ใน 3 รูปแบบ คือ

แบบที่ 1 เป็นเอทานอลร้อยละ 95 ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงทดแทนน้ำมันเบนซิน และน้ำมันดีเซลใช้ได้กับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดสูง สำหรับในเครื่องยนต์ดีเซลสามารถใช้เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 ผสมในน้ำมันดีเซลเรียกว่า ดีโซฮอล (diesohol) ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และเพิ่มสารปรับปรุงคุณสมบัติบางตัวในปริมาณร้อยละ 1-2

แบบที่ 2 เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ผสมในน้ำมันเบนซินซึ่งจะเรียกว่า ก๊าซโซฮอล (gasohol) โดยทั่วไปใช้ผสมกับน้ำมันเบนซินอัตราส่วนร้อยละ 10 ในลักษณะของสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงค่าออกเทนของน้ำมันเบนซิน ซึ่งสามารถนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์โดยทั่วไปและไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์แต่อย่างใด

แบบที่ 3 เป็นสารเคมีเพิ่มออกเทน (octane) ให้แก่เครื่องยนต์ โดยทำการเปลี่ยนรูปเอทานอลมาเป็นสาร ETBE (ethyl tertiary butyl ether) สามารถใช้ทดแทนสาร MTBE (methyl tertiary butyl ether) สารทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นอีเทอร์ (ether) ที่มีออกซิเจนผสมอยู่ในตัวเองสูงและเป็นสารที่มีค่าออกเทนสูงทั้งคู่และมีจุดระเหยต่ำ ซึ่งเกิดจากการนำแอลกอฮอล์ทั้ง 2 ชนิดผสมกับ Isobutylene ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนให้กับน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับ MTBE เองนิยมใช้กันมาก แต่ในปัจจุบันพบว่า เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันเบนซินที่หลายประเทศประกาศห้ามใช้เนื่องจากมีข้อเสียคือ ก่อให้เกิดมลภาวะในอากาศที่สูงกว่าสารเติมแต่งอื่นๆ และทำให้เกิดการปนเปื้อนน้ำใต้ดินจึงพิจารณาใช้สาร ETBE แทน

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาในหลายประเทศและหลายบริษัท ทำให้มีการนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้วในหลายประเทศ เช่น บราซิลจะนำเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก มาผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและใช้ชื่อผลิตภัณฑ์ว่า “proalcohol” สหรัฐอเมริกาใช้เอทานอลผสมกับน้ำมันเบนซินใสสารตะกั่วในอัตรา 10 : 90 เรียกว่า ก๊าซโซฮอล (gasohol) ฟิลิปปินส์ผสมเอทานอลกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วน 20 : 80 เรียกว่า “alcogas” ออสเตรเลียนำเอทานอลผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วน 15 : 85 และใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ในชื่อผลิตภัณฑ์ “pentranol” รวมถึงประเทศ สวีเดน ฝรั่งเศส สเปน และเนเธอร์แลนด์ เป็นต้น รวมทั้งได้มีบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงเอทานอลออกขายแล้วจำนวนมาก เช่น บริษัท ford บริษัท chevrolet division of general motor และบริษัท mazda จะเห็นได้ว่า ได้มีบริษัทผู้ผลิตรถยนต์หลายบริษัท ผลิตรถยนต์ FFV (flexible fuel vehicles มีความหมายคือ ยานยนต์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงการใช้เชื้อเพลิงได้) ออกจำหน่าย จึงเป็นการยืนยันได้ว่ารถยนต์สามารถใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงได้และในอนาคตจะมีรถยนต์ FFV ใช้กันอย่างแพร่หลายแน่นอน ในเบื้องต้นการผลิตเอทานอลยังมีกำลังการผลิตที่ไม่มากนัก ดังนั้นการใช้ผสมร้อยละ 10 ยังพอจะทำได้และไม่ต้องการปรับแต่งเครื่องยนต์ ในประเทศบราซิลสามารถใช้เอทานอลร้อยละ 24 กับเครื่องยนต์ปกติ และ

บริษัทผู้ผลิตรถยนต์ได้พยายามผลิตเครื่องยนต์ ที่สามารถใช้เอทานอลเป็นส่วนผสมมากกว่าร้อยละ 10 โดยการปรับปรุงเครื่องยนต์ ติดตั้ง coolant temperature sensor หรือ engine speed sensor เพื่อควบคุม solenoid valve ปรับอัตราส่วนผสมของอากาศเพื่อให้เกิดการจุดระเบิดที่เหมาะสม นอกจากการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์แล้ว ปัจจุบันมีความพยายามทดลองใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินอีกด้วย สำหรับประเทศไทยได้มีการทดสอบที่ก้าวหน้าไปมากแล้ว ตัวอย่างเช่น สถาบันวิจัยและเทคโนโลยีของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทยได้ทดสอบเครื่องยนต์ ดีเซลและเบนซินทั้ง 2 จังหวะ และ 4 จังหวะ ในห้องปฏิบัติการและท้องถนนโดยใช้เอทานอลผสม ร้อยละ 15 ปรากฏว่าใช้ได้ผลดี และได้ทดลองจำหน่ายน้ำมันผสมเอทานอลให้กับผู้ใช้รถทั่วไป ได้ผลสะท้อนว่าทำให้อัตราเร่งดีขึ้น เนื่องจากเอทานอลร้อยละ 99 มีค่าออกเทนสูงกว่าเบนซินถึง ร้อยละ 15 จากรายงานผลการวิจัยในหลายประเทศพบว่า เอทานอล ช่วยลด tail pipe emission จากเครื่องยนต์ได้ดังนี้ โดยทำการเปรียบเทียบน้ำมันเบนซินสูตรผสม ETBE ร้อยละ 15 กับ น้ำมันเบนซินร้อยละ 100

- ลดปริมาณ hydrocabons (HC) ร้อยละ 1 - 11
- ลดปริมาณ carbonmonoxide (CO) ร้อยละ 11 - 17
- ลดปริมาณ aromatics (C_6H_6) ร้อยละ 17 - 20

การใช้เอทานอลจะช่วยพัฒนาสภาพแวดล้อม เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่ไร้สารมลพิษ เช่น ซัลเฟอร์และมีโมเลกุลของออกซิเจนเป็นส่วนประกอบถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์จึงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าเชื้อเพลิงทั่วไป ระบบเครื่องยนต์ที่ใช้เอทานอลจึงสะอาดกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันเบนซินหรือดีเซล แต่เอทานอลมีออกซิเจนประกอบ อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ออกซิเจนจะจับตัวอยู่ในรูปของอนุภาคไฮดรอกซิล ทำให้โมเลกุลเอทานอลมีคุณสมบัติเป็น polar ซึ่งมีปฏิกิริยาสูงกว่าเบนซิน จึงทำให้เอทานอลมีอำนาจการกัดกร่อนมากกว่าเบนซิน

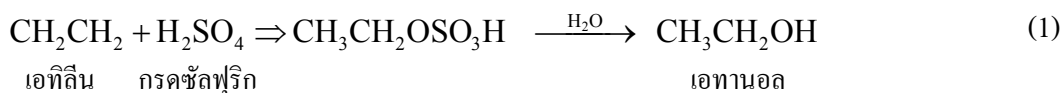
ในอดีตเบนซินจากปิโตรเลียมมีราคาถูก แต่ปัจจุบันราคาเบนซินสูงขึ้นทำให้ราคาเอทานอลมีใกล้เคียงกันถ้าหากใช้มาตรการลดหรือยกเว้นภาษีเอทานอล ทำให้ราคาเอทานอลถูกกว่าเบนซินอย่างแน่นอน อีกทั้งยังมีผลพลอยได้ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เกือบทั้งหมด เช่น ถ้าใช้ข้าวโพด ข้าวหรือมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบจะได้หัวอาหารสัตว์โปรตีนสูง ประมาณ 2 กิโลกรัม ต่อเอทานอล 1 ลิตรและได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 1.5 - 2 กิโลกรัม ต่อเอทานอล 1 ลิตร ซึ่งสามารถใช้ทำน้ำแข็งแห้ง ทำน้ำอัดลมหรืออุตสาหกรรมเชื่อมต่อโลหะ เทคโนโลยีเอทานอลทำให้เกิดปัญหาทางด้านมลพิษลดลงอย่างต่อเนื่อง คือ ลดค่าใช้จ่ายในด้านการป้องกันและแก้ไขมลภาวะที่เกิดขึ้นกับอากาศและน้ำ และค่าใช้จ่ายด้านสุขภาพกับประชาชนที่ได้รับผลกระทบจากการเผาไหม้

ของเครื่องยนต์ จึงทำให้ต้นทุนเอทานอลต่ำกว่าน้ำมันปิโตรเลียม อย่างไรก็ตามการนำเอทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์นั้น สามารถดำเนินการได้ดีในประเทศที่มีการผลิตพืชผลทางการเกษตรมากเพียงพอจนสามารถผลิตเอทานอลใช้กับยานพาหนะ เช่น ประเทศบราซิล สหรัฐอเมริกา และจีน เป็นต้น

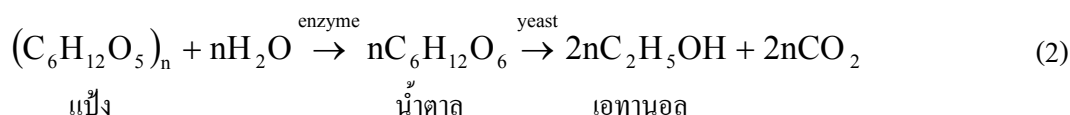
1.2.1.2 กระบวนการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตเอทานอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ

ก. เอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี (chemical synthesis) เป็นการผลิตจากอนุพันธ์สารปิโตรเลียม เช่น เอทิลีนด้วยปฏิกิริยาการระเหยน้ำ (dehydration) โดยเอทิลีนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์โดยใช้กรดซัลฟูริกตามด้วยน้ำ ดังสมการ (1)



ข. กระบวนการหมัก (fermentation process) ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมทั่วโลกประมาณร้อยละ 93 ใช้กระบวนการหมัก ซึ่งวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเอทานอล จะเป็นสารประกอบจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล การหมักเอทานอลส่วนมากใช้ยีสต์สายพันธุ์ *saccharomyces cerevisiae* ซึ่งสามารถผลิตเอทานอลได้สูงและสามารถทนสภาพแวดล้อมที่มีเอทานอลได้ดีกว่าสายพันธุ์อื่นๆ การทำงานของยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลเกิดขึ้นในระดับเซลล์ และปลดปล่อยเอทานอลออกมาภายนอกเซลล์ ตามทฤษฎีการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลได้ร้อยละ 51.1 และส่วนที่เหลือร้อยละ 48.9 เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการ (2)



ในทางปฏิบัติน้ำตาลเพียงประมาณร้อยละ 95 เท่านั้นที่เปลี่ยนเป็นเอทานอล ส่วนที่เหลือยีสต์ใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างสารอื่น ๆ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ 46.5 อะซิติกไซด์ 0.3 กรดอะซิติก 0.25 กลีเซอริน 3.0 กรดแลกติก กรดซัลซินิก ฟิวเซลอยล์ 0.25-0.50 และเฟอฟูรอลอีกเล็กน้อย

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเอทานอล สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. วัตถุดิบประเภทแห้ง ได้แก่ ผลผลิตทางการเกษตรพวกธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ ข้าวฟ่างและพวกพืชหัว เช่น มันสำปะหลัง มันฝรั่ง มันเทศ เป็นต้น
2. วัตถุดิบประเภทน้ำตาล ได้แก่ อ้อย กากน้ำตาล บีตรูต ข้าวฟ่างหวาน เป็นต้น
3. วัตถุดิบประเภทเส้นใย ส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากผลผลิตทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด รำข้าว เศษไม้ เศษกระดาษ ขี้เลื่อย วัชพืช รวมทั้งของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานกระดาษ เป็นต้น แม้จะมีวัตถุดิบอยู่หลายชนิดที่สามารถนำมาผลิตเป็นเอทานอลได้ แต่จะมีเพียงไม่กี่ชนิดที่มีความเหมาะสมในการผลิตเป็นเอทานอล โดยมีหลักเกณฑ์ที่ควรพิจารณาคือ
 - วัตถุดิบมีปริมาณเพียงพอสำหรับป้อนสู่โรงงาน ได้ตลอดปี หาได้ง่าย ราคาถูก
 - สามารถผลิตเอทานอลต่อหน่วยของวัตถุดิบและต่อหน่วยของพื้นที่เพาะปลูกได้ปริมาณสูง
 - พลังงานสมดุลของระบบเป็นบวก
 - วัตถุดิบนั้นจะต้องไม่แย่งอาหารของมนุษย์

