

รหัสโครงการ SUT 3-304-54-12-11



## รายงานการวิจัย

การพัฒนาท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิง  
เอทานอลด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

**(Development of Composite Ceramic Hollow Fiber Membrane for  
the Production of Motor Fuel Grade Ethanol using Vapor  
Permeation Technique)**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT 3-304-54-12-11



## รายงานการวิจัย

การพัฒนาท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิง  
เอทานอลด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

(Development of Composite Ceramic Hollow Fiber Membrane for  
the Production of Motor Fuel Grade Ethanol using Vapor  
Permeation Technique)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทาวัน

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2555

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทาวัน ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตร สุพรรณบุรี ในการอนุเคราะห์นำข้าวฟางหวานเข้มข้นเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการหมักเอทานอล ตลอดการวิจัย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทาวัน  
สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ  
สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทคัดย่อภาษาไทย

เทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศประสิทธิภาพสูงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักน้ำหมัก โดยจลนพลศาสตร์การหมักแสดงให้เห็นถึงการยับยั้งอย่างมีนัยสำคัญของผลิตภัณฑ์และความเข้มข้นวิกฤตของเอทานอลอยู่ที่ 100 กรัมต่อลิตร น้ำหมักถูกทำให้เดือดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยทำการลดความดันบรรยากาศลงถึงระดับที่ 45 มิลลิบาร์ ไอผสมของเอทานอลจะถูกกลั่นลำดับส่วนให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 94 ก่อนที่จะลอยออกจากหอกลั่นออกไป ส่งผลให้ส่วนกลั่นเอทานอลนั้น สามารถเอาเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำได้โดยตรง โดยไม่ต้องทำการกลั่นเพิ่มเติมอีก ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักนั้นถูกจำกัดให้อยู่ในระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 25 กรัมต่อลิตร ซึ่งส่งผลทำให้ลดอิทธิพลจากการยับยั้งผลิตภัณฑ์สำหรับการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักแบบกะนั้น อัตราการใช้สารตั้งต้นอยู่ที่ 26.6 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และน้ำตาลกลูโคสจะถูกใช้หมดภายใน 21 ชั่วโมง การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักแบบกะซ้ำนั้น สามารถเติมน้ำตาลกลูโคสเข้าไปได้ 9 ครั้ง และเอทานอลถูกผลิตได้ 8 เท่าของการหมักแบบกะ กระบวนการหมักยุติลงเมื่อเกิดการสะสมตัวของกรดแลคติกซึ่งเป็นผลพลอยได้ของกระบวนการหมัก นอกจากนี้แล้วเชื้อแผ่นแข็งประกอบเซรามิกได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดินขาวได้ถูกนำมาใช้เพื่อทำเป็นชั้นรองรับแบบแผ่นเรียบ โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยรูพรุนเล็ก ๆ ที่เกิดจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ชั้นรองรับถูกเคลือบด้วยอนุภาคซีโอไลต์และสัณฐานของตัวอย่างนั้น จะถูกวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยทำการเปรียบเทียบกับท่อใยกลวงแข็งประกอบในเชิงพาณิชย์ชนิดโซเดียมเอ สำหรับระบบการแยกไอผ่านเชื้อแผ่น ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำของเชื้อแผ่นแข็งประกอบเซรามิกได้ถูกศึกษาเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล โดยค่าการถ่ายเทมวลของน้ำผ่านชั้นคัดเลือกของเชื้อแผ่นนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้านเช่น ความเข้มข้นของน้ำในสารป้อน อัตราการไหลในรีเทนเนอร์ ความดันและ อุณหภูมิของสารป้อนตามลำดับ โดยผลการทดลองพบว่า ท่อใยกลวงแข็งประกอบชนิดโซเดียมเอที่อยู่บนผิวของชั้นรองรับที่ไม่สมมาตร สามารถผลิตเอทานอลเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตาม การแยกน้ำจะยากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลสูง ๆ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ของเมมเบรนจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลกับค่าความบริสุทธิ์ที่ต้องการ

## บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

A high efficiency vacuum fractionating technique was introduced to simultaneously remove ethanol from fermentation broth. Fermentation kinetic revealed a strong product inhibition and the threshold ethanol concentration was 100 g/L. The broth was boiled at 35 °C by reducing the pressure to 45 mBar. The ethanol vapor was fractionated for up to 94 wt% before leaving the column. As a result, the ethanol product can be dehydrated without further distillation. Ethanol concentration in the broth was kept lower than 25 g/L, thus minimized the product inhibition effect. For batch extractive fermentation, a high substrate utilization rate was obtained at 26.6 g/L h and most of glucose was consumed within 21 h. For repeated-batch extractive fermentation, addition of glucose was carried out up to 9 times and ethanol was produced 8 times higher than batch fermentation. The fermentation ceased due to accumulation of lactic acid as another by-product. Subsequently, composite ceramic membranes were fabricated in the laboratory. Kaolin was employed for preparation of the flat-sheet supportive layer. Microporous structure was formed by sintering at 1,500 °C. Coating of the zeolite crystal was attempted hydrothermally and the samples were characterized by SEM. Comparisons were made with a commercial NaA composite hollow fiber membrane. For VP, the dehydration performances of composite ceramic membranes to produce fuel-grade ethanol were investigated. Water flux across the selective layer depends on many operating parameters including feed water composition, retentate flow rate, feed pressure, and feed temperature, respectively. From the experimental results, NaA zeolite membrane on asymmetric porous support can produce ethanol more than 99 wt% ethanol. However, the separation became more difficult at higher ethanol concentration. The mathematical simulation suggested that membrane area increased exponentially with the required purity.

## สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ	3
บทคัดย่อภาษาไทย	4
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	5
สารบัญเรื่อง	6
สารบัญภาพ	8
สารบัญตาราง	10
บทที่ 1 บทนำ	12
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาทางานวิจัย	12
1.2 เอทานอล	13
1.3 การหมักเอทานอล	16
1.4 จลนศาสตร์การหมักเอทานอล	18
1.5 การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมัก (Extractive fermentation of ethanol)	19
1.5.1 การหมักแบบสุญญากาศ	21
1.5.2 การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์	22
1.5.3 ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน โดยใช้ระบบเพอร์เวิร์ปอเรชั่น	22
1.5.4 การพาโดยก๊าซ	24
1.6 หอกลิ้นลำดับส่วนประสิทธิภาพสูง	24
1.6.1 หลักการทั่วไป	24
1.6.2 การออกแบบชิ้นส่วนหอกลิ้น	24
1.7 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล	28
1.7.1 การแยกโดยใช้เยื่อแผ่น	29
1.7.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น	32
1.7.3 การศึกษาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์	34
1.7.4 เยื่อแผ่นสำหรับการกำจัดน้ำออกจากสารละลายเอทานอล	38
1.8 จุดประสงค์ของโครงการวิจัย	40
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	41
2.1 การแยกผลิตภัณฑ์ควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ	41
2.2 การแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น	43
2.2.1 การพัฒนาเยื่อแผ่นเซรามิกเชิงประกอบแบบแผ่นเรียบ	43

2.2.2	ท่อใยกลางเชิงประกอบเซรามิก	45
2.3	ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นระดับโรงงานต้นแบบ	47
2.4	การวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
2.4.1	การหาปริมาณน้ำในสารละลายเอทานอลโดยการใช้ Karl Fischer Titration และเครื่องวัดความหนาแน่น	50
2.4.2	การหาประสิทธิภาพของเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น	53
บทที่ 3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์		54
3.1	การศึกษาจลนศาสตร์การหมักเอทานอล	54
3.1.1	การหมักแบบดั้งเดิมและการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมัก	56
3.1.2	การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักแบบกะช้ำ	60
3.2	การพัฒนาเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกสำหรับการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล	62
3.2.1	การวิเคราะห์สัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	62
3.2.1.1	ท่อใยกลางเชิงประกอบเซรามิกซีโอไลท์ชนิดโซเดียมเอ	62
3.2.1.2	เยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ	63
3.2.2	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกน้ำของเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกชนิดต่าง ๆ	66
3.3	การศึกษาอิทธิพลของสภาวะต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำของท่อใยกลางเชิงประกอบซีโอไลท์ชนิดโซเดียมเอ	67
3.3.1	การทดสอบประสิทธิภาพการแยกน้ำด้วยระบบเพอร์แวร์์เพอร์ชั่นและการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น	67
3.3.2	อิทธิพลจากอุณหภูมิของสารป้อน	70
3.3.3	อิทธิพลจากการไหลของรีเทนเตต (retentate)	73
3.3.4	อิทธิพลของความดันไอ	74
3.3.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทมวลของน้ำบนเยื่อแผ่น	76
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง		78
บรรณานุกรม		80
ประวัติผู้วิจัย		82

