

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอทานอล (Ethanol)

เอทานอล (C_2H_5OH) จัดเป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง ที่สามารถผลิตได้โดยใช้กระบวนการหมักวัตถุดิบทางการเกษตร ซึ่งวัตถุดิบหลักที่ใช้ผลิตเอทานอล สามารถจัดจำแนกออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. วัตถุดิบประเภทแป้ง ได้แก่ ผลผลิตทางการเกษตรพวกธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ ข้าวฟ่าง และพวกพืชหัว เช่น มันสำปะหลัง มันฝรั่ง มันเทศ เป็นต้น

2. วัตถุดิบประเภทน้ำตาล ได้แก่ อ้อย กากน้ำตาล รากหัวบีท (Beet root) ข้าวฟ่างหวาน เป็นต้น

3. วัตถุดิบประเภทเส้นใย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากผลผลิตทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด ไร่ข้าว เศษไม้ เศษกระดาด ขี้เลื่อย วัชพืช รวมทั้งของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน เป็นต้น

เอทานอลสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น สามารถผลิตเป็นเครื่องดื่ม เช่น เหล้า ไวน์ และเบียร์ ใช้ในอุตสาหกรรมยา ใช้เป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เช่น สี แล็กเกอร์ ยาเคลือบน้ำมันและซีเมนต์ (ครีมขัดรองเท้า) เรซิน ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์สารเคมีและชีวเคมี ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ใช้เป็นอาหาร เช่น น้ำส้มสายชู เกลาติน ใช้ทางการแพทย์ เช่น ใช้เช็ดแผล ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้เป็นรีเอเจนต์ (Reagent) ในห้องปฏิบัติการและอื่นๆ เป็นต้น (คณะกรรมการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร, 2545)

2.1.1 กระบวนการผลิตเอทานอล

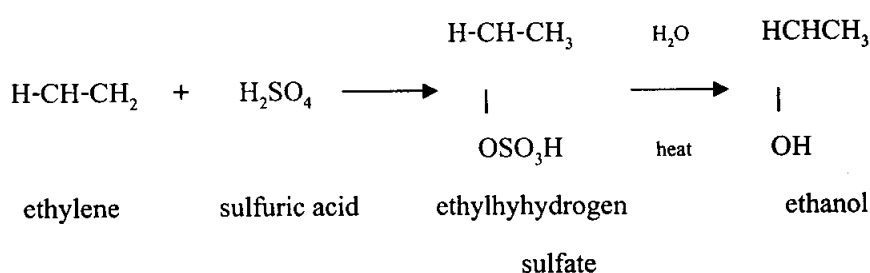
การผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- 1) การผลิตเอทานอลทางเคมี
- 2) การผลิตเอทานอลทางชีวภาพ

1) การผลิตเอทานอลทางเคมี

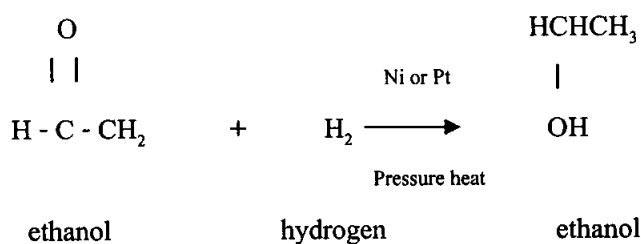
ปฏิกิริยาทางเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เอทานอล มีดังนี้

1.1) การสังเคราะห์เอทานอลจากปฏิกิริยาการเติมน้ำให้กับเอทิลีน (ethylene) โดยเป็นการไฮเดรชันเอทิลีนด้วยกรดซัลฟิวริก ผลผลิตที่เกิดขึ้นคือ เอทิลไฮโดรเจนซัลเฟต ซึ่งเมื่อนำไปไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำร้อนจะได้เอทานอลเกิดขึ้น ดังสมการ

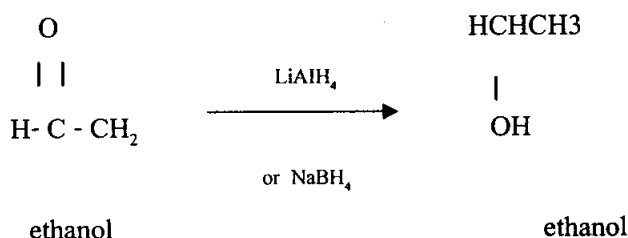


1.2) การสังเคราะห์เอทานอลโดยการเติมไฮโดรเจนให้กับอัลดีไฮด์

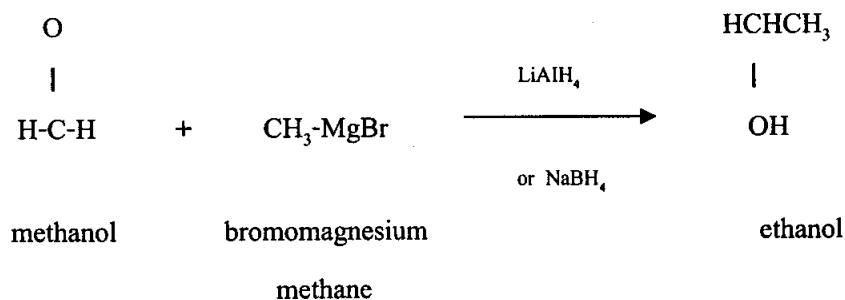
การสังเคราะห์โดยวิธีนี้ปฏิกิริยาจะเกิดได้ที่ความร้อนและความดันสูง โดยการเติมไฮโดรเจนลงไปในอัลดีไฮด์และนิกเกิล (Nickel) และแพลทตินัม (platinum) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เกิดเป็นเอทานอล



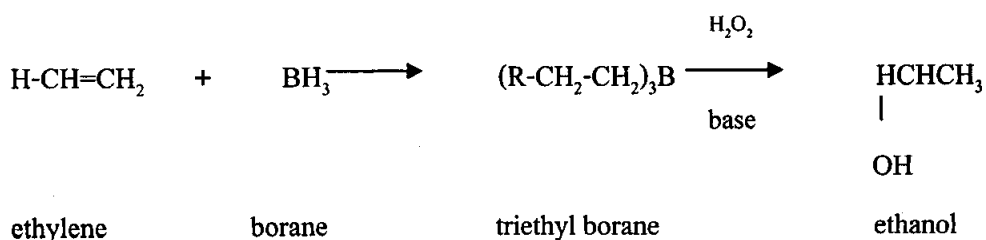
1.3) การสังเคราะห์เอทานอลจากปฏิกิริยารีดักชันของเอทานอลด้วยไฮไดรต์ โดยใช้ลิเทียมอะลูมิเนียมไฮไดรต์ LiAlH_4 หรือ โซเดียมโบโรไฮไดรต์ NaBH_4 เป็นตัวรีดิวซ์(reducing agent)



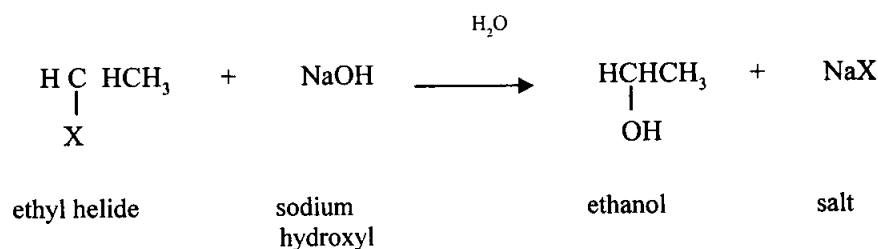
1.4) การสังเคราะห์เอทานอลจากปฏิกิริยาระหว่างเอทานอลกับกรีนาร์รีเอเจนต์ กรีนาร์รีเอเจนต์เกิดจากอัลคิลเฮไลด์ ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมใน anhydrous diethylether จะได้อัลคิลแมกนีเซียมเฮไลด์ (alkylmagnesium halide) ซึ่งเป็นกรีนาร์รีเอเจนต์ โดยอัลคิลแมกนีเซียมเฮไลด์ ทำปฏิกิริยากับเมทานอลจะได้เอทานอล



1.5) การสังเคราะห์เอทานอลจากปฏิกิริยาไฮโดรโบเรชันของเอทิลีน (Ethylene) เป็นปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีนกับไฮไดรต์ของโบรอน เรียกว่า โบเรน (BH_3) ได้สารประกอบ 3 ไตรอัลคิลโบรอน เมื่อนำไปออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์จะได้เอทานอล