พืชชนิดต่างๆ ในประเทศไทยที่นำมาใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์แสดงดังตาราง 1.1 แต่วัตถุดิบที่ได้รับการพิจารณาจากคณะกรรมการเอทานอลแห่งชาติ ว่ามีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเอทานอลมีเพียง 3 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ อ้อย กากน้ำตาลและมันสำปะหลังสด และพบว่าการผลิตเอทานอล 1 ลิตร จากวัตถุดิบต่างๆ นั้น หัวมันสำปะหลังสดต้องลงทุน 8.94 บาท มันสำปะหลังเส้น 9.41 บาท อ้อย 10.54 บาท ข้าวโพด 10.65 บาท ดังนั้นทำให้มันสำปะหลังเป็นตัวเลือกแรก โดยมีอ้อยและกากน้ำตาลเป็นตัวเลือกประกอบ (ประเทศอื่นเช่น ประเทศบราซิล ผู้ผลิตเอทานอลอันดับ 1 ของโลก ใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบหลัก ส่วนประเทศสหรัฐอเมริกาใช้ข้าวโพด) ทุกส่วนของพืชสามารถนำมาผลิตแอลกอฮอล์ได้ทั้งสิ้น ขึ้นอยู่กับส่วนต่างๆ ของพืชและสารเคมีที่ใช้ในการย่อยสลายเส้นใยในส่วนของคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) เป็นแป้ง (starch) และน้ำตาล (sugar) สามารถผลิตเอทานอลได้จากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ดังนี้

ตาราง 1.1 พืชชนิดต่างๆ ในประเทศไทยที่ใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์

พืช (ปริมาณน้ำหนัก 1 ตัน)	ปริมาณของเอทานอล (ลิตร)
กากน้ำตาล	260
มันสำปะหลังสด	200
อ้อย	70
ข้าวฟ่าง	76
ธัญพืช (ข้าว, ข้าวโพด)	385
น้ำมะพร้าว	83

ที่มา : <http://www.ethanol-thailand.com> และ <http://www.cassava.org>

สำหรับเทคโนโลยีการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบจำพวกแป้งและน้ำตาลได้เปลี่ยนจากระบบ batch เป็นระบบ continuous เทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายแสดงในตาราง 1.2

ตาราง 1.2 สรุปและเปรียบเทียบเทคโนโลยีการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบแป้งและน้ำตาล

ปัจจัย	batch	cascade	biostil	uhde	lurgi	starcosa
ความเข้มข้นของยีสต์ (กรัม/ลิตร)	3-8	6-10	40-55	50	35-45	120-150
ผลผลิตที่ได้ (ร้อยละผลได้)	88-92	90-92	90-92	90-95	85-95	94
ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	7-9	8-10	5-7	6.5-7.5	8-9	7-8

ที่มา : <http://www.cassava.org>

1.2.1.3 การทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นและบริสุทธิ์สูงขึ้น สามารถทำได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้

ก. การกลั่นลำดับส่วน (fractional distillation) เหมาะสำหรับกลั่นแยกของเหลวที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกันหรือแยกสารละลายที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายเป็นสารที่ระเหยง่ายทั้งคู่ ซึ่งถ้ากลั่นแบบธรรมดาเพียงครั้งเดียวจะได้สารที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น การกลั่นน้ำผสมเอทานอลต้องกลั่นซ้ำหลายๆ ครั้ง จึงได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นทุกครั้ง แต่ในทางปฏิบัติแทนที่จะนำของเหลวไปกลั่นซ้ำกันหลายๆ ครั้ง ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและใช้เวลามาก จึงได้นำไปกลั่นในคอลัมน์ลำดับส่วนหรือในหอกลั่นซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับเป็นการกลั่นซ้ำหลายๆ ครั้งจะได้เอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนักและมีน้ำอยู่ร้อยละ 4.4 โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารละลายเอทานอลและน้ำเป็นของผสมอะซีโอโทรป ซึ่งเป็นของผสมที่แยกได้อย่างมีข้อจำกัดด้วยวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดา โดยของผสมเกิดอะซีโอโทรปที่สัดส่วนเอทานอลร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก

ข. การกลั่นแบบอะซีโอโทรป (azeotropic distillation) เป็นวิธีการกลั่นแยกของผสมโดยใช้คุณสมบัติแบบจุดเดือดร่วมของของผสม โดยโรงงานผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ในปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้วิธีการนี้ เนื่องจากจะต้องเติมสารช่วยกลั่น ได้แก่ เบนซีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและติดไฟได้ง่าย รวมทั้งความซับซ้อนของการทำงาน ค่าก่อสร้างที่แพงและมีการใช้พลังงาน (ไอน้ำ) มากในการกลั่น

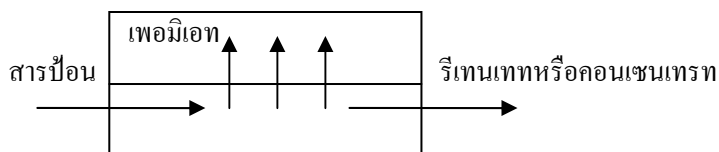
ค. การดูดซับ (adsorption) โดยใช้ molecular sieve dehydrator ซึ่งเป็นสารจำพวก zeolite ที่เป็นตัวดูดความชื้นของอากาศดูดซับน้ำออกจากเอทานอลที่ได้จากการกลั่น ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีการกลั่นแบบอะซีโอโทรป

ง. การแยกด้วยกระบวนการเมมเบรนแบบเพอเวปอเรชัน (pervaporation) ใช้หลักการทำงานของเมมเบรนร่วมกับการระเหย (evaporation) มีข้อดีกว่าวิธีการอื่นๆ คือ ประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายดูดซับ จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำที่จางจากกระบวนการมีน้อย

จ. การแยกด้วยกระบวนการเมมเบรนแบบเวเปอร์เพอเมชัน (vapor permeation) ซึ่งจะใช้หลักการทำงานของเมมเบรนคล้ายแบบเพอเวปอเรชัน พบว่าอายุการใช้งานของเมมเบรนชนิดนี้ยาวนานกว่ากระบวนการรีเวิร์สออสโมซิส (RO) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (MF) และกระบวนการเพอเวปอเรชัน (PV) สารป้อนในกระบวนการนี้อยู่ในรูปไอ ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้รับจากกระบวนการกลั่นพร้อมที่จะป้อนเข้าสู่ระบบการแยกด้วยเมมเบรน โดยไม่ต้องทำการให้ความร้อนก่อนอย่างในกระบวนการเพอเวปอเรชัน

1.2.2 กระบวนการเมมเบรน

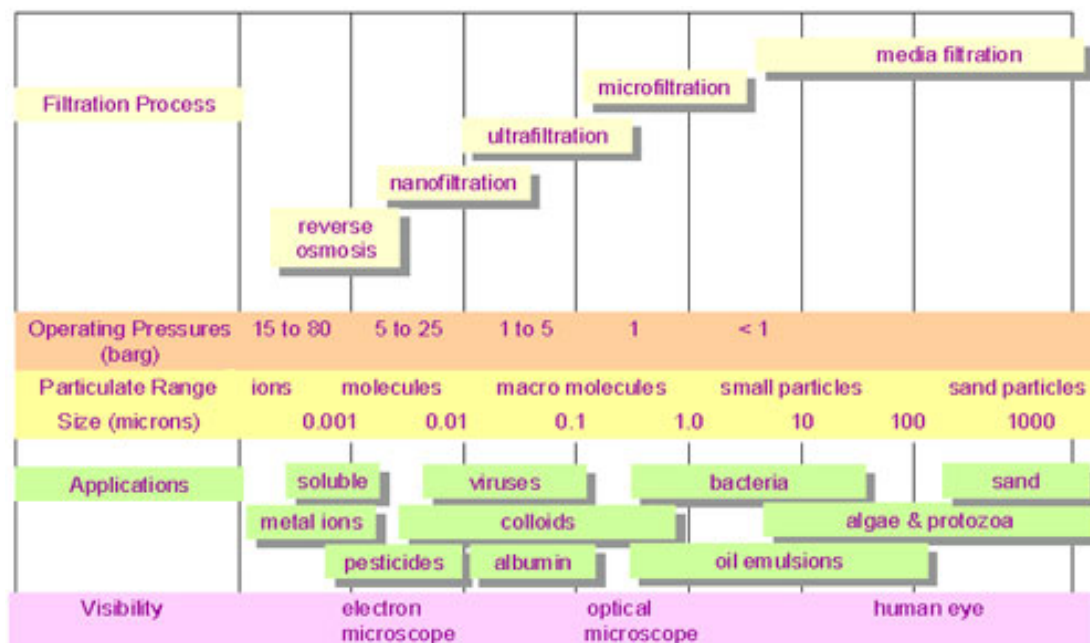
กระบวนการเมมเบรน เป็นกระบวนการที่อาศัยเยื่อเมมเบรนในการแยกสารหรือเพิ่มความเข้มข้นหรือทำสารให้บริสุทธิ์ขึ้นสำหรับสารละลายหรือก๊าซผสม ซึ่งมีความแตกต่างจากกระบวนการแยกทั่วไป เช่น กระบวนการดูดซับ (adsorption) กระบวนการไล่ออก (stripping) กระบวนการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) และการกลั่น (distillation) หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรน คือ อาศัยแรงขับเคลื่อนทำให้สารละลายไหลผ่านเมมเบรนแล้วเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้นหรือผลต่างของความดัน ลักษณะสำคัญของเมมเบรนคือ มีคุณสมบัติในการเลือกสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการมี affinity ของเมมเบรนต่อสารนั้นๆ หรือจากขนาดรูพรุน ซึ่งสารละลายที่ผ่านเมมเบรนได้เรียกว่า เพอมีเอท (permeate) ส่วนที่ไม่ผ่านเมมเบรนเรียกว่า รีเทนเททหรือคอนเซนเทรท (retentate หรือ concentrate) หลักการกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนแสดงดังภาพประกอบ 1.2



ภาพประกอบ 1.2 หลักการของกระบวนการกรองด้วยเมมเบรน

ความสามารถในการแยกดูได้จากตัวแปรสำคัญ 2 ตัวแปร คือ

1. ฟลักซ์ (flux) คือ อัตราการไหลผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักหรือโมเลกุลของเพอมีเอทต่อพื้นที่แผ่นเมมเบรน
2. ร้อยละ rejection คือ ความสามารถในการกักเก็บของตัวถูกละลายของเมมเบรน ซึ่งพบว่าเมมเบรนที่ดีต้องมีทั้ง flux และ ร้อยละ rejection ที่สูง



ภาพประกอบ 1.3 การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดโมเลกุลของสารละลายต่างๆ

ที่มา : <http://www.natcogroup.com/Content.asp?t=MembraneSystems>

1.2.3 การจำแนกกระบวนการเมมเบรน

การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดโมเลกุลแสดงดังภาพประกอบ 1.3 และการแยกเมมเบรนตามหลักการของแรงดันสามารถแยกได้ดังนี้

1.2.3.1 กระบวนการไดอะไลซิส (dialysis process, D) ไดอะไลซิสใช้ผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างสองด้านของเมมเบรน เป็นแรงขับเคลื่อนให้สารเกิดการถ่ายเทผ่านเมมเบรน ตัวถูกละลายขนาดเล็กจะถ่ายเทโดยการแพร่ผ่านเมมเบรนจากด้านที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นต่ำ

1.2.3.2 กระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส (electrodialysis, ED) เป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบที่มีประจุออกจากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ โดยใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนมาต่ออนุกรมกันและอยู่ระหว่างขั้วบวก (anode) และขั้วลบ (cathod) มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดเป็นแรงขับเคลื่อนร่วมกับการเลือกผ่านไอออนของเมมเบรน โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไอออนบวกส่วนไอออนลบจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไอออนลบ เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูงและสารละลายเจือจาง

1.2.3.3 ออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis, RO) หรืออาจเรียกว่า hyperfiltration เช่น กระบวนการแยกสลายโดยใช้ผลต่างระหว่างแผ่นความดันของเมมเบรน เช่น แรงขับเคลื่อนซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1-10 มิลลิปาสคาล หรือ 10-100 บรรยากาศ มีความสามารถในการกักเก็บโมเลกุลขนาดเล็ก (น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1000 หรือมีขนาด 0.1-1 นาโนเมตร) การผ่านเมมเบรนของสารเกิดจากความสามารถในการละลายและการแพร่ (solution diffusion) ในเมมเบรน

1.2.3.4 อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous) สำหรับแยกสารโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เรียกว่า คอลลอยด์ (colloid) ออกจากน้ำและสารโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งแผ่นเมมเบรนมีรูพรุนประมาณ 2-20 นาโนเมตร แรงขับเคลื่อนที่ใช้ในการแยกต่ำกว่าออสโมซิสผันกลับคือ 100-800 กิโลปาสคาล

1.2.3.5 ไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration, MF) เป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนค่อนข้างใหญ่ คือ 0.1-10 นาโนเมตร สำหรับแยกโมเลกุลขนาดใหญ่ สารแขวนลอย หรืออนุภาคเล็กๆ ออกจากของเหลว โดยใช้ความดันอยู่ในช่วง 100-500 กิโลปาสคาล

1.2.3.6 นาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration, NF) เป็นเมมเบรนที่ใช้ขนาดรูพรุนค่อนข้างใหญ่ คือ 2-5 นาโนเมตร โดยกักเก็บไอออนไว้บางส่วน ไอออนที่มีขนาดเล็กและสารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถผ่านเมมเบรนได้