## สารบัญภาพ

รูปภาพ 1 ระบบการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลัง (Nguyen <i>et al.</i> , 2007).....	15
รูปภาพ 2 วิธี Emben-Meyer (Bailey and Ollis, 1986) .....	15
รูปภาพ 3 การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบสุญญากาศ (Nguyen <i>et al.</i> , 2011) .....	21
รูปภาพ 4 การทดลองระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบเพอร์เวป พอร์ซัน (O'Brien <i>et al.</i> , 2004) .....	23
รูปภาพ 5 ภาพวาดการออกแบบภายในของหอกลั่นแบบการปั่นผสมไอ .....	26
รูปภาพ 6 การทดลองระบบการกลั่นเอทานอลบริสุทธิ์แบบต่อเนื่องจากน้ำหมัก (Boontawan A., 2553): 1, มอเตอร์; 2, เครื่องควบแน่น; 3, ทางเข้าหอกลั่น; 4, เครื่องแลกเปลี่ยนความ ร้อน; 5, เครื่องควบคุมความเร็วรอบของการหมุน; 6, ปุ่มด้านสายป้อน; 7, สารป้อน; 8, ผลิตภัณฑ์เอทานอล; 9, หม้อต้ม .....	27
รูปภาพ 7 รูปภาพหลักการทำงานของการทำงานของการแยกสารด้วยเทคนิค pervaporation (Huang, 1991).....	30
รูปภาพ 8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และลักษณะการถ่ายเทมวลภายในระบบการแยกไอผ่านเยื่อ แผ่น (ดัดแปลงจาก Pettersen, 1995) .....	33
รูปภาพ 9 ภาพวาดแสดงท่อไยกลวงเชิงประกอบเซรามิก โดยมีชั้นแยกอยู่ภายนอก .....	39
รูปภาพ 10 แสดงภาพวาดของระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยการกลั่น ลำดับส่วนแบบสุญญากาศ (บน) และ โถแก้วรองรับส่วนกลั่นเอทานอลพร้อมวาล์ว 3 ทาง สำหรับการกลั่นแบบต่อเนื่อง (ล่าง) .....	42
รูปภาพ 11 การเตรียมเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกแบบแผ่นเรียบ (VP) และ โมดูลเยื่อแผ่น (ล่าง) .....	43
รูปภาพ 12 การเคลือบซีไอโพลีโกลบนชั้นรองรับท่อกลวงเซรามิกด้วยวิธีจุ่ม-เคลือบ (Sato and Nakane, 2007).....	45
รูปภาพ 13 รูปภาพ โมดูลเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกชนิดท่อไยกลวงในระดับ โรงงานต้นแบบ และ การจัดสร้างโมดูลภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	47
รูปภาพ 14 การจัดการทดลองระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล ....	48
รูปภาพ 15 ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นในระดับ โรงงานต้นแบบ โดยใช้ท่อไยกลวงเซรามิกเชิง ประกอบ; 1 = Feed tank, 2 = Compressor, 3 = Super heater, 4 = Permeate, 5 = Condenser 1, 6 = Membrane module, 7 = Condenser 2 และ 8 = Back pressure valve .	49
รูปภาพ 16 อุปกรณ์สำหรับวัดความหนาแน่น (Density meter) สำหรับการวัดปริมาณน้ำใน สารละลายเอทานอล (บน) กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และความเข้มข้นของเอทานอล (ล่าง).....	52
รูปภาพ 17 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสที่มีต่อค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอล.....	54