1.6) การสังเคราะห์เอทานอลจากการไฮโดรไลซิสเอทิลเฮไลด์
(Ethyl helide; $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{X}$) เกิดปฏิกิริยาในสถานะที่เป็นต่าง



ข้อดีและข้อเสียของการสังเคราะห์เอทานอลด้วยวิธีทางเคมี

1) ข้อดี

- ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างรวดเร็วและให้ความถูกต้องที่สามารถคำนวณได้อย่างใกล้เคียงหรือแน่นอน
- ผลิตรัตที่ได้อาจมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูงภายหลังการเกิดปฏิกิริยา
- มีปฏิกิริยาในการสังเคราะห์เอทานอลค่อนข้างหลากหลายวิธี
- ใช้การดูแลเอาใจใส่น้อยกว่าเหมือนการหมักเอทานอลด้วยจุลินทรีย์ที่ต้องรักษาสภาพในระหว่างกระบวนการหมักให้เหมาะสม

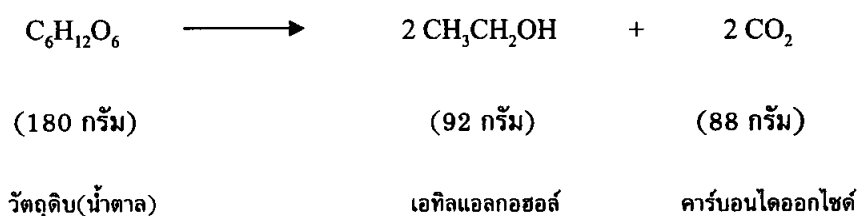
2) ข้อเสีย

- ต้องใช้สารเคมีที่จำเพาะมากเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์เอทานอล และสารเคมีที่จำเพาะนั้นมีราคาค่อนข้างสูงกว่าวัตถุดิบที่เหลือทิ้งทางการเกษตร
- สภาพของการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างสูงและมีความจำเพาะ
- ผลิตรัตเอทานอลที่ได้อาจมีสารเคมีตัวอื่น ๆ ปะปนในมาระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งสารเหล่านั้นมีความเป็นอันตราย ดังนั้นกฎหมายจึงไม่อนุญาตให้ใช้เอทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไปใช้รับประทานหรือใช้กับสิ่งมีชีวิตภายในร่างกาย (พรเทพ ถนนแก้ว และคณะ, 2547)

2) การผลิตเอทานอลทางชีวภาพ

การผลิตเอทานอลโดยกระบวนการทางชีวภาพ เป็นกระบวนการที่ใช้จุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติในการใช้คาร์โบไฮเดรตในการเจริญแล้วผลิตเอทานอลเป็นผลิตภัณฑ์ โดยในทางทฤษฎี จากกระบวนการหมักโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ เมื่อน้ำตาลถูกใช้โดยยีสต์ น้ำตาลจะถูก

นำเข้าสู่เซลล์ แล้วถูกย่อยสลายทางวิถีไกลโคไลซิส (glycolysis pathway) หรือผ่านวิถี Embden-Meyerhof-Parnas (EMP) โดยไม่มีการใช้ออกซิเจนในปฏิกิริยาแล้วให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นกรดไพรูวิก (pyruvic) 2 โมเลกุล ซึ่งกรดไพรูวิกนี้ถูกใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมเพื่อเป็นสารตั้งต้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอทานอลได้นั้นมักต้องการสภาวะที่เหมาะสมเฉพาะต่อตัวจุลินทรีย์ชนิดนั้น ๆ โดยในยีสต์และแบคทีเรียบางชนิด สามารถเปลี่ยนกรดไพรูวิกเป็นเอทานอลได้ ซึ่งต้องมีการคัดเลือกสายพันธุ์และควบคุมสภาวะให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ไม่ต้องการ ทางทฤษฎีน้ำตาลกลูโคสสามารถเปลี่ยนเป็นเอทานอลได้ 51 เปอร์เซ็นต์ (กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคสที่ใช้) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 49 เปอร์เซ็นต์ (กรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมกลูโคสที่ใช้) และรายงานของ Gay-Lussac ในปี 1810 ได้ศึกษาการหมักน้ำตาลโดยคำนวณจากสมการเคมีการเกิดเอทิลแอลกอฮอล์ (ชาชีว์ฌน์ เฌลิมศรี และคณะ 2545) ดังต่อไปนี้



ในการหมักเพื่อผลิตเอทานอลจากกลูโคส กลูโคส 1 กรัมจะให้เอทิลแอลกอฮอล์ 0.511 กรัม และคาร์บอนไดออกไซด์ 0.489 กรัม นั่นคือมีค่าผลผลิตทางทฤษฎีสำหรับการผลิตเอทานอล หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ เท่ากับ 51.1 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากบางส่วนของน้ำตาลถูกยีสต์ใช้เพื่อการเจริญ และบางส่วนถูกเปลี่ยนเป็นผลผลิตพลอยได้บางชนิด เช่น กลีเซอรอล (glycerol) กรดซัคซินิก (succinic acid) และ fuel oil ทำให้ปริมาณเอทานอลที่ได้ต่ำกว่าผลผลิตทางทฤษฎีเสมอ ในทางปฏิบัติเอทานอลที่ได้อยู่ในช่วงไม่เกิน 90-95 เปอร์เซ็นต์ของผลทางทฤษฎี โดยผลพลอยได้ที่สร้างขึ้นจากการใช้ซับสเตรทมี 4-5 เปอร์เซ็นต์ และสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการสร้างผลพลอยได้เหล่านั้น ทำให้ได้เอทานอลเพิ่มขึ้น 2.7 เปอร์เซ็นต์ (ชาชีว์ฌน์ เฌลิมศรี และคณะ, 2545)

ข้อดีและข้อเสียของการผลิตเอทานอลทางชีวภาพ

1) ข้อดี

- วัตถุดิบที่ใช้มักเป็นผลผลิตทางการเกษตรซึ่งมีอยู่หลากหลายและมีราคาต่ำ
- สามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่พืชผลทางการเกษตร ทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้น
- ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้ในการทำน้ำแข็งแห้ง น้ำโซดา หรือสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเคมี

2) ข้อเสีย

- เป็นกระบวนการผลิตเอทานอลที่ค่อนข้างช้า
- ใช้คนงานมากในกระบวนการผลิตเพื่อดูแลระบบ ทำให้เกิดค่าใช้จ่าย ต้องให้ความสนใจใส่และคอยติดตามดูแลกระบวนการผลิตอย่างใกล้ชิด ตั้งแต่ต้นกระบวนการถึงกระบวนการสุดท้ายของการผลิต
- ในการผลิตที่ต้องการปริมาณเอทานอลมาก ๆ จำเป็นต้องใช้ขนาดของระบบที่ใหญ่ขึ้น (พรเทพ ถนนแก้ว และคณะ, 2547)

2.1.2 ข้าวฟ่างหวาน

ข้าวฟ่างหวาน (Sweet sorghum) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Sorghum bicolor* L. เป็นพืชที่ใช้ประโยชน์จากน้ำที่คั้นได้จากลำต้นเป็นหลัก มีรสชาติหวานคล้ายอ้อย แต่ในขณะเดียวกันก็ใช้ประโยชน์จากเมล็ดได้ด้วย ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนพลังงานน้ำมันมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีนักวิชาการสนใจพืชผลทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง และข้าวฟ่างหวาน เป็นต้น เพื่อนำมาผลิตแอลกอฮอล์ โดยเฉพาะข้าวฟ่างหวาน เนื่องจากข้าวฟ่างหวานเป็นพืชที่ปรับตัวได้ดี ทนทานต่อความแห้งแล้ง ทนน้ำท่วมขัง ทนดินเค็ม และทนดินต่าง (Dajue, 1997) สามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตดีกว่าอ้อยและยังมีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นเพียงระยะ 3-4 เดือน ในขณะที่อ้อยต้องใช้เวลานานถึง 1 ปีเต็ม น้ำคั้นของข้าวฟ่างหวานมีความหวานอยู่ระหว่าง 15-24 องศาบริกซ์ ข้าวฟ่างหวานอาจแบ่งตามองค์ประกอบของน้ำตาลได้เป็น 2 ชนิด คือ ซูโครส (sucrose type) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลซูโครสเป็นส่วนใหญ่และนิยมนำไปผลิตเป็นน้ำตาลทรายอีกชนิดหนึ่ง คือ ไซรัป (syrup type) มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบ จึงไม่ตกผลึก นิยมนำไปทำน้ำเชื่อม เมื่อนำน้ำคั้นข้าวฟ่างหวานมาหมักด้วยเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่สภาวะควบคุมคือ ที่ความเป็นกรดต่าง (pH) 5.0 อุณหภูมิ 30