1.2.3.7 กระบวนการแยกก๊าซ (gas separation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกก๊าซผสมแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ กลไกก๊าซเพอเมชัน (gas permeation, GP) ซึ่งโมเลกุลของก๊าซหรือไอผ่านเมมเบรนแบบแน่นไม่มีรูพรุนด้วยกลไกการละลายและการแพร่ (คล้ายออสโมซิสผันกลับ) ใช้แรงดันในการแยก 100 กิโลปาสคาล -10 เมกกะปาสคาล และกลไกก๊าซดิฟฟิวชัน (gas diffusion, GD) เป็นการแยกก๊าซผ่านเมมเบรนรูพรุนขนาดเล็ก แรงขับเคลื่อนเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อย

1.2.3.8 เพอเวปเพอเรชัน (pervaporation, PV) เป็นการแยกองค์ประกอบหนึ่งออกจากสารผ่านเมมเบรนแบบแน่นด้วยกลไกการละลายและการแพร่ องค์ประกอบที่ผ่านเมมเบรนอยู่ในรูปของไอ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการควบคุมความดันด้านเพอเมเทให้ต่ำกว่าความดันย่อยของสารที่ผ่านเมมเบรนและการเก็บตัวอย่างที่เป็นไอ สามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้สารนั้นกลั่นตัวกลับมาเป็นของเหลว และในปัจจุบันพบว่ามีการนำเมมเบรนมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ แสดงดังตาราง 1.3

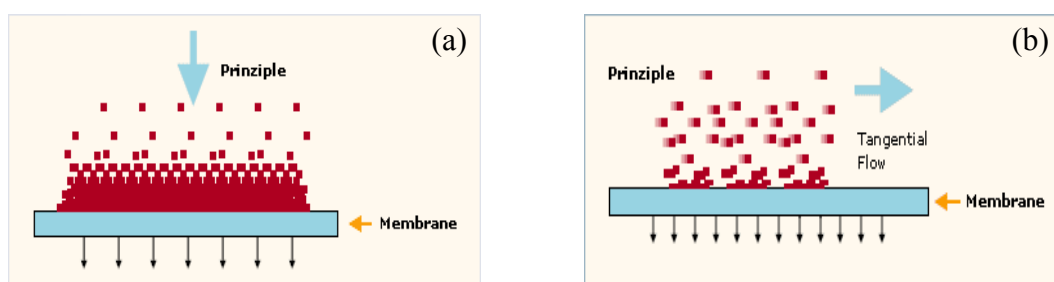
ตาราง 1.3 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

1) reverse osmosis ;
- กระบวนการผลิตน้ำจืดจากน้ำกร่อย
- กระบวนการบำบัดสิ่งสกปรกออกจากน้ำเสีย
- กระบวนการบำบัดน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน
- กระบวนการแยกแอลกอฮอล์ออกจากเบียร์และไวน์
2) dialysis ;
- กระบวนการแยกนิเกิลซัลเฟตออกจากกรดซัลฟูริก
- กระบวนการแยกของเสียออกจากกระบวนการเผาผลาญอาหาร
3) electrodialysis ;
- การผลิตเกลือจากน้ำทะเล
- การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำทะเลจากกระบวนการ RO
- การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating)
- กระบวนการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม semiconductor
4) microfiltration ;
- กระบวนการฆ่าเชื้อโรคของยาและเครื่องสำอาง
- การทำยาปฏิชีวนะให้มีความบริสุทธิ์ขึ้น
- กระบวนการแยกเซลล์สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมออกจากของเหลว
5) ultrafiltration ;
- กระบวนการทำน้ำผลไม้ให้ใสขึ้น
6) pervaporation ;
- การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำที่จุดอะซิโโทโรป
- การแยกน้ำออกจากสารละลายอินทรีย์
- การแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ
7) gas permeation ;
- กระบวนการแยก CO ₂ หรือ H ₂ ออกจากมีเทนหรือสารไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ
- การปรับปรุงอัตราส่วน H ₂ /CO ในก๊าซสังเคราะห์
- กระบวนการแยกไนโตรเจนและออกซิเจนในอากาศ
- การแยกคีนซีเลียมและการแยกคีนซีมีเทนจากก๊าซชีวภาพ

ที่มา : Seader and Henley, 1998

1.2.4 ลักษณะการกรองในเมมเบรน

การกรองเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกของแข็งออกจากสารละลายขุ่น โดยอาศัยความแตกต่างของแรงดัน ในการกรองมีตัวกลางกรอง (filter media) ทำหน้าที่กักสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูที่ผิวหน้าตัวกลางกรองไม่ให้ผ่านออกไปผสมกับสารละลายหรือของเหลว ตัวกลางกรองอาจทำด้วยผ้า กระดาษ ชั้นของกรวดทราย หรือสารสังเคราะห์ เช่น เมมเบรน ไนลอน เป็นต้น แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ



ภาพประกอบ 1.4 การกรองในเมมเบรน (a) แบบปิดตาย, (b) แบบไหลขวาง

ที่มา : <http://membrane.de/industrial.htm>

1.2.4.1 การกรองแบบปิดตาย (dead - end) แสดงดังภาพประกอบ 1.4 (a) เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเมมเบรน ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเมมเบรน เรียกว่า เค้ก (cake) การสะสมของเค้กทำให้เกิดความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้นทำให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ต้องหยุดการกรองเพื่อกำจัดชั้นเค้กที่เกิดขึ้น ดังนั้นการกรองแบบปิดตายจึงควรใช้เมื่อสารละลายประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก มีความเข้มข้นต่ำและดำเนินงานแบบกะ

1.1.4.2 การกรองแบบไหลขวาง (cross flow หรือ tangential flow) แสดงดังภาพประกอบ 1.4 (b) การป้อนสารละลายขนานกับแผ่นเมมเบรนหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมีเอท ซึ่งเป็นแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในกระบวนการออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน การป้อนสารละลายแบบไหลขวางมีผลของแรงเฉือน ทำให้สารละลายกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าเมมเบรนดังนั้นจึงลดการเกิด concentration polarization จึงมีการสะสมของเค้กเพียงบางๆ เท่านั้น การลดลงของฟลักซ์ไม่มากเท่ากับการกรองแบบปิดตาย จึงเหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง การประยุกต์ใช้ในปัจจุบันจึงเป็นกระบวนการออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชันแบบไหลขวางเป็นส่วนใหญ่

1.2.5 อุปกรณ์เมมเบรน (membrane module types)

ในการใช้งานต้องบรรจุหรือประกอบเมมเบรนในหน่วยอุปกรณ์ เพื่อให้มีพื้นที่ของเมมเบรนตามต้องการซึ่งเรียกว่า โมดูล (module) การออกแบบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างต่างกันแสดงในภาพประกอบ 1.5-1.8 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ แบบท่อ แบบเส้นใยกลวงและแบบท่อม้วน หลักการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งานคือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรน กะทัดรัดคือ มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง ตัวอย่างการนำอุปกรณ์เมมเบรนแบบต่างๆ ไปใช้งานแสดงดังตาราง 1.4

ตาราง 1.4 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของอุปกรณ์เมมเบรนทั้ง 4 แบบ

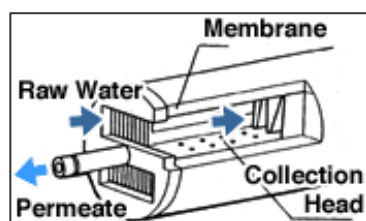
	แผ่นเรียบ	ท่อม้วน	ท่อ	เส้นใยกลวง
พื้นที่/ปริมาตร (ตารางเมตร/ลูกบาศก์เมตร)	30-500	200-800	30-200	500-9,000
การเกิด fouling	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ	สูง
การทำความสะอาด	ปานกลาง	ปานกลาง	ง่าย	ยาก
ราคา	สูง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
main applications	D,RO,PV,UF,MF	D,RO,GP,UF,MF	RO,UF	D,RO,GP,UF

ที่มา: Seader and Henley, 1998

จากตาราง 1.4 พบว่าอุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงจะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์มากที่สุด แม้ว่าอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบมีราคาสูงและมีความหนาแน่นปานกลาง แต่สามารถนำมาใช้ได้กับกระบวนการเมมเบรนเกือบทุกกระบวนการ และเป็นอุปกรณ์เมมเบรนแบบเดียวที่ใช้อย่างกว้างขวางสำหรับกระบวนการเพอเวปพอร์เรชัน สำหรับอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบและอุปกรณ์แบบท่อ สามารถใช้กับกระบวนการเวเปอร์เพอเมอชันได้แต่ไม่นิยม เนื่องจากอุปกรณ์แบบท่อมีการใช้งานค่อนข้างจำกัด เหมาะสำหรับการใช้งานที่มีโอกาสเกิดการอุดตันได้สูงซึ่งจำเป็นต้องมีการล้างเมมเบรน แต่การนำไปใช้งานส่วนใหญ่ในกระบวนการเวเปอร์เพอเมอชันเป็นอุปกรณ์แบบท่อม้วนและแบบเส้นใยกลวง เนื่องจากสามารถต้านทานต่อการอุดตันได้สูงเพราะมีการบรรจุอยู่อย่างหนาแน่น

1.2.5.1 อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ (plate and frame module)

เมมเบรนแบบแผ่นจะใช้อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ มีลักษณะภาคตัดขวางเป็นวงกลมและสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมมเบรนจะประกบติดกันด้วยแผ่นกั้นซึ่งจะมีช่องว่างเพื่อให้ส่วนของเพอมีอิตสามารถไหลผ่านได้ แสดงดังภาพประกอบ 1.5 อุปกรณ์แบบนี้มีการออกแบบโครงสร้างอย่างง่ายและสามารถนำมาใช้งานได้สะดวก

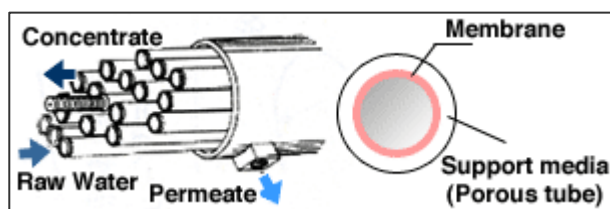


ภาพประกอบ 1.5 อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ

ที่มา : http://www.asahi-kasei.co.jp/membrane/microza/en/kiso/kiso_7.html

1.2.5.2 อุปกรณ์แบบท่อ (tubular module)

เมมเบรนแบบท่อแสดงดังภาพประกอบ 1.6 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยปกติในตัวบรรจุ (housing) ประกอบด้วยท่อเมมเบรนหลายๆ ท่อรวมกันและอาจสูงถึง 30 ท่อ สารละลายป้อนจะไหลเข้าด้านในท่อและเพอมีอิตซึ่งไหลผ่านจะถูกเก็บมารวมกัน ชุดอุปกรณ์แบบนี้มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์ต่ำกว่าแบบแผ่นและกรอบ นอกจากเมมเบรนจะผลิตมาจากพอลิเมอร์แล้ว ยังนิยมผลิตเมมเบรนจากเซรามิกส์แบบท่อและอาจจะเป็นแบบโมโนลิท (monolith)

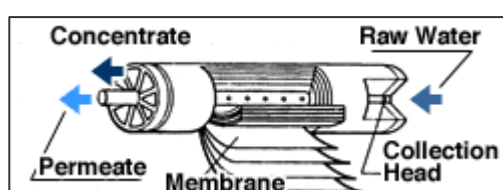


ภาพประกอบ 1.6 อุปกรณ์แบบท่อ

ที่มา : http://www.asahi-kasei.co.jp/membrane/microza/en/kiso/kiso_7.html

1.2.5.3 อุปกรณ์แบบท่อม้วน (spiral wound module)

เป็นการนำเมมเบรนแผ่นเรียบมาม้วนรอบแกน โดยมีแผ่นกั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึง 40 เซนติเมตร แผ่นเมมเบรนชั้นหนึ่งๆ ประกอบด้วยแผ่นเมมเบรน 2 แผ่น โดยเมมเบรนทั้ง 2 แผ่นจะถูกกั้นด้วยแผ่นกั้นเพื่อให้เพอมีอิตและสารป้อนสามารถไหลผ่านได้ สารละลายป้อนจะไหลตามแนวแกนและเพอมีอิตจะไหลภายในท่อ ข้อดีของอุปกรณ์แบบท่อม้วนคือ มีความแข็งแรง สามารถทนต่อการใช้งานที่ความดันสูงๆ ได้ ขนาดกะทัดรัดและโอกาสในการเกิด concentration polarization มีน้อย อุปกรณ์แบบท่อม้วนแสดงดังภาพประกอบ 1.7