รูปภาพ 18	อิทธิพลของความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้นที่มีต่อค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอล .....	55
รูปภาพ 19	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส ( $\square$ ), ความเข้มข้นของเอทานอล ( $\circ$ ), และความสามารถในการมีชีวิตของเซลล์ยีสต์ ( $\Delta$ ) ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะ .....	57
รูปภาพ 20	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส ( $\square$ ), ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมัก ( $\circ$ ), ปริมาณของเอทานอลในส่วนกลั่น ( $\bullet$ ) และความสามารถในการมีชีวิตของเซลล์ยีสต์ ( $\Delta$ ) ในระหว่างการแยกเอทานอลควบคู่กับการหมักเอทานอลแบบกะ .....	59
รูปภาพ 21	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส ( $\square$ ), ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมัก ( $\circ$ ), ปริมาณของเอทานอลในส่วนกลั่น ( $\bullet$ ) และความสามารถในการมีชีวิตของเซลล์ยีสต์ ( $\Delta$ ) ในระหว่างการแยกเอทานอลควบคู่กับการหมักเอทานอลแบบกะซ้ำ (repeated-batch extractive fermentation) .....	60
รูปภาพ 22	ภาพถ่ายท่อใยกลางเชิงกระบอกเซรามิกซีโอไลท์ชนิดโซเดียมเอ (NaA) จากห้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Sato <i>et al.</i> , 2008) .....	62
รูปภาพ 23	ภาพผิวหน้า (บน) และตัดขวาง (ล่าง) ของชั้นรองรับก่อนที่จะทำการเคลือบซีโอไลท์ .	63
รูปภาพ 23	ภาพถ่ายเยื่อแผ่นซีโอไลท์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	64
รูปภาพ 25	อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำในสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวมและความเข้มข้นของน้ำในด้านเพอร์มิเอทเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบเพอร์เวปพอร์เรชั่นและการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น .....	68
รูปภาพ 26	อิทธิพลของอุณหภูมิในด้านของสารป้อนและความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวม .....	70
รูปภาพ 27	การพล็อตสมการอาร์เรเนียสระหว่างค่าการฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทและค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ผกผัน .....	72
รูปภาพ 28	อิทธิพลของอัตราการไหลของรีเทนเตดและความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท .....	73
รูปภาพ 29	อิทธิพลของอัตราการไหลของรีเทนเตดและความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท .....	74
รูปภาพ 30	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ต้องการ ณ ความดันและความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นร้อยละของรีเทนเตด ( $W_p$ ). .....	76

## สารบัญตาราง

ตาราง 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอลบริสุทธิ์ .....	16
ตาราง 2 มาตรฐานสหภาพยุโรปของเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง (ASTM International 2004) .....	17
ตาราง 3 ตัวอย่างการแยกผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพโดยอาศัยสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน (Lye <i>et al.</i> , 1999).....	20
ตาราง 4 ประสิทธิภาพการแยกน้ำออกจากไอของผสมเอทานอลด้วยเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิก ชนิดต่าง ๆ โดยใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น .....	66



## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหางานวิจัย

การผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในปัจจุบันนั้น คาดว่าจะได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เนื่องจากสถานะของราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่ผันผวนมากและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้การสำรวจ ขุดหาแหล่งปิโตรเลียมใหม่ ๆ ทำให้ปริมาณของน้ำมันดิบมีการลดลงอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มว่าจะหมดไปจากโลกนี้ในไม่ช้า จากปัญหาดังกล่าว ทำให้มีแนวความคิดที่จะมีการผลิตรถยนต์ที่สามารถใช้น้ำมันผสมเอทานอลให้ได้ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น เช่นน้ำมัน E85 เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการผลิตรถยนต์ประเภทดังกล่าวแล้ว หลายยี่ห้อเช่น มิตร ชูบุชี วอลโว่ ฮอนด้า เป็นต้น เอทานอลสามารถผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรได้หลากหลายชนิด เช่นกากน้ำตาลอ้อยและมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่ปัญหาอย่างหนึ่งของการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลนั้นคือการที่ไม่สามารถผลิตได้ในระดับชุมชน ในปัจจุบันการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลสามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่านั้น ทั้งนี้มีสาเหตุหลักคือมาตรฐานปริมาณน้ำปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ที่อนุญาตให้มีได้ไม่เกินร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก แต่การกลั่นเอทานอลโดย ปกตินั้นจะได้อัตราความเข้มข้นของน้ำต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 4.6 โดยน้ำหนักเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถพัฒนาการผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ สำหรับเทคโนโลยีการแยกน้ำออกจากของผสมโดยใช้เทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้น เป็นการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic membrane) ทำการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอล แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นที่มีจำหน่ายในปัจจุบันผลิตจากพอลิเมอร์ชนิด Poly Vinyl Alcohol (PVA) เป็นหลัก และมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (flat sheet) ซึ่งจะมีข้อจำกัดในด้านของการมีพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ต่ำ อีกทั้งพอลิเมอร์ที่ใช้นั้นจะมีการต้านทานความร้อนได้ไม่สูงนัก ทำให้มีค่าอัตราการถ่ายเทมวล ของน้ำต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ในข้อเสนอโครงการวิจัยนี้จะทำการศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอลและน้ำ โดยขั้นตอนแรกจะผลิตเยื่อแผ่นรอง (supporting layer) ในลักษณะของท่อใยกลวง (hollow fiber membrane) ซึ่งทำจากสารประเภทเซรามิกซึ่งจะมีคุณสมบัติในด้านความคงทนต่อความร้อนได้สูงกว่าพอลิเมอร์ จากนั้นจะทำการศึกษาถึงสารเคลือบชนิดต่าง ๆ (coating layer) เช่น zeolite หรือ modified PVA ที่จะทำหน้าที่ในการคัดเลือกผ่านของน้ำ ก่อนที่จะทำการศึกษาประสิทธิภาพในการแยกน้ำในรูปของฟลักซ์ และค่าสัมประสิทธิ์การแยก (separation factor,  $\alpha$ ) ในขั้นตอนสุดท้าย เยื่อแผ่นที่มีคุณภาพดีที่สุดจะถูกผลิตขึ้นในระดับโรงงานต้นแบบ (pilot plant) และทดสอบสำหรับการผลิต เชื้อเพลิงเอทานอลจากน้ำหมักจริง