องศาเซลเซียส ปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และที่ความเข้มข้นของน้ำคั้น เริ่มต้นที่ 21 องศาเซลเซียส ปริมาณแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อให้เป็น แหล่งไนโตรเจน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมนี้สามารถผลิตเอทานอลได้ 10.93 เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร (ประสิทธิ์ ใจศิล และคณะ, 2549 และ วิจิต พิมพ์สวัสดิ์, 2545)



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของต้นข้าวฟ่างหวาน

ดังที่กล่าวมาข้างต้น เอทานอลที่ได้จากการผลิตเอทานอลทางชีวภาพจะมีความเข้มข้น ประมาณร้อยละ 8-12 โดยปริมาตร ซึ่งวิธีในปัจจุบันที่ใช้ในการทำให้เอทานอลมีความเข้มข้น สูงขึ้นนั้นจะต้องนำมาแยกเอทานอลออกโดยใช้กระบวนการกลั่นลำดับส่วน ซึ่งสามารถแยก เอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 95 โดยปริมาตร จากนั้นจึงเข้าสู่กรรมวิธีในการแยก น้ำโดยใช้กระบวนการแยกแบบโมเลกูลาร์ซีฟ ที่มีการผ่านเอทานอลที่ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 เข้าไปในหลอดดูดซับที่บรรจุตัวดูดซับประเภทซีโอไลต์ (Zeolite absorber) โมเลกุลของเอทานอลจะ ไหลผ่านช่องว่างของซีโอไลต์ออกไปได้ แต่โมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับไว้ ทำให้เอทานอลที่ไหล ออกไปมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 ส่วนซีโอไลต์ที่ดูดซับน้ำไว้จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่หรือการทำ รีเจนเนอเรต (Regenerate) โดยการไล่น้ำออก ซึ่งวิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบมีราคาสูง มาก (คณะกรรมการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร, 2545) เมื่อเทียบกับการแยกหรือทำให้ เอทานอลเข้มข้นหรือบริสุทธิ์ด้วยวิธีการแยกด้วยวิธีเมมเบรน ซึ่งเป็นวิธีการที่กำลังได้รับความนิยม อย่างกว้างขวางทั้งทางด้านการค้นคว้าวิจัย และมีการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมหลายๆ อย่าง เช่น โรงงานอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม อุตสาหกรรมเคมี การบำบัดน้ำเสีย แก๊สชีวภาพ ฯลฯ

รวมถึงการนำมาใช้เพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล (Brüschke, 1995) เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายใช้พลังงานต่ำและเครื่องมือที่ใช้ไม่ซับซ้อนและราคาไม่สูงนัก ซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป

2.2 เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane Technology)

เทคโนโลยีเมมเบรน เป็นวิธีการแยกสารระหว่าง 2 วัฏภาค (Phase) ที่อาศัยตัวกลางการแยกหรือเรียกว่า แผ่นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-permeable) หรือแผ่นเมมเบรน (membrane) เมมเบรนมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ สังเคราะห์ขึ้นจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เมมเบรนที่สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์ เช่น อลูมิเนียม ไททาเนียม และเซอโคเรเนียม เป็นต้น จะมีความต้านทานต่อความดันและการกัดกร่อนจากความเป็นกรดต่างจากสารเคมี โดยเฉพาะการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน แต่มีความยุ่งยากและราคาแพงกว่าเมมเบรนที่ทำจากสารอินทรีย์ซึ่งจะมีความยืดหยุ่นดีกว่าและสามารถใส่ไว้ในระบบที่มีเนื้อที่จำกัด ซึ่งจะได้พื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก (ชั้นทอง สุนทรภา, 2547)

2.2.1 ประเภทของเมมเบรน

ปัจจุบันได้มีการผลิตเมมเบรนขึ้นมาหลายชนิด เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งานประเภทต่าง ๆ โดยเราสามารถแบ่งประเภทของเมมเบรนได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ (ชั้นทอง สุนทรภา, 2547) ซึ่งได้แก่

2.2.1.1 Isotropic Membranes เป็นเมมเบรนที่มีโครงสร้างและสมมาตร (symmetric structure) สมมาตร สามารถแบ่งย่อยออกได้อีก 3 ชนิด ได้แก่

1) **Microporous Membranes** เมมเบรนประเภทนี้จะมีรูพรุนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น เป็นการแยกสารโดยอาศัยการกรองติดค้างเช่นเดียวกับการกรองด้วยทราย แต่รูพรุนมีขนาดเล็กกว่าเม็ดทรายมากกล่าวคือ จะอยู่ที่ 0.01 – 10 ไมครอน กลไกหลักในการทำงาน คือ การกรองดักสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวเมมเบรน ซึ่งเมมเบรนชนิดนี้ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration)

2) Noporous Dense Membranes เป็นเมมเบรนที่เนื้อแน่นไม่มีรูพรุน เป็นการแยกสารด้วยการแพร่ผ่านมีกลไกหลักคือการอาศัยความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรน ของสารละลาย 2 ชนิดที่อยู่แต่ละด้านของเมมเบรน เมมเบรนประเภทนี้จะมีความแน่นสูงได้แก่ กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) เมมเบรนสำหรับแยกแก๊สและเมมเบรนเพอร์แวกเพอเรชัน

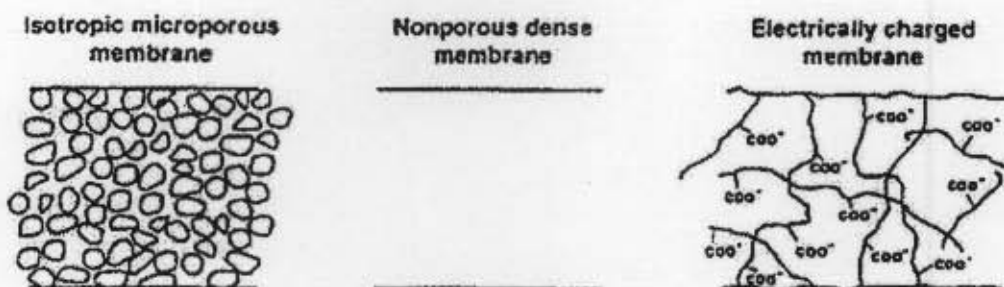
3) Electrically Charge Membranes เมมเบรนประเภทนี้อาจจะมีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุนก็ได้ แต่โดยทั่วไปจะมีรูพรุนขนาดเล็กมาก โดยที่ผนังของรูพรุนจะมีไอออนที่มีประจุลบ (anion) หรือประจุบวก (cation) ติดแน่นอยู่ เมมเบรนที่มีประจุบวกติดอยู่เรียกว่า Anion exchange membranes เพราะว่าไอออนลบในน้ำจะเข้ามาจับ ส่วนเมมเบรนที่มีประจุลบติดอยู่เรียกว่า Cation exchange membrane การแยกสารจะต้องอาศัยความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน และขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดประจุของไอออนที่อยู่ในน้ำเป็นหลัก โดยจะใช้ในการกำจัดไอออนเป็นหลัก เมมเบรนประเภทนี้ได้แก่ อิเล็กโตรไดอะไลซิส

2.2.1.2 Anisotropic Membranes

เป็นเมมเบรนที่สังเคราะห์ขึ้น โดยมีโครงสร้างหรือการจัดเรียงตัวหรือความหนาของชั้นเมมเบรน เป็นแบบอสมมาตร (Asymmetric membrane) และแบ่งย่อยออกได้อีก 3 ชนิดได้แก่