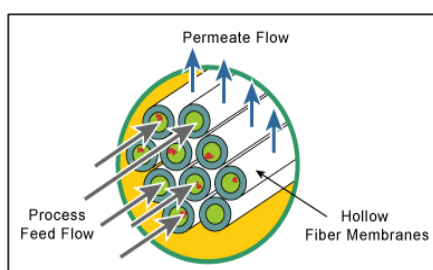


ภาพประกอบ 1.7 อุปกรณ์แบบท่อม้วน

ที่มา : http://www.asahi-kasei.co.jp/membrane/microza/en/kiso/kiso_7.html

1.2.5.4 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง (hollow fiber module)

เมมเบรนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากคือ น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ภายในชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเมมเบรนแบบเส้นใยจำนวนมากคือมากกว่า 1 ล้านเส้นใย สารละลายป้อนจะถูกป้อนจากด้านในของเส้นใยและเก็บเพอมีอิตจากด้านนอกของเส้นใย ข้อดีของเมมเบรนแบบนี้คือ เป็นเมมเบรนที่มีความยืดหยุ่น สามารถดำเนินการได้ 2 ทางคือ inside-out หรือ out-inside อุปกรณ์จะมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์เมมเบรนแบบอื่นๆ แต่ให้ประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียคือ มีราคาแพง การวิจัยและพัฒนายังมีอยู่น้อยและเกิดการอุดตันได้ง่าย อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงแสดงดังภาพประกอบ 1.8 จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-0.25 เมตร และยาว 1 เมตร



ภาพประกอบ 1.8 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง

ที่มา : http://www.kochmembrane.com/images/hw_overview_benefits.jpg

ระบบเมมเบรนแบบต่างๆ ดังกล่าวนั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสียดังแสดงในตาราง 1.5

ตาราง 1.5 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบเมมเบรนแบบต่างๆ

ชนิด	ข้อดี	ข้อเสีย	commercial status
tubular	1. ทำความสะอาดง่าย, เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร 2. เป็นที่รู้จักดี, มีการทดสอบและใช้งานมาอย่างดีแล้ว 3. สามารถเปลี่ยนเฉพาะท่อเมมเบรนได้	1. ปริมาณของเหลวในยูนิต (hold up) สูง 2. ราคาแพง 3. ใช้พื้นที่ในการติดตั้งค่อนข้างมาก	commercial available
plate and frame	1. ปริมาณ hold up ต่ำ 2. เป็นที่รู้จัก ใช้งานกันเป็นอย่างดีแล้ว 3. ใช้พื้นที่ในการติดตั้งไม่มาก	1. อาจเกิดการอุดตันของเมมเบรนตามจุดที่สารละลายหยุดนิ่งหรือไหลช้า 2. ทำความสะอาดยากไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร 3. ราคาแพง 4. การเปลี่ยนแผ่นเมมเบรนทำได้ไม่สะดวก ต้องใช้เวลา	commercial available
spiral wound	1. ราคาถูก 2. ขนาดกะทัดรัด 3. เป็นที่รู้จัก, ใช้งานมานาน	1. เกิดการอุดตันได้ง่าย, สกปรกง่าย 2. ทำความสะอาดยากไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร	commercial available
hollow fiber	1. ราคาถูก 2. ขนาดกะทัดรัด	1. สกปรกหรืออุดตันง่าย 2. ทำความสะอาดยากมาก	commercial for RO

ที่มา: จินดา แซ่กัน, 2540

1.3 กระบวนการเวเปอร์เพอเมชัน

การใช้เมมเบรนในกระบวนการแยกก๊าซมีมานานกว่า 100 ปีแต่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเริ่มประมาณ 20 -25 ปี ที่ผ่านมา การแยกก๊าซโดยใช้พอลิเมอร์ชนิดเมมเบรนแบบแน่นเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก มีการนำไปใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น การแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากมีเทน การปรับปรุงอัตราส่วน H_2/CO ใน syn gas การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการแยกน้ำออกจากก๊าซธรรมชาติและอากาศ การแยกก๊าซฮีเลียม การแยกสารละลายอินทรีย์ออกจากอากาศ การแยกก๊าซออกซิเจนออกจากอากาศ การแยกก๊าซไนโตรเจนออกจากอากาศ เป็นต้น

กระบวนการเวเปอร์เพอเมชัน เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อแข่งขันกับกระบวนการกลั่นที่อุณหภูมิต่ำ (distillation at cryogenic) กระบวนการดูดซับก๊าซ (adsorption) และกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน (pressure-swing adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการแยกของผสมโดยใช้เมมเบรนที่แตกต่างจากกระบวนการอื่นๆ คือ ใช้แยกของผสมในสถานะก๊าซไม่ใช่ของเหลว ทั้งสารป้อนและเพอเมโทอยู่ในสถานะก๊าซ แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ก๊าซดิฟฟิวชัน (gas diffusion) และก๊าซเพอเมชัน (gas permeation)

1.3.1 กลไกของก๊าซดิฟฟิวชัน (gas diffusion)

ในการแยกก๊าซโดยใช้เยื่อแผ่นรูพรุน แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทอาจเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อยและยังแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

- 1) ถ้ารูพรุนของเมมเบรนใหญ่กว่าโมเลกุลของก๊าซมาก โมเลกุลของก๊าซภายใต้ความดันสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนโดยการพาววล ทำให้โมเลกุลของก๊าซทุกชนิดผ่านเมมเบรนได้เท่าๆ กันและจะไม่เกิดการแยกดังภาพประกอบ 1.9 (a)
- 2) ถ้ารูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่าระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน (mean free path) โมเลกุลจะเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนด้วยกลไก Knudsen diffusion โดยจะชนกับผนังมากกว่าที่จะชนกันเองดังภาพประกอบ 1.9 (b) พลิกซ์ของการแพร่คำนวณได้จากสมการ (1.3)

$$J = \frac{\pi n r^2 D_k \Delta P}{RT \tau} \quad (1.3)$$

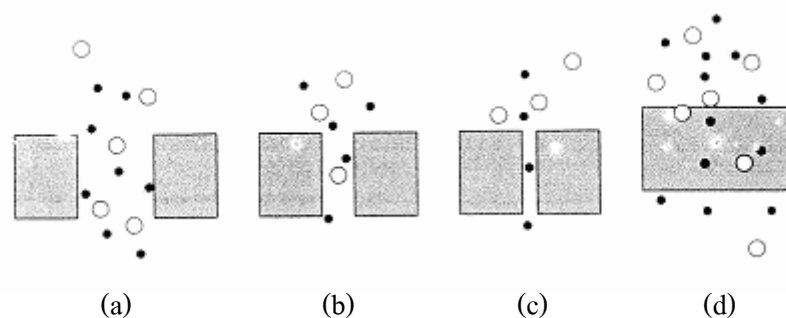
เมื่อ	J	=	อัตราการถ่ายเทของก๊าซ (kg/s)
	n	=	จำนวนรูพรุน
	r	=	รัศมีรูพรุน (m)

D_k	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Knudsen diffusion coefficient) (m^2/s)
R	=	ค่าคงที่ก๊าซ ($m^3 Pa/mol K$)
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
τ	=	ตัวแปรความคดเคี้ยวของรูพรุน
l	=	ความหนาเมมเบรน (m)

จากกลไกดังกล่าวทำให้ ก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะแพร่ผ่านเมมเบรนได้เร็วกว่า ก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้เกิดการแยกขึ้น (สัมประสิทธิ์การแพร่แปรผกผันกับรากที่สองของน้ำหนักโมเลกุล)

3) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กมาก ทำให้ก๊าซที่มีโมเลกุลใหญ่กว่าไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้จึงเกิดการแยกขึ้น และเรียกกลไกนี้ว่าการคัดขนาด หรือ molecular sieving ดังภาพประกอบ 1.9 (c)

ในทางปฏิบัติ การผลิตเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กพอที่จะกักกัน โมเลกุลของก๊าซ ได้ทำได้ยากเนื่องจากโมเลกุลของก๊าซมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของตัวถูกละลายอื่นๆ มาก นอกจากนี้ การแยกก๊าซโดยใช้เมมเบรนรูพรุนยังมีข้อจำกัดตรงที่ค่าการแยกต่ำ



ภาพประกอบ 1.9 กลไกการถ่ายโอนในเมมเบรน กลไกของก๊าซดิวไฟฟิวชัน; (a) รูพรุนของเมมเบรนใหญ่กว่าโมเลกุลของก๊าซมาก (b) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่าระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน (c) รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กมาก (d) กลไกก๊าซเพอมีเอชัน

ที่มา : Seader and Henley, 1998

1.3.2 กลไกก๊าซเพอเมชัน (gas permeation)

ถ้าเมมเบรนที่ใช้ในการแยกก๊าซเป็นเมมเบรนแบบแน่น เช่น เยื่อแผ่นเชิงประกอบ และแรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทเป็นผลต่างของความดัน การเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนสามารถอธิบายด้วย กลไกการละลาย-การแพร่ (solution-diffusion mechanism) ดังภาพประกอบ 1.9 (d)

สมมติฐานพื้นฐานของการซึมผ่านเมมเบรน คือ

- 1) ไอผสมที่ป้อนเข้าสู่เมมเบรนจะถูกละลายหรือดูดซับเข้าสู่ผิวเมมเบรน
- 2) ไอผสมจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนโดยกลไกการแพร่
- 3) องค์ประกอบที่สามารถซึมผ่านเมมเบรนจะเคลื่อนที่มาด้านเพอเมเท

ค่าการแยกและฟลักซ์ ที่ได้รับจึงขึ้นอยู่กับการที่โมเลกุลของก๊าซต่างชนิดมีการละลายในเมมเบรนและสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเมมเบรนที่แตกต่างกัน การแพร่ของก๊าซเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นสามารถคำนวณค่าฟลักซ์จากสมการของฟิคส์ (Fick's law) ดังสมการ (1.4)

$$J_i = \frac{-D_i dC_i}{dx} \quad (1.4)$$

เมื่อ J_i = ฟลักซ์เชิงโมลของก๊าซ i ($\text{kg/m}^2 \text{ s}$)
 D_i = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ i ในเมมเบรน (m^2/s)
 C_i = ความเข้มข้นเชิงโมลของก๊าซ (kg/m^3)
 dx = ความหนาของเมมเบรน (m)

ที่สภาวะคงตัวอินทิเกรตสมการ (1.4) ได้

$$J_i = \frac{D_i (C_{if} - C_{ip})}{l} \quad (1.5)$$

เมื่อ C_{if}, C_{ip} = ความเข้มข้นของ i ในเมมเบรนด้านป้อนและด้านเพอเมเท ตามลำดับ
 l = ความหนาของเมมเบรน (m)

ความเข้มข้นในเมมเบรนขึ้นอยู่กับละลายและการดูดซับในเมมเบรน และพบว่ามีความสัมพันธ์กับความดันย่อยของก๊าซภายนอกเมมเบรนตามกฎของเฮนรี (Henry's law) หรือ $C_{if} = S_i P_{if}$ และ $C_{ip} = S_i P_{ip}$ จะได้ดังสมการ (1.6)

$$J_i = \frac{D_i S_i (P_{if} - P_{ip})}{l} \quad (1.6)$$

เมื่อ S_i = สัมประสิทธิ์การละลายของ i ในเมมเบรน (mol/m^3)
 P_{if}, P_{ip} = ความดันย่อยของก๊าซ i ด้านป้อนและด้านเพอมีเอท ตามลำดับ
 สัมประสิทธิ์การละลายมีคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ขึ้นอยู่กับ interaction ระหว่าง i กับเมมเบรน ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นตัวแปรทางจลน์ศาสตร์ และสามารถหาค่าได้จากการทดลอง ผลคูณของส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่และสัมประสิทธิ์การละลาย เรียกว่า สภาพการซึมผ่าน \bar{P}_i (permeability) ตามสมการ(1.7)

$$\bar{P}_i = D_i S_i \quad (1.7)$$

ตามสมการ (1.7) แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่-การละลายมีความสำคัญมากและขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรน ดังนั้นชนิดและโครงสร้างเมมเบรนที่เหมาะสมกับก๊าซที่ต้องการแยกจึงมีความสำคัญ

สัมประสิทธิ์การแพร่ในก๊าซผสม 2 ชนิดอธิบายไว้โดย รีด พรอสนิชและโพลลิง (Reid, Prausnitz, และ Poling) สมการที่ได้รับจากทางทฤษฎีและจากผลการทดลองสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในก๊าซที่ความดันต่ำจนถึงปานกลาง สมการที่ได้รับอยู่บนพื้นฐานทฤษฎีก๊าซของบอลซ์แมน (Boltzman) และในเวลาต่อมาได้รับการดัดแปลงโดยชาฟแมน-อันส์ค็อก (Chapman และ Enskog) ซึ่งพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่แปรผกผันกับค่าความดันและไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สมการที่ง่ายและสะดวกคือ สมการของฟูลเลอร์สเค็ชเชอร์และกิลดิง (Fuller Schetter และ Gidding) ซึ่งยังคงไว้ซึ่งรูปแบบทฤษฎีชาฟแมน-อันส์ค็อก (Chapman-Enskog) ไว้แสดงดังสมการ (1.8) (Seader and Henley, 1998)

$$D_{AB} = D_{BA} = \frac{0.00143T^{1.75}}{PM_{AB}^{1/2} \left[(\sum v)_A^{1/3} + (\sum v)_B^{1/3} \right]^2} \quad (1.8)$$

$$M_{AB} = \frac{2}{(1/M_A) + (1/M_B)} \quad (1.9)$$

เมื่อ D_{AB} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของ i ในเมมเบรน (cm^2/s)
 P คือ ความดัน (atm)
 T คือ อุณหภูมิ (K)
 $\sum v$ คือ ผลรวมปริมาตรของอะตอมและโครงสร้างที่เกิดการแพร่ผ่านแสดงตัวอย่างในตาราง 1.6