## 1.2 เอทานอล

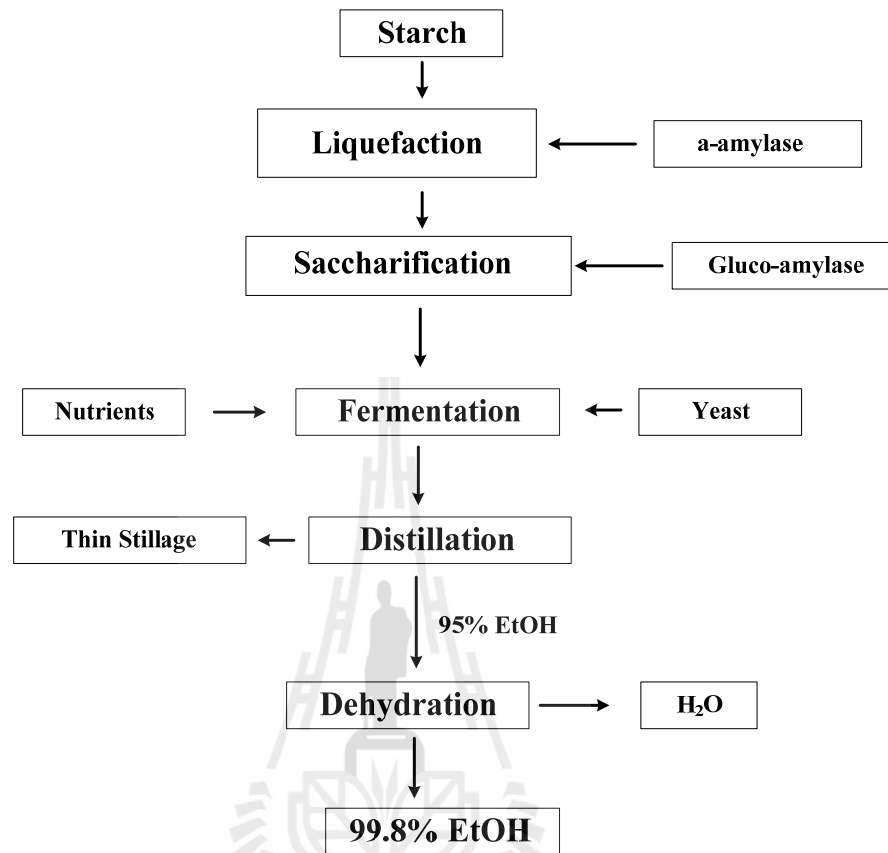
ไบโอเอทานอล เป็นแอลกอฮอล์สองคาร์บอนที่สามารถผลิตได้จากกระบวนการผ่านการหมัก อ้อย ชีวมวลแป้ง (ข้าวโพด) หรือชีวมวล cellulosic (วัสดุเหลือจากการเกษตรหรือป่าไม้) ไบโอเอทานอลสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการขนส่งและได้รับการอ้างอิงว่าเป็นพลังงานทดแทนสำหรับเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งสามารถช่วยบรรเทาปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและด้านพลังงาน ในปัจจุบัน ไบโอเอทานอลสามารถผลิตได้ผ่านการหมักด้วยยีสต์หรือแบคทีเรียของสารสกัดจากน้ำตาลอ้อยและข้าวโพด กระบวนการหมักแบบดั้งเดิมด้วยยีสต์ถูกจำกัดความเข้มข้นของเอทานอลไว้ที่ประมาณร้อยละ 10 โดยความเข้มข้นของเอทานอลที่ประมาณร้อยละ 10 จะทำให้การหมักสิ้นสุดลง เป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่เชื้อยีสต์หยุดกิจกรรมและตายไปในที่สุด (Haelssi *et al.*, 2008) เนื่องจากเอทานอลจะเข้าไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ให้สูญเสียคุณลักษณะในการควบคุมการเลือกผ่านสารเข้า-ออกเซลล์ ทำให้เซลล์ยีสต์ไม่สามารถนำเอาน้ำตาลเข้าเซลล์และเอาเอทานอลออกจากเซลล์ได้ ทำให้เซลล์ยีสต์ มีรายงานวิจัยหลายด้านที่พยายามจะเพิ่มปริมาณของเอทานอลจากการหมัก เช่นการพัฒนาเชื้อที่ทนต่อความเป็นพิษของเอทานอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยในการแยกเอทานอลออกจากน้ำหมักในระหว่างที่การหมักกำลังดำเนินไปโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่นการใช้ตัวทำละลายสกัดเอทานอลออกมา การใช้เยื่อแผ่น (pervaporation) และการอัดก๊าซ (gas stripping) เป็นต้น