1. Loeb-Sourirayer membrane
2. Thin-Film Composite (TFC)
3. Supported liquid membrane

Isotropic membranes



Anisotropic membranes

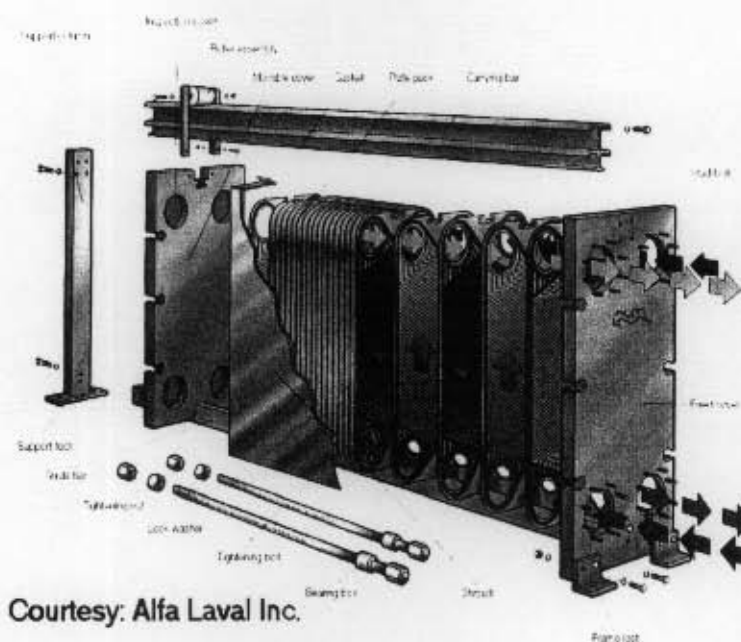


ภาพที่ 2.2 การแบ่งประเภทของเมมเบรนตามโครงสร้างของเมมเบรน (Baker, 2000)

2.3 โมดูลของเมมเบรน (Membrane modules)

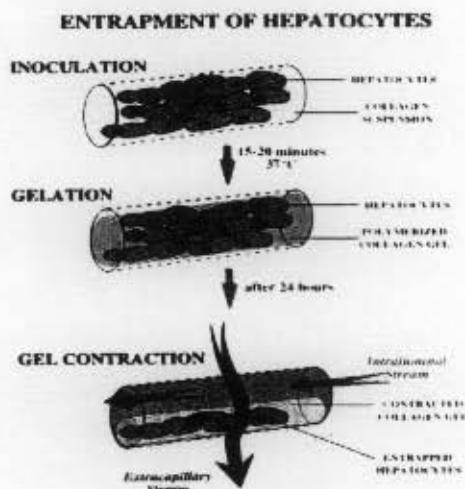
โมดูล เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบเมมเบรน ทั้งนี้เพราะจะเป็นส่วนโครงสร้างที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เมมเบรนที่มีความบางมาก เกิดความเสียหายจากอิทธิพลต่างๆ ในระหว่างเดินระบบเมมเบรน เช่น แรงดัน ความเร็วในการไหลของสารผ่านเมมเบรน เป็นต้น โดยทั่วไปโมดูลของเมมเบรนที่มีการใช้กันอยู่มี 4 ประเภท (ชันทอง สุนทราภา, 2547) คือ

1. แบบแผ่นและกรอบอัด (Plate and frame) เมมเบรนที่ใช้กับโมดูลชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่น โดยจะวางเมมเบรนบนฐานรองรับที่มีรูพรุน (Porous support plate) อีกชั้นหนึ่ง การเปลี่ยนเมมเบรนแผ่นใหม่สามารถทำได้ง่ายกว่าในโมดูลชนิดอื่นๆ



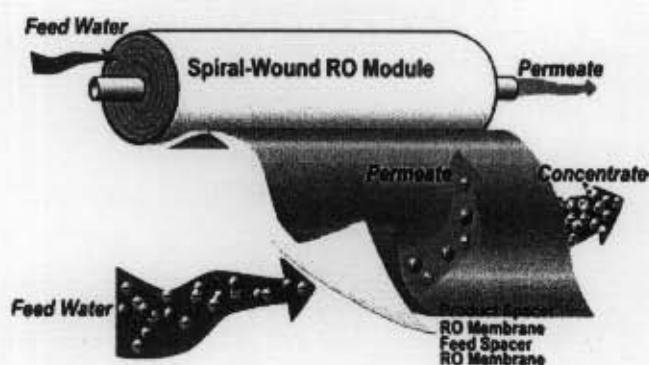
ภาพที่ 2.3 โมดูลของเมมเบรนแบบแผ่นและแบบกรอบอัด (Haslego, 2008)

2. แบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber) จะใช้เส้นใยพอลิเมอร์จำนวนหลายพันเส้นที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 50-100 ไมครอน โดยใช้เส้นใยที่มีชั้นคัดเลือก (Selective layer) อยู่ทางด้านนอก และที่ปลายด้านอิสระของเส้นใยถูกยึดอยู่ด้วยอีพอกซี เพื่อให้ส่วนที่สามารถผ่านเมมเบรนเส้นใยไหลผ่านช่องว่างในเส้นใยไปยังปลายเปิดที่ยึดติดกันด้วยอีพอกซี เพื่อไหลออกสู่โมดูล และส่วนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนเส้นใยนี้จะไหลเลียบตามผนังด้านนอกของเส้นใยไปยังปลายด้านตรงข้าม ซึ่งโมดูลแบบเส้นใยกลวงนี้มีความหนาแน่นการบรรจุ (Packing density) สูงมาก



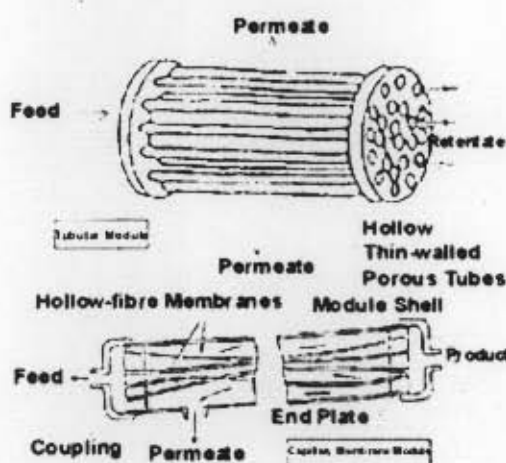
ภาพที่ 2.4 โมดูลของเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (Soucy, 2008)

3. แบบท่อม้วน (Spiral wound) มีลักษณะเป็นการม้วนแผ่นเมมเบรนรอบท่อเจาะรู โดยการป้อนสารในทิศทางตามแนวแกนส่วนที่สามารถผ่านเมมเบรนไปได้จะไหลรวมกันออกจาก โมดูลทางท่อเจาะรู สำหรับ Feed channel spacer และ Permeate channel มีบทบาทเพื่อทำให้เกิด การกระจายสารป้อนอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวของเมมเบรนและเพื่อนำเพอร์มิเอต (Permeate) ให้ไหลไปยังท่อเจาะรูที่อยู่ตรงกลาง



ภาพที่ 2.5 โมดูลของเมมเบรนแบบท่อม้วน (Perth Seawater Desalination Plant, Seawater Reverse Osmosis (SWRO), 2008)

4. แบบท่อ (Tubular) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเมมเบรนแบบท่อโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1-2.5 เซนติเมตร และโดยปกติในโมดูลแบบท่อหนึ่ง ๆ จะประกอบด้วยเมมเบรนแบบท่อจำนวน 10-30 แท่ง รวมอยู่ด้วยกันในท่อขนาดใหญ่ เพอร์มิเอตจากเมมเบรนแบบท่อแต่ละแท่งไหลรวมกันอยู่ในท่อขนาดใหญ่ด้านนอกก่อนออกจากโมดูลดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 โมดูลของเมมเบรนแบบท่อ (What is a Membrane, 2008)

2.4 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation process)

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนเป็นเทคโนโลยีที่สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นขึ้นและบริสุทธิ์ได้พร้อม ๆ กัน รวมทั้งมีจุดเด่นในแง่ของการใช้พลังงานต่ำและสามารถใช้ในการแยกสารผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียสมบัติหรือสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน (ชนทอง สุนทรภา, 2547) ซึ่งการจัดแบ่งประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนอาจแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่มีดังนี้

2.4.1 กระบวนการเมมเบรนในชุดแรก (First generation membrane processes)

แบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการหลัก ๆ ดังนี้

- 1) กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration process)
- 2) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration process)
- 3) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis process)
- 4) กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration process)

2.4.2 กระบวนการเมมเบรนในยุคที่สอง (Second generation membrane processes)