ตาราง 1.6 ผลรวมปริมาตรของอะตอมและโครงสร้างที่เกิดการแพร่ผ่าน

atomic diffusion volumes			
atomic and structural diffusion volume increments			
C	15.9	F	14.7
H	2.31	Cl	21.0
O	6.11	Br	21.9
N	4.54	I	29.8
aromatic ring	-18.3	S	22.9
heterocyclic ring	-18.3		
diffusion volumes of simple molecules			
He	2.67	CO	18.0
Ne	5.98	CO ₂	26.7
Ar	16.2	N ₂ O	35.9
Kr	24.5	NH ₃	20.7
Xe	32.7	H ₂ O	13.1
H ₂	6.12	SF ₆	71.3
D ₂	6.84	Cl ₂	38.4
N ₂	18.5	Br ₂	69.0
O ₂	16.3	SO ₂	41.8
Air	19.7		

ที่มา : Seader and Henley, 1998

ค่าการแยก (separation factor)

ในการแยกก๊าซผสม 2 ชนิดออกจากกัน ความสามารถในการแยกของเมมเบรนบอกได้จากค่าการแยก (α_{ij}) ตามสมการ (1.10)

$$\alpha_{ij} = \frac{y_{ip}/y_{jp}}{y_{if}/y_{jf}} \quad (1.10)$$

โดย y_{ip}, y_{jp} = เศษส่วนเชิงโมลของก๊าซ i และ j ในเฟอมีเอท (% by weight)
 y_{if}, y_{jf} = เศษส่วนเชิงโมลของก๊าซ i และ j ในสารป้อน (% by weight)

ถ้าความดันด้านป้อนต่ำมาก ค่าการแยกอาจเขียนในรูปสัมประสิทธิ์การซึมผ่านตามสมการ (1.11)

$$\alpha_{ij} = \frac{\bar{P}_i}{\bar{P}_j} \quad (1.11)$$

แทนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจากสมการ (1.7) จะได้ดังสมการ (1.12)

$$\alpha_{ij} = \frac{D_i/D_j}{S_i/S_j} \quad (1.12)$$

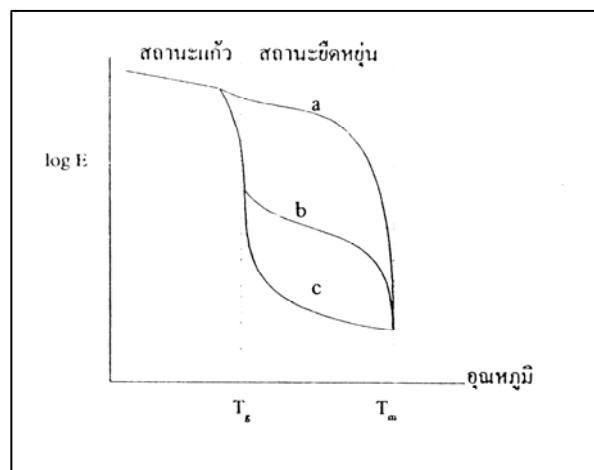
ค่าการแยกที่คำนวณจากสมการ (1.11) และ (1.12) เป็นค่าในอุดมคติ (ideal separation factor) ค่าการแยกของก๊าซผสมหลายชนิดไม่เท่ากับค่าอุดมคติ เพราะที่ความดันสูง อาจเกิด plasticization ซึ่งหมายถึงการที่โมเลกุลของก๊าซมี affinity กับเมมเบรน ทำให้มีสภาพการซึมผ่านสูงขึ้นแต่การเลือกผ่านในรูปค่าการแยกลดลง นอกจากนี้ค่าการแยกยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความดัน P_{if}/P_{ip} ที่ความดันในการป้อนสูง หรือ $P_{if}/P_{ip} \rightarrow 0$ ประสิทธิภาพในการแยกในรูปของฟลักซ์ หรืออัตราการซึมผ่านสูงสุดแต่การแยกลดลง การทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนจึงอาจเป็นการให้ความดันด้านป้อนสูง และ/หรือ ให้ความดันด้านขาออกต่ำ เช่น เป็นสุญญากาศ

1.3.3 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันส่วนใหญ่ ทำการผลิตมาจากสารอินทรีย์ที่ทำจากพอลิเมอร์ แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการใช้สารอนินทรีย์ ซึ่งได้แก่ โลหะ แก้วและเซรามิกส์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและพัฒนาเมมเบรนอนินทรีย์ชนิดใหม่จากซีโอไลต์ (zeolite) การเลือกชนิดของวัสดุ เพื่อนำมาผลิตเมมเบรนขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานและชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตเมมเบรนในทางการค้ามีดังนี้คือ

1.3.3.1 พอลิเมอร์ เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เรียกว่าโมโนเมอร์ (monomer) มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ดังนั้นน้ำหนักโมเลกุลจึงขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยในสายโซ่และน้ำหนักโมเลกุลของหน่วยย่อย โดยที่พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียวกันในสายโซ่ เรียกว่า โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) มีพอลิเมอร์หลายชนิดที่ผลิตจากโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิด เรียกว่า โคพอลิเมอร์ (copolymer) สถานะของพอลิเมอร์ (หมายถึงเฟสหรือวัฏภาคที่พอลิเมอร์นั้นปรากฏอยู่) มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกลทางความร้อนและสภาพการซึมผ่านเมมเบรน เมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อนจนอุณหภูมิสูงถึงค่าหนึ่งก็จะเปลี่ยนจากสถานะแก้วไปเป็นสถานะยืดหยุ่น อุณหภูมินั้น คือ glass transition temperature

(T_g) ในสถานะแก้วสายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้จำกัด คือ ไม่สามารถหมุนรอบแกนของสายโซ่หลักได้อย่างอิสระ ซึ่งมีผลทำให้สภาพการซึมผ่านสารของเมมเบรนที่ผลิตได้จากพอลิเมอร์นั้นๆ ต่ำ ที่อุณหภูมิเท่ากับหรือสูงกว่า T_g พอลิเมอร์มีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะความแข็งแรงของพันธะได้ จึงเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เมื่อมีการเปลี่ยนจากสถานะแก้วไปเป็นสถานะยืดหยุ่นอธิบายได้ตามภาพประกอบ 1.10 ซึ่งเป็นค่าแทนโมดูลัส (tensile modulus, E) เทียบกับอุณหภูมิ สำหรับพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกอย่างสมบูรณ์ ได้แก่ เส้น a ซึ่งค่า E เปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยนสถานะจากยืดหยุ่นไปเป็นสถานะแก้ว ส่วนเส้น b สำหรับพอลิเมอร์กึ่งผลึกมีการเปลี่ยนแปลงคือลดลงอย่างช้า อธิบายได้ว่าโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือยังอยู่ที่เดิมที่ T_g แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเมื่ออุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลว (T_m) เส้น c สำหรับพอลิเมอร์อสัณฐานเมื่อถึงจุด T_g ค่า E และคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ปริมาตรจำเพาะและอัตราการซึมผ่านมีการเปลี่ยนแปลง พอลิเมอร์ที่มี T_g และ/หรือ T_m สูงจะมีความคงทนต่อความร้อนและสารเคมีที่ดี เพราะการเคลื่อนไหวของสายโซ่ต่ำและ interaction ระหว่างสายโซ่แข็งแรง ในแง่การผลิตเมมเบรนซึ่งต้องใช้ตัวทำละลายพอลิเมอร์พวกนี้จะละลายในตัวทำละลายต่างๆ ได้ยากจึงอาจเป็นปัญหาในการนำมาผลิตเมมเบรน ตัวอย่าง T_g ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ แสดงดังตาราง 1.7



ภาพประกอบ 1.10 ค่าแทนโมดูลัส (E) ของพอลิเมอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะแก้วไปเป็นสถานะยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ (a) พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกอย่างสมบูรณ์ (b) พอลิเมอร์กึ่งผลึก (c) พอลิเมอร์อสัณฐาน

ที่มา : รัตนา, 2541

ตาราง 1.7 glass transition temperature (T_g) ของพอลิเมอร์บางชนิด

พอลิเมอร์	T_g (องศาเซลเซียส)	พอลิเมอร์	T_g (องศาเซลเซียส)
polydimethylsiloxane	-123	cellulose diacetate	80
polyethylene	-120	polyvinyl alcohol	85
natural rubber	-72	polyvinyl chloride	87
polyvinylidene fluoride	-40	polyacrylonitrile	120
polymethylacrylate	10	polytetrafluoroethylene	126
nylon 6	50	polycarbonate	150
cellulose nitrate	53	polysulfone	190

ที่มา : รัตนา, 2541

1.3.3.2 สารอนินทรีย์สำหรับผลิตเมมเบรน เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุอนินทรีย์มีคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เหนือกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ สารอนินทรีย์ที่นิยมนำมาผลิตเมมเบรนสังเคราะห์ ได้แก่ เซรามิกส์ โลหะ แก้วและซีโอไลต์ (zeolite) ในปัจจุบันได้มีการนำเมมเบรนอนินทรีย์มาใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ไมโครฟิลเตรชันและการแยกก๊าซเท่านั้น สำหรับกระบวนการเพอแวนพอเรชัน การผลิตเมมเบรนอนินทรีย์ยังมีการวิจัยและกำลังพัฒนาอยู่ โดยวัสดุอนินทรีย์ชนิดใหม่ก็นำมาผลิตเมมเบรน ได้แก่ สารจำพวกซีโอไลต์ เช่น silicalite, zeolite Na-A, zeolite Na-X และ zeolite Na-Y เนื่องจากพบว่ามีประสิทธิภาพของรูพรุนแคบจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ทั้งในกระบวนการเพอแวนพอเรชันและกระบวนการเวเปอร์พอมิเอชัน

1.3.4 การละลายและการแพร่ในเมมเบรน

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนสำหรับกระบวนการแยกก๊าซ ส่วนมากจะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous) ซึ่งโมเลกุลไม่อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน ขนาดของช่องว่างระหว่างโมเลกุลเปลี่ยนแปลงได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g โมเลกุลของพอลิเมอร์อสัณฐานเคลื่อนที่ได้จำกัด (หรืออยู่สถานะแก้ว) มีการซึมผ่านต่ำแต่มีการเลือกผ่านเนื่องจากขนาดและรูปร่างของโมเลกุลก๊าซ

ซึ่งอาจแตกต่างกันไม่มากได้ดี ถ้าพอลิเมอร์มีสถานะอยู่ที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g โมเลกุลมีความยืดหยุ่นสูง (อยู่สถานะยืดหยุ่น) การซึมผ่านสูงแต่การเลือกผ่านดีน้อยกว่าพอลิเมอร์ที่อยู่สถานะแก้ว