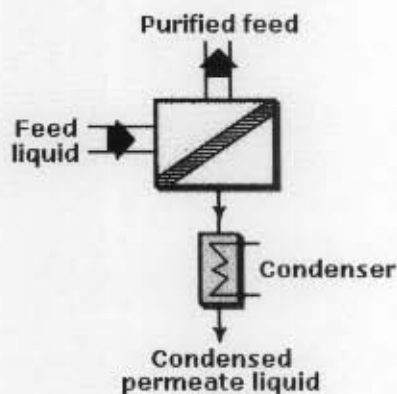
เป็นระบบเมมเบรนที่มีความซับซ้อนขึ้นทั้งในแง่ของเมมเบรน การออกแบบระบบ รวมถึงในแง่การเดินระบบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการหลักได้ดังนี้

- 1) กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน (Pervaporation process)
- 2) กระบวนการเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange membrane process)
- 3) กระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน (Gas separation membrane process)
- 4) ถังปฏิกรณ์เมมเบรน (Membrane reactor)

ในที่นี้ขอกล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะกระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ ในกระบวนการเมมเบรนยุคแรก ๆ กระบวนการนี้ยังมีการพัฒนาเมมเบรนให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงอย่างต่อเนื่อง

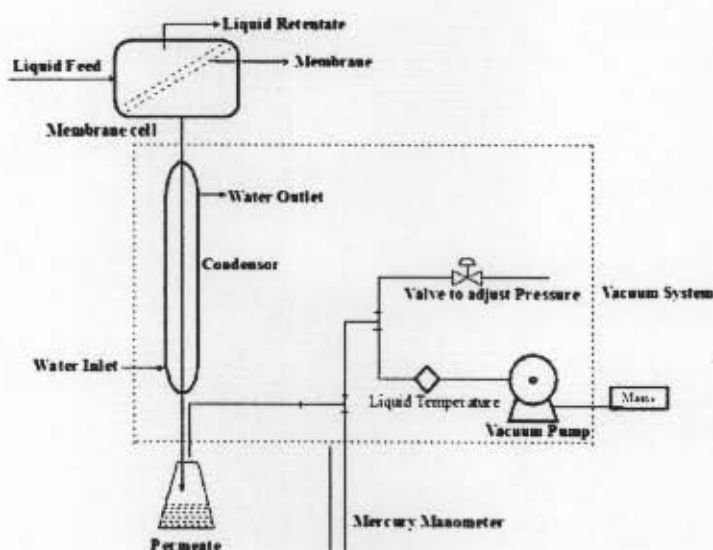
2.4.2.1 กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน (Pervaporation process: PV)

กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชันจัดเป็นกระบวนการเมมเบรนขั้นสูง กระบวนการหนึ่งที่มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการแยกของเหลวผสม (Mixture) ที่มีคุณสมบัติบางประการใกล้เคียงกันมาก เช่น อลูมิเนียม โดยของเหลวผสมจะป้อนเข้าทางด้านป้อน (Upstream) และเพอร์มิเอต (Permeate) จะผ่านออกอีกทางด้านหนึ่งของเมมเบรนในรูปของไอ มีการควบคุมความดันไอ (Vapor pressure) ด้านเพอร์มิเอต ให้ต่ำโดยใช้สุญญากาศ (Vacuum pump) หรือใช้แก๊สเฉื่อย (Inert gas) เป็นตัวพาเพอร์มิเอตออกไป เฟสของเพอร์มิเอตจะถูกเปลี่ยนเป็นไอลด้วยความร้อน ซึ่งการถ่ายโอนมวลผ่านเมมเบรนทางด้านที่เป็นของเหลว (Liquid phase) มีความเข้มข้นเป็นแรงขับ (Driving force) ส่วนการถ่ายโอนมวลผ่านเมมเบรนทางด้านที่เป็นแก๊ส (Gas phase) จะเกิดขึ้นโดยการควบคุมความดันไอด้านเพอร์มิเอตให้ต่ำกว่าความดันด้านของเหลวผสม ดังแสดงตามภาพที่ 2.7 แสดงหลักการและองค์ประกอบของระบบเพอร์เวปอเรชันต่อไปนี้



ภาพที่ 2.7 กระบวนการเมมเบรนเพอร์แวกพอเรชัน (Membrane Technology and Research, 2007)

ในขณะที่ภาพที่ 2.8 เป็นการแสดงการประกอบระบบเพอร์แวกพอเรชัน ในระดับห้องปฏิบัติการโดยมีระบบควบแน่น (condenser) ในการเก็บรวบรวมของผสม ในรูปของของเหลว ถูกเปลี่ยนสถานะเป็นไอเมื่อผ่านเมมเบรนมา โดยการควบคุมความดันเป็นสุญญากาศ หรือทำให้ความดันบรรยากาศต่ำที่สุดเพื่อเปลี่ยนสารเพอร์มิเอตในรูปไอให้กลับเป็นของเหลวต่อไป



ภาพที่ 2.8 แสดงองค์ประกอบของกระบวนการเมมเบรนเพอร์แวกพอเรชันในระดับห้องปฏิบัติการ (Pervaporation: An Overview, 2008)

กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชันนี้เหมาะสำหรับของเหลวผสมที่แยกได้ยาก โดยวิธีการแยกแบบธรรมดา เช่น ของผสมอะซีโอโทรป (Azeotropic mixture) ได้แก่ สารละลาย เอทานอลกับน้ำ หรือของผสมที่แต่ละองค์ประกอบมีจุดเดือดคงที่ใกล้เคียงกัน (สารละลาย, 2551) การแยกผสมโดยใช้กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชันได้มีการนำไปแยกของผสมใน 3 แนวทางคือ

- 1) การแยกน้ำออกจากของผสมสารอินทรีย์กับน้ำ (Water-organic mixture)
- 2) การแยกสารอินทรีย์ออกจากของผสมสารอินทรีย์กับน้ำ (Organic- mixture)
- 3) การแยกของผสมสารอินทรีย์ (Organic mixture)

ปัจจุบันกระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชันที่มีการประยุกต์ใช้งานแล้วในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ การนำไปใช้ในการแยกน้ำออกจากเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูง 95 เปอร์เซ็นต์ และจากการใช้กระบวนการเมมเบรนดังกล่าว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หรือสารเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นสูงคือ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดความสนใจที่จะพัฒนาการนำกระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน มาใช้ทดแทนกระบวนการกลั่นแบบอะซีโอโทรป ซึ่งพบว่ามีข้อดี คือ ประหยัดพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการกลั่น และไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี (ชั้นทอง สุนทราภา, 2547)

2.4.2 กลไกการถ่ายโอนมวลของกระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน

เมื่อพิจารณาในเรื่องของการถ่ายโอนมวล (Mass transfer) ที่เกิดขึ้นใน กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชันสามารถอธิบายได้ 2 โมเดลหรือรูปแบบคือ

- 1) โมเดลการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion model)
- 2) โมเดลการไหลผ่านรูพรุน (Pore-flow model)

2.4.2.1 โมเดลการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion model)

โมเดลการละลาย-การแพร่ใช้ในการอธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลผ่าน เมมเบรน โดยกลไกการถ่ายโอนมวลประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1. กระบวนการดูดซับ (Sorption) ของเพอร์มิเอตเข้าสู่เมมเบรน
2. กระบวนการแพร่กระจายของสาร (Diffusion) ผ่านเมมเบรน
3. กระบวนการดึงสารดูดซับ (Desorption) ของเพอร์มิเอตออกจาก เมมเบรนสู่ภายนอก

เมมเบรนตามโมเดลนี้จริง ๆ แล้วเป็นเมมเบรนไม่มีรูพรุนแต่การเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain segment) ซึ่งเกิดจากอนุภาคของสารเคลื่อนที่ไประหว่างสายพอลิเมอร์ จะทำให้เกิดช่องว่างชั่วคราว (Temporary gap) ขึ้นในเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Polymer matrix) ของเมมเบรนมีผลทำให้เกิดการแพร่ของสารจากด้านป้อนไปยังด้านขาออกของเมมเบรน (ชั้นทอง สุนทรภา, 2547)

2.4.2.2 โมเดลการไหลผ่านรูพรุน (Pore-flow model)

Okada และคณะ (1991) ได้ศึกษาการถ่ายโอนมวลของการไหลผ่านรูพรุนโดยตั้งสมมติฐานว่าเป็นเมมเบรนที่ประกอบด้วย รูพรุนรูปทรงกระบอกตรงทะลุจากผิวด้านป้อนถึงผิวด้านขาออกของเมมเบรนซึ่งการถ่ายโอนมวลผ่านเมมเบรนด้วยโมเดลดังกล่าวประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

1. สารป้อนของเหลวผ่านเข้าไปสู่ขอบเขตของเฟส
2. ของเหลวเกิดการระเหยที่ขอบเขตของเฟส
3. ไอถ่ายโอนจากขอบเขตของเฟสออกจากรูพรุนของเมมเบรน

รูพรุนของเมมเบรนตามโมเดลการไหลผ่านรูพรุนนี้ เป็นช่องว่างจริงของเมทริกซ์พอลิเมอร์ในเมมเบรน แต่จะไม่สามารถพบได้โดยตรงเนื่องจากมีขนาดเล็กมาก (ชั้นทอง สุนทรภา, 2547)

2.4.3 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อสมรรถนะของระบบเพอร์แวกพอเรชัน

2.4.3.1 ความเข้มข้นของสารป้อน

ความเข้มข้นของสารป้อนในที่นี้หมายถึง ความเข้มข้นของสารหนึ่ง ๆ ที่ผ่านเมมเบรนได้ดีกว่าสารอื่น ๆ ความเข้มข้นจะสัมพันธ์กับค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การแพร่ เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น ค่ากิจกรรม (Activity) ของน้ำก็เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างโมเลกุลของน้ำกับเมมเบรนมีมากขึ้น ส่งผลให้เมมเบรนดูดซับโมเลกุลของน้ำได้มาก (ความเข้มข้นของน้ำในเมมเบรนเพิ่มขึ้น) จึงเกิดการพองตัว (swelling) ของเมมเบรนขึ้นและเนื่องจากความเข้มข้นของน้ำในเมมเบรนเพิ่มขึ้นนี้เอง จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในเมมเบรนเพิ่มตามไปด้วย ส่งผลให้ฟลักซ์ของน้ำสูงขึ้น (สุวรรณ ยานวงศ์, 2539) ดังรายงานการศึกษาการแยกอะซิโตนและเอทิลอะซิเตทออกจาก

สารละลายเจือจางโดยการเพิ่มความเข้มข้นด้านสารป้อนมีผลให้ ฟลักซ์ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ไปด้วยแต่ฟลักซ์และ separation factor ของน้ำลดลง (โอตปี กกกำแหง, 2543)

2.4.3.2 ความดันของระบบทางด้านเพอร์มิเอต

ในระบบเพอร์เวปอเรชันแบบสุญญากาศ กำหนดให้มีการลดความดันด้านเพอร์มิเอต โดยใช้ปั๊มสุญญากาศจนความดันด้านเพอร์มิเอต ต่ำกว่าความดันไอของสารที่ผ่านเมมเบรน (ณ อุณหภูมินั้น ๆ) เป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้กับระบบ มีผลทำให้สารที่ผ่านเมมเบรนมีจุดเดือดลดลงจึงสามารถกลายเป็นไอดีง่าย ความดันด้านเพอร์มิเอตมีผลต่อฟลักซ์ และค่า separation factor (α) ดังนี้คือ เมื่อความดันด้านเพอร์มิเอต เพิ่มขึ้นทำให้ฟลักซ์ของสารสารหนึ่ง ๆ ที่ผ่านเมมเบรนได้ดีกว่าลดลง เนื่องจากความแตกต่างระหว่างแรงดันด้านสารละลายป้อนและด้านเพอร์มิเอตลดลง ซึ่งเป็นการลดแรงขับเคลื่อน และมีผลทำให้ค่า α ลดลงเพราะฟลักซ์ของสารที่ผ่านเมมเบรนได้ยากกว่าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้มียางานการศึกษาถึงผลของความดันที่มีผลต่อฟลักซ์ และค่า α ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เยื่อแผ่น Polyion complex ที่มีลักษณะโมดูลเป็นแบบเส้นใยกลวง พบว่า การเพิ่มความดันด้านเพอร์มิเอต มีผลทำให้ฟลักซ์ของน้ำลดลงค่า α ก็ลดลงด้วย แต่ฟลักซ์ของเอทานอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (สุวรรณ ยานวงศ์, 2539) และการศึกษาการแยกอะซิโตนและเอทิลอะซิเตทออกจากสารละลายเจือจาง โดยทำการทดลองที่ความดันด้านเพอร์มิเอตระหว่าง 2-15 mmHg พบว่าถ้าลดความดันลงจะทำให้ฟลักซ์ของสารอินทรีย์ ฟลักซ์ของน้ำ และค่า α เพิ่มขึ้น (โอตปี กกกำแหง, 2543)

2.4.3.3 ความหนาของเมมเบรน (Membrane thickness)

โดยทั่วไปฟลักซ์จะแปรผกผันกับความหนาของเมมเบรนแสดงว่าเมมเบรนที่บางความต้านทานของเมมเบรนมีน้อยจึงทำให้ฟลักซ์สูงการเพิ่มฟลักซ์จะลด selectivity แต่ เมมเบรนที่บางเกินไปจะทำให้ฟลักซ์สูงมากจนเกินขีดความสามารถของปั๊มสุญญากาศที่จะรับได้จึงไม่สามารถลดความดันด้านเพอร์มิเอต จนถึงจุดที่ต้องการได้ หากสารที่ผ่านเมมเบรนออกมาสู่ด้านเพอร์มิเอต กลายเป็นไอดีไม่หมดและยังคงอยู่ในสถานะของเหลวจะเป็นปัญหาในการเก็บกักสารด้านเพอร์มิเอต นั่นคือไม่สามารถเก็บได้หมดเนื่องจากเพอร์มิเอต บางส่วนที่อยู่ในสถานะของเหลวยังคงค้างอยู่ในท่อซึ่งอยู่ระหว่างเมมเบรนกับภาชนะกักสาร (Cooling vessel) และส่งผลให้การคำนวณหาค่าฟลักซ์คลาดเคลื่อนได้ (สุวรรณ ยานวงศ์, 2539)

2.4.3.4 อุณหภูมิ (Temperature)

สำหรับกระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชันในที่นี้จะหมายถึง อุณหภูมิของสารป้อน เนื่องจากการกลายเป็นไอของสารที่ผ่านเมมเบรนทางด้านเพอร์มิเอต ต้องใช้ความร้อนในการระเหยซึ่งในทางปฏิบัติจึงมีการให้ความร้อนแก่สารละลายป้อน ซึ่งอุณหภูมิช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่และเพิ่ม plasticizing effect ระหว่างผิวเมมเบรนกับสารที่ต้องการแยก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เมมเบรนดูดซับสารที่ต้องการแยกได้มากขึ้นและทำให้สารแพร่ผ่านเมมเบรนได้เร็วขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าความแตกต่างในการละลายขององค์ประกอบในสารป้อนที่เข้าสู่เมมเบรนมีค่าลดลง โดยรวมแล้วเมื่อสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเมมเบรนสามารถดูดซับองค์ประกอบของสารละลายป้อนได้มากขึ้นและช่วยเพิ่มการแพร่ขององค์ประกอบ ผ่านเมมเบรนสู่ด้านเพอร์มิเอต ซึ่งส่งผลให้ค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง ส่วนค่า α มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากสัดส่วนความเข้มข้นขององค์ประกอบของสารป้อนและสารด้านเพอร์มิเอตค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อฟลักซ์มากกว่า Selectivity มีรายงานว่า การเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนมีผลทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นแต่ค่า α มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (สุวรรณ ยานวงศ์, 2539) และดังรายงานการศึกษาการแยกอะซิโตนและเอทิลอะซิเตทออกจากสารละลายเจือจางโดยเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนตั้งแต่ 30–50 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ฟลักซ์ของสารอินทรีย์และฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้น แต่ค่า α ลดลง (โอดปี กกก้าแพง, 2543).