สภาพการซึมผ่าน \bar{P}_i (permeability) เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การละลายขององค์ประกอบของก๊าซและสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบนั้นในเมมเบรน อัตราการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน สามารถทำได้โดยใช้เมมเบรนแบบบางมากๆ และความดันด้านสารป้อนสูง สภาพการซึมผ่านขององค์ประกอบก๊าซในเมมเบรนพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ในตาราง 1.8 การละลายของโมเลกุลของก๊าซในพอลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าของเหลวมาก โมเลกุลของก๊าซที่รวมตัวกันได้ดีจะละลายในเมมเบรนได้ดีขึ้นถ้าก๊าซมี affinity กับพอลิเมอร์สูงทำให้การละลายเพิ่มขึ้นเช่นกัน ก๊าซที่เบาจะไม่เกิดการ interaction กับพอลิเมอร์หรือเป็นสาเหตุให้พอลิเมอร์เกิดการบวมตัว ดังนั้นการรวมตัวของก๊าซที่ผ่านเมมเบรนเป็นคุณสมบัติที่พบในการทดลอง ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การละลายเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในสภาพการซึมผ่านดังตาราง 1.8 และบ่อยครั้งที่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และสัมประสิทธิ์การละลายออกมาได้ สำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของโมเลกุลก๊าซในพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลและชนิดของพอลิเมอร์ โมเลกุลขนาดเล็กจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้นดังตาราง 1.9 แสดงขนาดโมเลกุลของก๊าซหลายชนิด ตัวอย่างเช่น ออกซิเจนมีขนาดเล็กกว่าไนโตรเจนแต่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ดังนั้นสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของออกซิเจนควรสูงกว่าไนโตรเจน เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นหลักพบว่าเป็นเช่นนั้นในพอลิเมอร์หลายชนิด สัมประสิทธิ์การแพร่ในเมมเบรนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและมีความแตกต่างกันสำหรับพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะยืดหยุ่นหรือแก้ว สำหรับพอลิเมอร์ในสถานะยืดหยุ่นถ้าก๊าซละลายในเมมเบรนได้น้อยสัมประสิทธิ์การแพร่ในเมมเบรนมีค่าค่อนข้างคงที่แต่ถ้าก๊าซละลายในเมมเบรนได้ดีสัมประสิทธิ์การแพร่ในเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นแบบเส้นตรง และถ้าก๊าซนั้นเกิด plasticization กับพอลิเมอร์ สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเป็นแบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลและอีกกรณีหนึ่งคือ โมเลกุลมีการเกาะกลุ่มรวมกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ในเมมเบรนลดลงกับความเข้มข้น สำหรับพอลิเมอร์ในสถานะแก้วไม่ว่าก๊าซนั้นจะละลายในเมมเบรนได้มากหรือน้อย สัมประสิทธิ์การแพร่ในเมมเบรนเพิ่มขึ้นกับความเข้มข้น ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และสัมประสิทธิ์การละลาย มีลักษณะคล้ายคลึงกันตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25-50 องศาเซลเซียสพบว่าแปรผันตรงกับส่วนกลับอุณหภูมิดังสมการ (1.13) และ (1.14)

$$D = D^0 \exp(-E_d/RT) \quad (1.13)$$

$$S = S^0 \exp(-E_s/RT) \quad (1.14)$$

เมื่อ	D^0	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ความเข้มข้นต่ำ
	S^0	=	สัมประสิทธิ์การละลายที่ความเข้มข้นต่ำ
	E_d	=	ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่ (KJ/kg)
	E_s	=	ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการละลาย
	R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (KJ/kmol K)
	T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

สัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 200-300 ขณะที่สัมประสิทธิ์การละลายอาจมีค่าค่อนข้างคงที่หรือลดลงน้อยกว่าร้อยละ 30 ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของสภาพการซึมผ่าน

ตาราง 1.8 ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการซึมผ่านของตัวถูกละลายในเมมเบรนพอลิเมอร์แบบแน่น

ปัจจัย	การส่งผลทำให้สภาพการซึมผ่านสูงขึ้น
polymer density	ต่ำ
degree of crystallinity	ต่ำ
degree of cross-linking	ต่ำ
degree of vulcanization	ต่ำ
amount of plasticizers	สูง
amount of fillers	ต่ำ
chemical affinity of solute for polymer (solubility)	สูง

ที่มา : Seader and Henley, 1998

ตาราง 1.9 ขนาดโมเลกุลของก๊าซหลายชนิด (\AA)⁰

ก๊าซ	He	H ₂	NO	CO ₂	Ar	O ₂	N ₂	CO
ขนาด	2.6	2.89	3.17	3.3	3.4	3.46	3.64	3.76
ก๊าซ	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	n-CH ₄	CF ₂ Cl ₂	C ₃ H ₆	CF ₄	i-C ₄
ขนาด	3.8	3.9	3.96	4.3	4.3	4.4	4.5	4.7

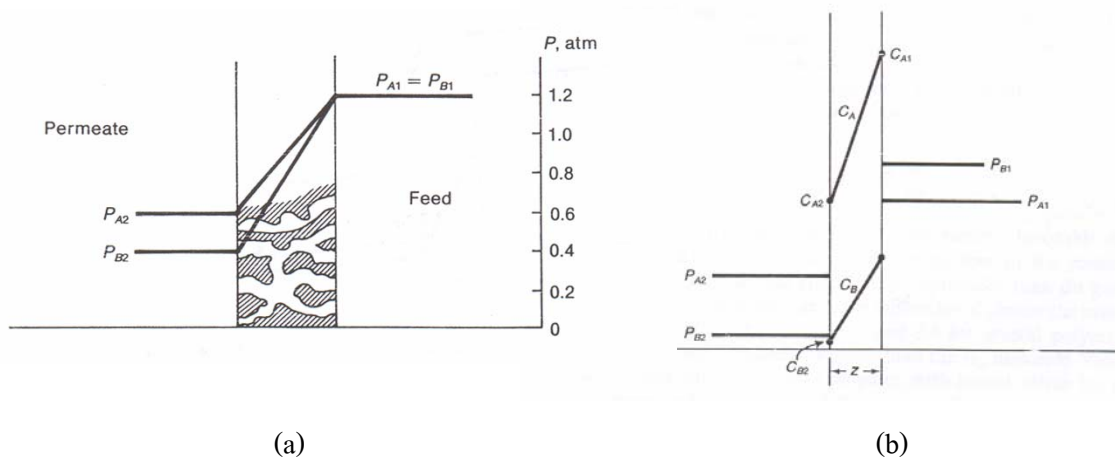
ที่มา : Winston and Kamalesh, 1992

ฟลักซ์ที่แพร่ผ่านฟิล์มเมมเบรนแบบแน่น เป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของเมมเบรนแสดงดังสมการ (1.14) ดังนั้นการมีชั้นรองรับเพื่อให้เมมเบรนมีความแข็งแรงนั้นความหนาที่เกิดขึ้นต้องปราศจากมีรูหรือหลุมต่างๆ กระบวนการแยกก๊าซดำเนินการที่ความแตกต่างความดันจาก 1-20 บรรยากาศ ดังนั้นความหนาของเมมเบรนต้องเข้ามาช่วยเสริมโครงสร้างแบบรูพรุน โดยสามารถต้านทานความดันได้ ชั้นรองรับอาจทำจากวัสดุจำพวกเซรามิกส์ โลหะหรือพอลิเมอร์ และควรมีความพรุนประมาณร้อยละ 50 และโดยส่วนใหญ่แล้วเมมเบรนที่ใช้สำหรับแยกก๊าซมีชั้นรองรับประกอบเข้าเป็นส่วนหนึ่งของเมมเบรน วิธีเฉพาะในการเตรียมเมมเบรนแบบไม่สมมาตรที่มีชั้นบางและแน่นโดยมีความพรุนที่ด้านหนึ่งของเมมเบรน

โดยทั่วไปเมมเบรนที่ใช้ในการแยกก๊าซมีความหนาประมาณ 50-200 ไมโครเมตร และที่ผิวหน้ามีความหนาประมาณ 0.1-1 ไมโครเมตร เทคนิคใหม่ที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนทางการค้าอาจมีความหนาชั้นผิวหน้ามากกว่า 0.1 ไมโครเมตร เมมเบรนที่มีความบางมากๆ โดยทั่วไปจะพบรูพรุนขนาดเล็ก และเมื่อมีการไหลผ่านเกิดขึ้นทำให้สารไหลผ่านรูพรุนขนาดเล็กอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับการแพร่ผ่านในเมมเบรนแบบแน่น พบว่าค่าการแยกที่ได้รับมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เมมเบรนไม่สมมาตรแบบเส้นใยกลวงที่มีขนาดเล็กมีความสามารถในการต้านทานแรงดันสูงๆ ได้โดยไม่มีชั้นรองรับแต่เมมเบรนแบบแผ่นต้องมีการเพิ่มสิ่งช่วยเสริม (support) หรือ spacer

ความแตกต่างของความเข้มข้นในเมมเบรนแบบไม่สมมาตร มีลักษณะที่ซับซ้อน เพราะว่าแรงขับเคลื่อนสำหรับการแพร่ในชั้นบางๆ (skin layer) เป็นความแตกต่างของก๊าซที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์แบบแน่นและแรงขับเคลื่อนในรูพรุนคือ ความแตกต่างของความเข้มข้นหรือความดันภายในรูที่เต็มไปด้วยก๊าซเมื่อชั้นรูพรุนมีความหนาหลายๆ การแพร่จะไม่ส่งผลให้ค่าฟลักซ์เพิ่มสูงขึ้น เพราะก๊าซมีการไหลแบบลาร์มินา (laminar flow) ภายในรูพรุนที่มีความคดเคี้ยว สำหรับเมมเบรนที่มีฟลักซ์สูงควรมีความต้านทานการถ่ายโอนมวลในชั้น fluid boundary layer ทั้งสองข้างเมมเบรน

จากภาพประกอบ 1.11 แสดงขอบเขตตัวถูกละลายโดยทั่วไปสำหรับก๊าซผสมในเมมเบรนแบบรูพรุนและเมมเบรนแบบแน่น ตามลำดับ รวมทั้งผลของชั้นขอบเขตของของไหล (fluid boundary layer) และ ฟิล์มต้านทานการถ่ายโอนมวล (film mass-transfer resistance) สำหรับเมมเบรนแบบรูพรุนแสดงขอบเขตความดันย่อยแบบต่อเนื่อง แต่สำหรับเมมเบรนแบบแน่นแสดงขอบเขตความเข้มข้นภายในเมมเบรนขณะที่ตัวถูกละลายละลายอยู่ภายในเมมเบรน โดยลักษณะการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเป็นไปตามกฎของฟิกส์ มีความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่างบริเวณผิวเมมเบรนทั้ง 2 ด้าน



ภาพประกอบ 1.11 ขอบเขตตัวถูกละลายสำหรับก๊าซผสมในเมมเบรน (a) เมมเบรนแบบรูพรุน
(b) เมมเบรนแบบแน่น

ที่มา : McCabe and Harriott, 1993

1.3.5 ข้อดีของกระบวนการเมมเบรนแบบเวเปอร์เพอเมชัน

กระบวนการเวเปอร์เพอเมชันมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการแยกอื่นๆ ดังนี้คือ

1.3.5.1 ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำเพราะสามารถแยกโดยใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ เนื่องจากการแยกสารตามคุณสมบัติการเลือกผ่านของเมมเบรนต่อสารละลายป้อนที่ต้องการแยก จึงเหมาะสำหรับแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อน ตัวอย่างเช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเพื่อผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ ถ้าใช้กระบวนการเวเปอร์เพอเมชัน มีข้อได้เปรียบทางด้านพลังงานว่าการกลั่นหรือการต้มระเหย และสารป้อนอยู่ในรูปไอ ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้รับจากกระบวนการกลั่นพร้อมที่จะป้อนเข้าสู่ระบบการแยกด้วยเมมเบรนโดยไม่ต้องทำการให้ความร้อนก่อนอย่างในกระบวนการเพอเวปอเรชัน

1.3.5.2 ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้รับสำหรับกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งเพอมีเอทและรีเทนเทท เช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลโดยใช้เมมเบรนที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) จะได้รีเทนเทท คือ เอทานอลเข้มข้น สำหรับเพอมีเอทส่วนใหญ่เป็นน้ำซึ่งมีเอทานอลปนออกมาเพียงเล็กน้อย โดยสามารถนำไปแยกใหม่ได้อีกครั้งโดยใช้เมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และในกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันไม่ต้องใช้สารเคมีตัวที่สามเหมือนการกลั่นแบบอะซิโโทรอป จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

1.3.5.3 สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากชุดเมมเบรนมีลักษณะเป็นชุด (module) หรือหน่วยและสามารถนำหน่วยย่อยๆ มาต่อเรียงกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแยกได้

1.3.5.4 สามารถดำเนินการแบบกะ (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) รวมทั้งติดตั้งระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้ไม่ยุ่งยาก มีความยืดหยุ่นในกระบวนการสูง

1.3.5.5 การลงทุนในกระบวนการต่ำ ติดตั้งง่าย สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย มีขนาดเล็กกะทัดรัดและไม่เปลืองพื้นที่ในการดำเนินการ

1.3.5.6 หลักการทำงานไม่ถูกจำกัดด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องจุดอะซิโโทรอป

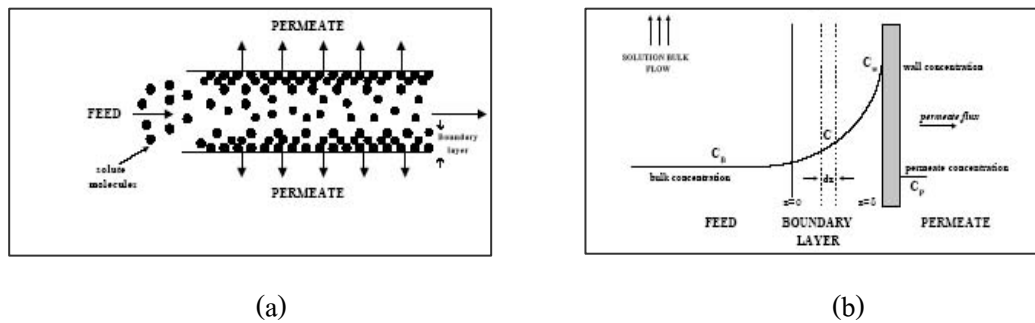
จากข้อได้เปรียบของกระบวนการดังกล่าว หากสามารถนำกระบวนการเมมเบรนแบบเวเปอร์เพอมีเอชันไปใช้แทนกระบวนการแบบเดิมได้ เช่น สำหรับการแยกเอทานอล-น้ำจากชีวมวลแทนการกลั่นที่ใช้อุณหภูมิหรืออาจนำมาใช้แทนบางขั้นตอน เช่น แทนการกลั่นแบบอะซิโโทรอป ก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์