2.4.4 การวัดประสิทธิภาพของระบบเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน

ในกระบวนการเมมเบรนส่วนใหญ่พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของระบบ หรือใช้ชี้ให้เห็นถึงความสามารถของเมมเบรนในการวัดการแยกสารออกจากกันได้แก่

2.4.4.1 การคำนวณค่าฟลักซ์ (Flux : J)

คือ ปริมาณหรือมวลของสาร ที่คำนวณได้จากการเคลื่อนที่ของสารตัดผ่านพื้นผิวของเมมเบรนแบบตั้งฉากต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อเวลา มีสูตรดังนี้

$$\text{Flux (g m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = \frac{\text{Weight of permeate (g)}}{\text{Membrane area (m}^2) \times \text{Pervaporation time (hr or min)}}$$

$$J = \frac{W}{A \times t}$$

เมื่อ	J	มวลของสารที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวเมมเบรนต่อเวลา มีหน่วยเป็น กรัมต่อตารางเมตรต่อนาที
	W	มวลของสารที่เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็นกรัม
	A	พื้นที่เมมเบรน มีหน่วยเป็นตารางเมตร
	t	เวลาที่เกิดในกระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน มีหน่วยเป็นนาที

2.4.4.2 การคำนวณค่าแฟคเตอร์การแยกสาร (Separation factor: α)

หาได้จากอัตราส่วนความเข้มข้นขององค์ประกอบของสารอินทรีย์อื่น ๆ
ในด้านเพอร์มิเอตต่อองค์ประกอบของสารอินทรีย์อื่น ๆ ในด้านสารป้อนดังสูตรคำนวณ

$$\alpha = \frac{Y_w / Y_E}{X_w / X_E}$$

เมื่อ	Y_w / Y_E	คือ อัตราส่วนของน้ำต่อเอทานอลในด้านเพอร์มิเอต
	X_w / X_E	คือ อัตราส่วนของน้ำต่อเอทานอลในด้านสารป้อน

2.4.4.3 การคำนวณค่าประสิทธิภาพการแยกสารของเมมเบรน (Pervaporation separation index: PSI) เป็นดัชนีที่ชี้วัดประสิทธิภาพของการแยกสารในระบบเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน ซึ่งสูตรคำนวณดังนี้

$$PSI = \text{Flux (Separation factor - 1)}$$

ข้อสังเกต

- ค่า PSI สูง แสดงว่าระบบเพอร์เวปอเรชันมีประสิทธิภาพในการแยกสารได้ดี
- ค่า PSI มีค่าเป็นศูนย์ได้สองกรณีคือ ค่าฟลักซ์มีค่าเป็นศูนย์ หรือ
- ค่า Separation factor มีค่าเป็นหนึ่ง
- โดยที่ถ้าค่า Separation factor มีค่าเป็นหนึ่ง แสดงว่าไม่มีการแยกเกิดขึ้น

เนื่องจากข้อจำกัดของระบบที่สร้างขึ้น ทำให้ไม่สามารถวัดค่า Y_E ในด้านเพอร์มิเอต จึงต้องหาค่า Y_E จากค่าความต่างของความเข้มข้นเอทานอล (ก่อนทดลองและหลังทดลอง) ที่อยู่ด้านสารป้อนแทน โดยที่ถ้าค่าแฟคเตอร์การแยกสาร (Separation factor: α) มีค่ามากกว่าหนึ่ง นั่นคือระบบมีการแยกเอทานอล หรือเอทานอลเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้มากกว่าน้ำ จึงส่งผลให้ค่า Y_w มากกว่าค่า Y_E และค่า α จึงมากกว่าหนึ่ง

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของเอทานอลทางด้านเพอร์มิเอต นั่นคือต้องการให้เอทานอลเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้มากกว่าน้ำ จึงได้สนใจสภาวะที่ทำให้ค่า α มีค่ามากกว่าหนึ่งมาก ๆ

2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews)

มีงานวิจัยทั้งในประเทศไทยและในต่างประเทศซึ่งมีความพยายามที่จะศึกษาเพื่อพัฒนาการนำกระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชันมาใช้ในการแยกสารให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (Concentration process) โดยศึกษาในแนวทางที่แตกต่างกัน เช่น ในส่วนของโมดูล หรือ ชนิดของเมมเบรนที่ใช้แตกต่างกัน รวมถึงสภาวะในการเดินระบบเมมเบรนต่างๆ ซึ่งในวรรณกรรมของงานวิจัยนี้จะขอลำถึงเฉพาะการใช้กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชันในการนำมาศึกษาแยกเอทานอลที่อยู่ในสารละลายในรูปแบบต่างๆ ให้มีความเข้มข้นขึ้น ดังต่อไปนี้

สุวรรณ ยานวงศ์ (2539) ศึกษาผลของตัวแปรต่อฟลักซ์ และ α ได้แก่ ความเข้มข้นความดัน อัตราการไหล และสารเจือปน ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใช้เยื่อแผ่นเมมเบรนชนิด Polyion complex ที่มีโมดูลเป็นแบบเส้นใยกลวง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนมีผลทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่ค่า α มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนการเพิ่มความดันด้านเพอร์มิเอต มีผลทำให้ฟลักซ์และค่า α ของน้ำลดลง แต่ฟลักซ์ของเอทานอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับอัตราการไหลของสารป้อนมีผลต่อค่าฟลักซ์และค่า α น้อยมาก ส่วนผลของสารเจือปนอะซิโตนหรืออะซิตัลดีไฮด์ มีผลทำให้ฟลักซ์ของน้ำมีค่าต่ำกว่าการทดลองที่ไม่ได้เติมสารเจือปน 12.71 และ 9.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของสารเจือปนเพิ่มขึ้น ทำให้ฟลักซ์ของน้ำลดลง ส่วนฟลักซ์ของเอทานอลกลับเพิ่มขึ้น สำหรับค่า α ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือปน

สุภาพร ฉันทน์ และ ไพบุลย์ อินนาจิตร (2548) ได้ศึกษาการแยกเอทานอลกับน้ำโดยวิธีเพอร์แวกพอเรชัน เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกสารละลายเอทานอลกับน้ำ เมมเบรนที่ใช้ศึกษาเป็นเมมเบรนเชิงประกอบชนิดซิลิโคนที่มีชั้นรองรับเป็นโพลีซิลิโพน (silicone/PSF) ซึ่งมีการแปรผันปริมาณของซิลิโคนและเมมเบรนอีกชนิดหนึ่งเป็นเมมเบรนทางการค้าชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Pervap® 2211, Sulzer) ผลการศึกษาพบว่า เมมเบรนเชิงประกอบชนิด silicone/PSF ที่เคลือบด้วยซิลิโคน (3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะให้ค่าฟลักซ์สูงที่สุด แต่ค่าการแยกมีค่าลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่า เมมเบรนเชิงประกอบชนิดนี้เหมาะสำหรับการแยกเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลเจือจาง โดยที่ค่าการแยกของเอทานอลและค่าฟลักซ์ จะสูงขึ้นตามอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้น เมมเบรนที่เคลือบด้วยซิลิโคน (7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะให้ค่าการแยกสูงที่สุดคือ 7.32 และค่าฟลักซ์ คือ 0.44 กิโลกรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สำหรับเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่า เมมเบรนชนิดนี้เหมาะสำหรับการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเข้มข้น โดยค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้นและค่าการแยกสำหรับน้ำลดลง เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนและอุณหภูมิสูงขึ้น เมมเบรนชนิดนี้ให้ค่าการแยกสูงที่สุดคือ 248 และให้ค่าฟลักซ์ เท่ากับ 0.02 กิโลกรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนเริ่มต้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

วรารณณ์ ไกรยะปักษ์ และ อนวัช สังข์เพชร (2550) ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนเพื่อใช้ในการแยกน้ำออกจากเอทานอล โดยใช้เมมเบรนสังเคราะห์ชนิดโพลิเอไมด์คาร์บอน (Carbonization polyimide (Kapton®) ด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันแบบสารป้อนที่มีสถานะเป็นของเหลวได้ดีกว่าแบบสารป้อนที่มีสถานะเป็นไอ ซึ่งดูได้จากค่าฟลักซ์และการเลือกผ่านโดยที่แบบสารป้อนสถานะเป็นของเหลวมีค่าฟลักซ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.453 ± 0.008 กิโลกรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง และค่าการเลือกผ่านค่อนข้างสูงคือประมาณ 11,000 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าฟลักซ์ที่สารป้อนสถานะเป็นไอ คือเท่ากับ 0.244 ± 0.020 กิโลกรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง และค่าการเลือกผ่านค่อนข้างต่ำคือ ประมาณ 1,500

Lamer และคณะ (1995) ได้ศึกษาการสกัด Benzaldehyde จากน้ำหมัก โดยใช้เมมเบรน 2 ชนิดคือ เมมเบรนเชิงประกอบ PDMS เคลือบบน ตัวรองรับ polyacrylonitrile มีความหนา 200 μm และเมมเบรนชนิด PDMS แบบเนื้อเดียวทั่วทั้งแผ่น พบว่าเมมเบรนทั้งสองชนิด ให้ค่าฟลักซ์คล้ายกันแต่เมมเบรนที่เป็นเนื้อเดียวกัน มีค่าการเลือกมากกว่า ส่วนอิทธิพลของ

ความดันด้านเพอร์มิเอตต่อค่าฟลักซ์ของ Benzaldehyde ที่มีการศึกษาในช่วง 35–700 Pa พบว่าที่ความดันต่ำๆจะให้ค่าฟลักซ์ค่อนข้างสูง

O'Brien และ Craig (1996) ได้รายงานผลการศึกษาระบบการหมักเอทานอลแบบต่อเนื่องร่วมกับกระบวนการเมมเบรนเพอร์แวปอเรชัน เพื่อแยกเอทานอลออกจากน้ำหมัก โดยใช้เมมเบรนแบบแผ่นชนิด polydimethylsiloxane ขนาด 0.1 ตารางเมตร โดยการป้อนน้ำตาลเดรกโตส จะถูกควบคุมด้วยอัตราการไหลของเพอร์มิเอต จากทางหน่วยที่ควบคุมระดับของเหลวในถังหมัก ซึ่งสามารถแยกเอทานอลที่มีความเข้มข้น 4–6 เปอร์เซ็นต์ ในถังหมัก และทำให้ได้ปริมาณเอทานอลเข้มข้นขึ้น 20–23 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ในเพอร์มิเอต แสดงให้เห็นว่าระบบการหมักและระบบเมมเบรนสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและผลิตเอทานอลได้ 4.9–7.8 กรัมต่อลิตรชั่วโมง ได้ค่าฟลักซ์และค่าคัดสรรสารเท่ากับ 0.31–0.791 กิโลกรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง และ 1.8–6.5 ตามลำดับ

Jesus และคณะ (2002) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการแยกแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล ออกจากน้ำ โดยใช้เมมเบรน 2 ชนิดได้แก่ CMG-OM-010 และเมมเบรน 1060-SULZER ซึ่งมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 131 ตารางเซนติเมตร และแปรผันตัวแปรดังต่อไปนี้ ที่อุณหภูมิ 40–70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของแอลกอฮอล์ในน้ำ 13–20 เปอร์เซ็นต์ หลังจากทำการทดลองไป 5 ชั่วโมง พบว่า ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ด้านเพอร์มิเอตเข้มข้นถึง 30–60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้แอลกอฮอล์ชนิดเดียวกันจะให้ค่าฟลักซ์คล้ายกัน แต่เมื่อใช้แอลกอฮอล์ต่างกันค่าฟลักซ์ก็จะต่างกัน การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าฟลักซ์ของเมมเบรนทั้งสองเพิ่มขึ้น และเมมเบรน CMG-OM-010 ให้ค่า α ของแอลกอฮอล์ทั้ง 3 ชนิดดีกว่าเมมเบรน 1060-SULZER

Ikegami และคณะ (2004) ได้รายงานการศึกษาการทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นสูงขึ้น โดยกระบวนการหมักร่วมกับกระบวนการเมมเบรนเพอร์แวปอเรชัน fermentation/pervaporation โดยใช้เมมเบรน silicalite แบบ ethanol-selective เคลือบด้วยยางซิลิโคน 2 ชนิดคือ KE-45 และ KE-108 ซึ่งเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำ ผลการศึกษาพบว่า เมมเบรนที่เคลือบด้วยยางซิลิโคน KE-45 ให้ผลการเก็บเกี่ยวเอทานอลได้ดีที่สุด เอทานอลที่เก็บเกี่ยวได้ทางด้านเพอร์มิเอต มีความเข้มข้น 67 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) และปริมาณของเอทานอลที่ได้มีค่ามากกว่าเมมเบรน silicalite ที่ไม่ได้เคลือบด้วยยางซิลิโคนถึง 10 เท่า ซึ่งการเคลือบเมมเบรนด้วยยางซิลิโคนช่วยป้องกันการดัดจริต และกลีเซอรอล ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมัก ที่จะสัมผัสกับผิวเมมเบรนโดยตรงและจะไปรบกวนการแยกได้

Wu และคณะ (2005) ได้รายงานการศึกษาถึงการถ่ายเทมวลของน้ำหมักโดยใช้ เมมเบรน polydimethylsiloxane (PDMS) ที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเททั้งหมดมีค่า 1.93×10^{-6} เมตรต่อวินาที ที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันทางด้านเพอร์มิเอต 5 mmHg และที่ความเข้มข้นเซลล์ 5 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในทางตรงกันข้าม เมื่อใช้สภาวะคล้ายกันแต่เป็นสารละลายเอทานอลจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเททั้งหมดเป็น 1.34×10^{-6} เมตรต่อวินาที นอกจากนี้ค่าฟลักซ์และค่าการสรร (Selectivity) ของเอทานอลจากน้ำหมัก มีค่าสูงกว่าเอทานอลที่ได้จากสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นในการป้อนเดียวกันสัมประสิทธิ์การถ่ายเททั้งหมดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อความเข้มข้นเซลล์ที่ยังมีชีวิต แต่จะลดลงเมื่อมีของแข็งของเซลล์ที่ไม่มีชีวิต น้ำหมักที่มีเซลล์ที่มีชีวิตอยู่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทสูงที่สุดในระหว่างการป้อนรวมทั้งในระหว่างการแยกโดยใช้เมมเบรนชนิด PDMS นี้

Aroujalian และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักต่อการไหลและความสามารถในการแยกเอทานอลผ่านเมมเบรน polydimethyl-siloxane โดยการเติมน้ำตาลกลูโคสที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร และเติมน้ำตาลไซโลส ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 กรัมต่อลิตร ลงในสารละลายเอทานอลกับน้ำที่มีความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1, 10, 20 และ 40 mmHg พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 40 mmHg โดยที่ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส 15 กรัมต่อลิตร ทำให้ทั้งค่าฟลักซ์และค่าการแยกเอทานอลลดลง 8 และ 15.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของน้ำตาลไซโลสนั้น ไม่มีผลต่อการไหลและอุณหภูมิจะมีผลต่อการแยกเล็กน้อย

Honglei และคณะ (2008) รายงานผลการศึกษาการแยกสารละลายน้ำผสมกับเอทานอลด้วยเมมเบรนโคโคซานที่เติม H-ZSM-5 พบว่า การผสม H-ZSM-5 ในเมมเบรนโคโคซานทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นแต่ค่า α ไม่เพิ่ม เมื่อเติม Si/Al ใน H-ZSM-5 ทำให้ α เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนโคโคซานที่ไม่มีการเติม H-ZSM-5 (ทดลองแยกสารละลายเอทานอลผสมกับน้ำความเข้มข้น 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะให้ค่าฟลักซ์ 54.18 กรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง และค่า α 158.02) ในส่วนของเมมเบรนโคโคซาน H-ZSM-5(50)-CS-08 (อัตราส่วนมวลของ H-ZSM-5(50) ต่อโคโคซาน เป็น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่ทำการทดลองที่สภาวะเดียวกันกับเมมเบรนโคโคซานที่ไม่มีการเติม H-ZSM-5 ค่าฟลักซ์ 230.96 กรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง และค่า α 152.82

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งที่จะศึกษาการนำกระบวนการเมมเบรนเพอร์แวกพอเรชัน มาใช้ในการแยกเอทานอลออกจากน้ำและเอทานอลน้ำหมักของลำตันข้าวฟ่างหวาน โดยการใช้ เมมเบรนทางการค้าที่สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุเซลลูโลสอะซิเตท และเซลลูโลสเคลือบโพลีไวนิล แอลกอฮอล์ 10 % เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรอื่นได้แก่ ความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้น อุณหภูมิและความดัน ที่มีต่อค่าฟลักซ์ ค่าแฟคเตอร์การแยกสารและค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการ แยกในระบบเมมเบรนเพอร์แวกพอเรชัน ที่ได้จัดสร้างขึ้นในระดับห้องปฏิบัติการ