1.3.6 ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรนแบบเวเปอร์เพอมีเอชัน

ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรนแบบเวเปอร์เพอมีเอชัน ก็พบว่ามีเช่นเดียวกับกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนแบบอื่นๆ มีดังนี้คือ

1.3.6.1 concentration polarization (CP) หมายถึง การสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรน ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงกว่าในบริเวณที่อยู่ห่างออกไป (bulk solution) แสดงดังภาพประกอบ 1.12 ซึ่งแสดงการเกิด concentration polarization (CP) จะลดสมรรถนะของการแยกโดยจะเพิ่มความต้านทานต่อการไหลของสารละลายทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลงเนื่องจากทำให้เกิดการอุดตัน (fouling) การลด CP สามารถทำได้โดยการออกแบบอุปกรณ์ให้มีการป้อนสารละลายผ่านเมมเบรนแบบไหลขวางที่ความเร็วสูงจะ

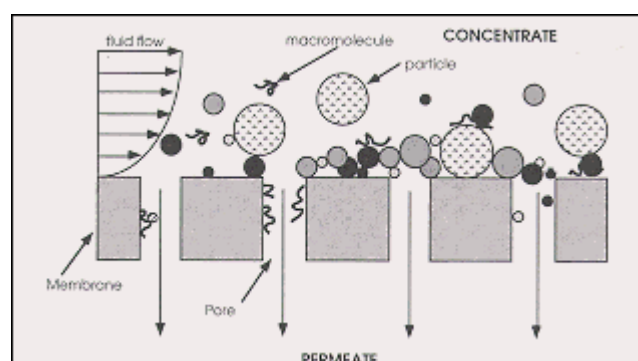
ช่วยให้สารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนที่สะสมเกิดการแพร่กลับไปในพื้นที่ที่อยู่ห่างออกไป (bulk solution) แต่สำหรับกระบวนการเมมเบรนแบบเวเปอร์เพอมีเอชัน CP จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากการป้อนสารละลายผ่านเมมเบรนอยู่ในสถานะไอ



ภาพประกอบ 1.12 การเกิดการสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรน (a) schematics view, (b) The boundary layer

ที่มา: www.idswater.com/Possibleหรือยละ20directions.htm

1.3.6.2 fouling หมายถึง การสะสมหรือการอุดตันของสารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนบนผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งมีผลทำให้ฟลักซ์ลดลงและค่าการแยกเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเกิดการอุดตัน (fouling) จะเพิ่มความต้านทานต่อการไหลของสารละลาย ซึ่งเกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเมมเบรนและสารละลายที่ต้องการแยก สิ่งสะสมและอุดตันจะไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม



ภาพประกอบ 1.13 ลักษณะการอุดตันของสารผ่านเมมเบรน

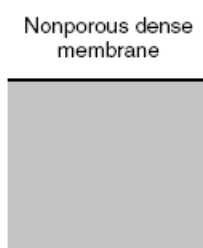
ที่มา : www.watermanagement.tudelft.nl/documents/en/images/fouling_of_membranes

1.3.6.3 ความคงตัวของเมมเบรนที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิเมอร์ จึงมีความคงตัวจำกัด เช่น เมมเบรนชนิดพอลิซัลโฟนสามารถใช้งานในช่วง pH 1-13 ซึ่งใช้งานได้ในช่วงกว้างกว่าเมมเบรนจำพวกเซลลูโลส ซึ่งมีความคงตัวอยู่ในช่วง pH 4-8 และอุณหภูมิก็มีผลต่อเมมเบรน ในปัจจุบันมีการพัฒนาเมมเบรนพอลิเมอร์ที่ทนอุณหภูมิได้สูง 60-100 องศาเซลเซียส เช่นเมมเบรนชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพบว่าเมมเบรนบางชนิดไม่ทนต่อคลอรีนหรือตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนเมมเบรนที่ผลิตจากเซรามิกส์มีความคงตัวต่อสารเคมีและอุณหภูมิดีมาก สามารถฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำได้ ทนต่อจุลินทรีย์ ขณะนี้มีการพัฒนาแต่ก่อนข้างจำกัดและราคาแพง

1.3.7 เมมเบรนสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชัน

เมมเบรนสังเคราะห์ ที่ใช้สำหรับกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันเป็นเมมเบรนแบบเนื้อแน่น (dense membrane) หรือไม่มีรูพรุน (nonporous membrane) มีลักษณะเช่นเดียวกับกระบวนการเมมเบรนแบบออสโมซิสผันกลับและเมมเบรนแบบเพอแวกพอเรชัน มีลักษณะผิวเนื้อแน่นและบาง เป็นเมมเบรนที่มีความหนาแน่นของเนื้อพอลิเมอร์สูง มีช่องว่างในเนื้อพอลิเมอร์น้อย (น้อยกว่าร้อยละ 40) เมมเบรนแบบเนื้อแน่นสามารถแบ่งย่อยตามชนิดของโครงสร้างได้อีก 3 ชนิดย่อยๆ ดังนี้คือ

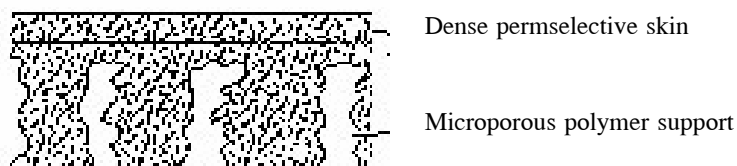
1.3.7.1 เมมเบรนแบบสมมาตร (symmetric or isotropic membrane) เป็นเมมเบรนซึ่งพื้นที่ผิวในสัณฐานวิทยา (morphology) ทุกระนาบมีลักษณะผิวเหมือนกันทุกระนาบ เช่น เนื้อแน่นเหมือนกันทุกระนาบตลอดแนวลึก ดังแสดงในภาพประกอบ 1.14



ภาพประกอบ 1.14 เมมเบรนแบบสมมาตร

ที่มา: Baker, 2004

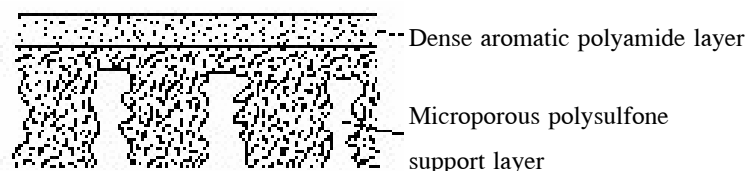
1.3.7.2 เมมเบรนแบบไม่สมมาตร (asymmetric or anisotropic membrane) เป็นเมมเบรนซึ่งพื้นที่ผิวในระนาบมีลักษณะผิวไม่เหมือนกันตลอดแนวลึก แสดงในภาพประกอบ 1.15 อาจมีชั้นผิวและชั้นรองรับเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน แต่มีโครงสร้างของชั้นผิวและชั้นรองรับต่างกันซึ่งอาจเกิดจากกลไกในการผลิต



ภาพประกอบ 1.15 เมมเบรนแบบไม่สมมาตร

ที่มา: Seader and Henley, 1998

1.3.7.3 เมมเบรนเชิงประกอบ (composite membrane) จัดเป็นเมมเบรนชนิดไม่สมมาตร โครงสร้างเมมเบรนประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนบนเป็นชั้นเมมเบรนบาง (active layer) จะเป็นชั้นที่ควบคุมการผ่านของสาร ส่วนชั้นล่างจะเป็นชั้นเสริมหรือชั้นรองรับ (support) มีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นโครงสร้างเสริมความแข็งแรงทางกลของเมมเบรน ดังแสดงในภาพประกอบ 1.16 พอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเป็นชั้นผิวและชั้นรองรับเป็นคนละชนิดกัน การผลิตชั้นผิวส่วนมากอาศัยการเกิดปฏิกิริยาบนชั้นรองรับ เช่น เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์ ความหนาของเมมเบรนทั้งหมดประมาณ 150–200 ไมโครเมตร มีความหนาของชั้นผิวที่บางมากเพียง 100-200 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 1.16 เมมเบรนเชิงประกอบ

ที่มา: Seader and Henley, 1998

ชนิดของเมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรม ต้องการคุณสมบัติการเลือกผ่านที่ดีและอัตราการแพร่ผ่านสูง ดังนั้นในกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันจึงเลือกใช้เมมเบรนแบบไม่สมมาตร และแบบเชิงประกอบเป็นส่วนใหญ่ โดยเลือกให้โครงสร้างมีผิวหนังเป็นแบบเนื้อแน่นบางและไม่มีตำหนิ เพื่อเพิ่มการเลือกผ่านและให้ส่วนล่างเป็นแบบมีรูพรุนและหนาเพื่อเพิ่มอัตราการแพร่ผ่านและเป็นชั้นรองรับ (support) นอกจากนี้เมมเบรนสำหรับกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันยังสามารถแบ่งออก เป็นกลุ่มใหญ่ๆ 2 กลุ่ม ดังนี้คือ เมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic) และเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

ก. เมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic) เป็นเมมเบรนที่เลือกผ่านน้ำมากกว่าสารอินทรีย์ซึ่งมีการพัฒนาจากพอลิเมอร์หลายชนิด ตัวอย่างเมมเบรนที่มีศักยภาพและมีการนำไปใช้งานแล้ว เช่น เมมเบรนชนิด poly (vinyl alcohol) (PVA), polytetrafluoroethylene, crosslinked PVA เมมเบรนเชิงประกอบ PVA/PAN, cellulose acetate, polysulfone ประสิทธิภาพของเมมเบรน hydrophilic บางชนิดที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำ จะเห็นได้ว่าเมมเบรนให้ค่าการแยกสูงแต่ให้ค่าฟลักซ์ต่ำ เมมเบรนที่ให้ค่าการแยกสูง เช่น poly (vinyl alcohol) และ carboxymethylcellulose ปัจจุบันมีความพยายามพัฒนาเมมเบรนแบบ hydrophilic จากพอลิเมอร์ ชนิดใหม่หรือใช้พอลิเมอร์ผสม ตลอดจนใช้วิธีการเชื่อมขวางและการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อให้ได้เมมเบรนที่มีทั้งค่าการแยกและค่าฟลักซ์สูงขึ้น

ข. เมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เมมเบรนชนิดนี้ต้องมีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ เพื่อแยกสารละลายอินทรีย์เจือจางออกจากน้ำหรือทำให้ได้สารอินทรีย์ที่เข้มข้นขึ้น ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรนชนิดนี้ เช่น เมมเบรนชนิด silicone rubber, polydimethylsiloxane (PDMS), polypropylene, polyacrylic acid, polyetheramides, zeolite- filled silicone rubber

1.3.8 วิธีการผลิตเมมเบรนสังเคราะห์แบบเนื้อแน่น

การเตรียมเมมเบรนแบบเนื้อแน่นสามารถผลิตได้หลายวิธี ดังนี้คือ

1.3.8.1 เมมเบรนผลิตจากสารละลายพอลิเมอร์

ซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์และตัวทำละลาย และอาจจะมีสารจำพวกตัวไม่ละลาย (non solvent) สารพองตัว (swelling agent) และสารอื่นๆ นำสารละลายมาทำเป็นแผ่นบางๆ หรือ cast ลงบนแผ่นรองรับแล้วปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยออกจนหมดจนได้เมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่มีช่องว่างน้อยและมีความเป็นผลึกสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนชนิดอื่นๆ ตัวแปรสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติเมมเบรนแบบนี้ คืออัตราการระเหยของตัวทำละลาย (evaporation/desolvation) องค์ประกอบของสารละลายและความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศขณะระเหย

1.3.8.2 เมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์หลอมเหลว

พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก เมื่อหลอมเหลวจะสามารถทำให้มีรูปร่างตามต้องการได้ เมื่อทำให้เย็นตัวเป็นเมมเบรนจะมีรูปร่างที่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ (เช่น แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุล เป็นต้น) และการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวหรือทำให้หลอมเหลว

1.3.8.3 เมมเบรนที่เกิดระหว่างพอลิเมอร์ไรเซชัน

ในขณะที่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งอาจมีการเชื่อมขวางและการเกิดการเคลื่อนย้ายของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ (chain transfer) เกิดขึ้นด้วย มีการทำให้พอลิเมอร์ตกผลึกอย่างช้าๆ และทำให้เป็นแผ่นฟิล์ม อัตราเร็วของปฏิกิริยามีผลต่อโครงสร้างของเมมเบรนถ้าเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันช้าจะได้เมมเบรนเนื้อแน่นหรือมีความเป็นผลึกสูง

1.3.8.4 เมมเบรนแบบบางมาก (ultrathin membrane)

เป็นเมมเบรนแบบแน่นที่มีความหนาระหว่าง 50 - 5,000 Å ข้อดีเมมเบรนแบบนี้คือ มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient) สูงเพราะบางมากการพัฒนาเมมเบรนแบบนี้นำไปสู่การผลิตเมมเบรนแบบไม่สมมาตรซึ่งใช้กันอยู่เป็นส่วนใหญ่ การผลิตเมมเบรนแบบบางมากอาจเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์เจือจาง โดยการจุ่มแผ่นแก้วลงในสารละลาย สารละลายจะเกาะบนแผ่นแก้ว เมื่อแช่ลงในน้ำเมมเบรนจะลอกหลุดออกหรืออาจทำเป็นแผ่นบางบนแผ่นรองรับ

1.3.9 การออกแบบกระบวนการ

รูปแบบหรืออุปกรณ์ของเมมเบรน สำหรับใช้ในการแยกก๊าซส่วนมากเป็นท่อม้วนหรือเส้นใยกลวงเพราะมีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง การออกแบบอุปกรณ์ต้องคำนึงถึงช่วงอัตราการป้อนที่ต้องการใช้งาน การใช้งานที่อัตราการป้อนต่ำกว่าที่ออกแบบไว้จะทำให้การกระจายของก๊าซไม่สม่ำเสมอ ทำให้อัตราการไหลและความบริสุทธิ์ของเพอมีเอทลดลง ที่อัตราการไหลสูงเกินไปก็ทำให้ความดันลดสูง อัตราการป้อนเข้าอุปกรณ์ที่เหมาะสมจึงอาจทำได้โดยการแยกสารป้อนเข้าอุปกรณ์หลายหน่วยต่อขนานกันสำหรับขั้นตอนการแยกนั้นๆ สำหรับการแยกแบบขั้นตอนเดียว (single stage) หลายกรณีการแยกก๊าซแบบขั้นตอนเดียวก็ใช้งานได้เหมาะสม ราคาลงทุนต่ำ แต่ถ้าต้องการผลิตก๊าซที่มีความเข้มข้นสูงต้องใช้พื้นที่มาก สำหรับการแยกแบบหลายขั้นตอน ใช้ในกรณีที่การแยกแบบขั้นตอนเดียวไม่สามารถได้อัตราการแยกกลับคืนตามต้องการ การแก้ปัญหาสามารถใช้การวนกลับ (recycle) และเพิ่มขั้นตอน วิธีนี้จะช่วยเพิ่มการแยกกลับคืนได้อย่างมาก แต่มีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นมา คือ เครื่องอัดและหน่วยอุปกรณ์เมมเบรน ตัวอย่างการออกแบบกระบวนการ แสดงการใช้กระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันร่วมกับกระบวนการกลั่นโดยนำไปแทนที่ขั้นตอนการกลั่นอะซิโโทโรป เป็นต้น

1.3.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhen Huang และคณะ (2006) ศึกษาการนำซีโอไลต์ 4-A มาใช้ในการเตรียมเมมเบรนเชิงประกอบชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สำหรับการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ โดยผสมซีโอไลต์เข้าในเมมเบรนที่มีโครงสร้าง 3 ชั้น คือ ชั้นรองรับ (supporting layer) ทำจากพอลิเอสเตอร์ ชั้นรูพรุน (porous backing layer) ทำจากพอลิอะคริโลไนไทรล์ และชั้นที่เกิดการแยก (active separation layer) ทำจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยทำการศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบสารป้อน อุณหภูมิสารป้อนและปริมาณซีโอไลต์ ต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน จากการทดลองพบว่าค่าการแยกสูงขึ้นเมื่อมีการเติมซีโอไลต์ 4-A ในช่วงความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าร้อยละ 80 สำหรับค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้รับตามสมการของอาร์เนียส พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของน้ำมีค่าลดลงแต่ค่าพลังงานกระตุ้นของเอทานอลมีค่าสูงขึ้นหลังจากมีการผสมซีโอไลต์ 4-A แสดงว่าโมเลกุลของน้ำต้องการพลังงานน้อยกว่าโมเลกุลของเอทานอลในการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน เพราะซีโอไลต์ 4-A มีคุณสมบัติเป็น hydrophilic

Van Baelen และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาของผสมเมทานอล-น้ำ เอทานอล-น้ำ ของผสมไอโซโพรพิล-น้ำ และของผสมกรดอะซิติก-น้ำ โดยใช้เมมเบรนชนิด PERVAP 2201 ผลิตโดยบริษัท Sulzer ของผสมแอลกอฮอล์-น้ำได้มีการศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน จากผลการทดลองพบว่าเอทานอลและไอโซโพรพิลมีพฤติกรรมการซึมผ่านที่คล้ายกัน ขณะที่เมทานอลแสดงการซึมผ่านที่แตกต่างออกไป เนื่องจากเมทานอลมีความเป็นขั้วสูง และเมื่อทำการเปรียบเทียบของผสมไอโซโพรพิล-น้ำกับของผสมกรดอะซิติก-น้ำ พบว่าไอโซโพรพิลและกรดอะซิติกมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากันแตกต่างกันที่หมู่ฟังก์ชัน พบว่าของผสมกรดอะซิติก-น้ำมีค่าฟลักซ์สูงกว่าของผสมไอโซโพรพิล-น้ำ เป็นผลเนื่องจากกรดอะซิติกมีหมู่คาร์บอนิลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแอลกอฮอล์ที่ชั้นผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งทำจากวัสดุชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพบว่าสภาพขั้วและหมู่ฟังก์ชันของแต่ละองค์ประกอบในสารป้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนมากกว่าขนาดโมเลกุล

Zhen Huang และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาเมมเบรนเชิงประกอบชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แบบ 3 ชั้นและมีส่วนผสมของซีโอไลต์รวมอยู่ด้วย ซึ่งในการทดลองได้ทำการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยเมมเบรน 3 ชนิด คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีการปรับแต่ง PERVAP 2211 และ PERVAP 2510 จากการทดลองพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีการปรับแต่งมีค่าการแยกสูงกว่า PERVAP 2211 และ PERVAP 2510 และเมื่อทำการผสมซีโอไลต์ในเมมเบรนทำให้ได้รับทั้งค่าฟลักซ์และค่าการแยกสูงขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากการเติมซีโอไลต์เข้าไปทำให้ลดพลังงานกระตุ้นสำหรับน้ำและเอทานอล โดยเฉพาะค่าพลังงานกระตุ้นของน้ำลดลงเป็น

อย่างมากส่งผลทำให้ค่าการแยกเพิ่มสูงขึ้น สำหรับผลของอุณหภูมิอธิบายตามสมการของอาร์เนียส ดังสมการ (3.2) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ค่าฟลักซ์สูงขึ้นด้วย

Masakazu Kondo และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษากระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชัน สำหรับเมมเบรนซีโอไลต์ Na-A เพื่อแยกแอลกอฮอล์-น้ำ พบว่าเมมเบรนแสดงประสิทธิภาพในการแยกที่สูงมากสำหรับสารละลายอินทรีย์-น้ำในกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชัน ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสารป้อนทำให้ได้รับทั้งค่าฟลักซ์และค่าการแยกสูงขึ้น ค่าฟลักซ์ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ 2.6 4.3 และ 5.6 กิโลกรัม*เมตร⁻²*ชั่วโมง⁻¹ และค่าการแยกเท่ากับ 4000 5600 และ 6000 สำหรับสารละลายเมทานอล-น้ำ สารละลายเอทานอล-น้ำ และสารละลายไอโซโพรพิล-น้ำ ตามลำดับ

Jalal Jafar และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษากระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชัน โดยนำเมมเบรนท่อม้วนชนิด NaA ที่มีคาร์บอน/เซอร์โคเนียเป็นวัสดุที่ขึ้นรองรับ (support) มาใช้ในการแยกน้ำออกจากไอโซโพรพานอลและแยกน้ำออกจากของผสมเอทานอล-น้ำ โดยทำการศึกษาในถึงปฏิกรณ์แบบไม่ต่อเนื่องและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำในสารป้อนและเวลาในการทดลองต่อค่าการแยกและฟลักซ์ พบว่าผลการทดลองของค่าฟลักซ์และค่าการแยกที่ได้รับที่แต่ละความเข้มข้นน้ำในสารป้อนพบว่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในแต่ละชั่วโมง และพบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนสูงขึ้นทำให้ฟลักซ์สูงขึ้นแต่ค่าการแยกลดลง

Shu-Chin Fan และคณะ (2002) ได้ทำการทดลองพอลิอิมิดแบบวงแหวน 3 ชนิด โดยใช้ direct polycondensation of bis[4-(4-aminophenoxy)phenyl] diphenyl methane (BAPDM) กับวงแหวนทั้ง 3 ชนิด คือ terephthalic acid (TPAc), 5-tert-butylisophthalic acid (TBPAc) และ 4,4-hexafluoroisopropylidenedibenzoic acid (6FDAc) จากการทดลองพบว่า BAPDM-TPAc มีปริมาณจำเพาะต่ำที่สุด (ความหนาแน่นสูงสุด) ส่งผลให้มีการบวมน้ำและฟลักซ์ต่ำที่สุดแต่ให้ค่าการแยกสูงที่สุด และพบว่า BAPDM-6FDAc มีปริมาณจำเพาะสูงที่สุด (ความหนาแน่นต่ำสุด) ส่งผลให้มีการบวมน้ำและฟลักซ์สูงที่สุดแต่ให้ค่าการแยกต่ำที่สุด สำหรับกระบวนการแยกโดยวิธีเวเปอร์เพอมีเอชัน

Tsai และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาพอลิซัลโฟนเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงมาใช้ในการกระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันสำหรับการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ โดยในขั้นตอนการเตรียมทำการผสมพอลิซัลโฟนในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าเมมเบรนเส้นใยกลวงที่เตรียมจากพอลิซัลโฟนร้อยละ 23 ได้รับประสิทธิภาพในกระบวนการแยกดีที่สุด คือ ค่าฟลักซ์มีค่าเท่ากับ 75.6 กรัม*เมตร⁻²*ชั่วโมง⁻¹ และค่าการแยกเท่ากับ 54.3

Yonglie Wu และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษากระบวนการเวเปอร์เพอมีเอชันโดยใช้พอลิอิมิดเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง ในกระบวนการแยกทำการศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆ

ดังนั้น การปรับปรุงโครงสร้างเมมเบรน ความเร็วของ sweeping air อุณหภูมิในการทดลองและความเข้มข้นของเอทานอลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างเมมเบรน การเพิ่มความเร็วของ sweeping air และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทดลอง ส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์และค่าการแยกเพิ่มสูงขึ้น และสำหรับผลของความเข้มข้นของเอทานอล ทำให้ได้รับค่าการแยกสูงสุดที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 90 สำหรับทุกๆ อุณหภูมิ แต่เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงอย่างต่อเนื่อง

Hidetoshi Kita และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาซีโอไลต์ NaX และ NaY โดยมีการเตรียมเมมเบรนไว้บนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรูพรุนทรงกระบอกบนชั้นรองรับที่ทำจากเซรามิกส์ พบว่าซีโอไลต์ NaX และ NaY แสดงประสิทธิภาพในการแยกสูงในหลายๆ ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเอทานอลและเอทานอล เช่น สำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำที่ความเข้มข้นในสารป้อนเอทานอลร้อยละ 90 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส พบว่า มีค่าฟลักซ์ 1.91 และ 1.59 กิโลกรัม*เมตร⁻²*ชั่วโมง⁻¹ และมีค่าการแยก 170 และ 130 สำหรับซีโอไลต์ NaX และ NaY ตามลำดับ แต่ยังคงพบว่าประสิทธิภาพในการแยกทั้งฟลักซ์และค่าการแยกต่ำกว่า ซีโอไลต์ NaA

Masakazu Kondo และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาเมมเบรนชนิดซีโอไลต์ NaA โดยมีการเตรียมไว้บนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรูพรุนแบบท่อม้วน ซึ่งเมมเบรนประกอบด้วย 3 ชั้น คือ ชั้นผิวหน้าของซีโอไลต์ ชั้นกลางและชั้นรองรับทำจาก mullite และมีส่วนผสมของอะลูมินาในอัตราส่วนต่างๆ โดยเมมเบรนแบบท่อม้วนประกอบรวมกันอยู่ทั้งหมด 19 ชั้นและมีพื้นที่ในการกรอง 0.5 ตารางเมตร จากการทดลองพบว่าสภาพการซึมผ่านเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณอะลูมินาในช่วงสูงกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ค่าฟลักซ์เท่ากับ 2.35 กิโลกรัม*เมตร⁻² *ชั่วโมง⁻¹ และค่าการแยกมีค่าสูงกว่า 5000 ที่ความเข้มข้น เอทานอลร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษากระบวนการแยกน้ำออกจากเอทานอลโดยวิธีเวเปอร์เพอมีเอชัน
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากเอทานอล เพื่อให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ด้วยเมมเบรนชนิดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยวิธีเวเปอร์เพอมีเอชัน
3. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำความรู้เกี่ยวกับกระบวนการและวิธีการแยกเอทานอลออกจากน้ำโดยวิธีเวเปอร์เพอมีเอชันที่ได้ทำการวิจัยไปประยุกต์ใช้ทั้งในเชิงอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์