สำหรับบทวรรณกรรมที่กล่าวถึงต่อไปนี้เป็นการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลัง (CFE) ขอบเขตของระบบการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลังถูกจัดทำขึ้นเพื่อให้เห็นความสำคัญการแลกเปลี่ยนของระบบกับสภาพแวดล้อมในแง่ของพลังงานที่ใช้และพลังงานที่ได้รับจากระบบแสดงดังในรูปภาพ 1 สำหรับระบบการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลังสามารถแบ่งงานออกเป็นสามส่วนงานหลักที่เกี่ยวข้องคือ (1) การเตรียมการเพาะปลูก/การดำเนินการ (2) การเปลี่ยนแปลงให้เกิดผลิตภัณฑ์เอทานอลและ (3) การขนส่ง

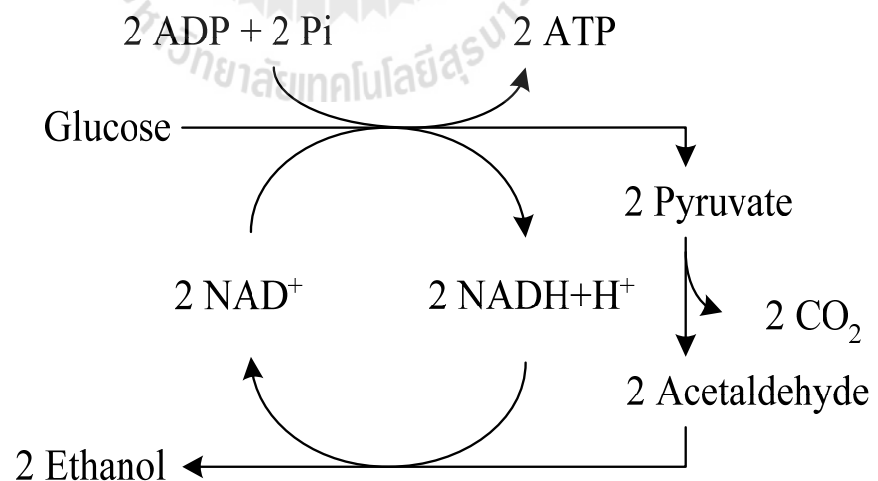
ในการเริ่มกระบวนการหมักจะทำการย่อยหัวมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -อะไมเลสรวมกับการเติมน้ำ ที่มีส่วนช่วยให้กระบวนการย่อยมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อให้โมเลกุลต่างๆในหัวมันสำปะหลังถูกย่อยเป็นน้ำตาลสายสั้นๆก่อนบางส่วน เพื่อที่จะให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถใช้วัตถุดิบได้ง่ายขึ้นและยังประหยัดเวลาในระบบได้อีกด้วย เริ่มกระบวนการย่อยโดยทำการปรับค่าความเป็นกรดค่าให้เป็น 6.0 ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และให้ความร้อนแก่สารละลายผสมที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ร่วมกับการเติม

เอนไซม์ลงไป เอนไซม์นี้จะทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพในการย่อย โดยที่มีการเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (liquefaction process) จากนั้นทำการทำสารละลายผสมเย็นลงอยู่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และปรับค่าความเป็นกรดต่างให้ได้ 4.0 อีกครั้งด้วยสารละลายเข้มข้น ในกระบวนการย่อยดังกล่าวยังไม่ถือว่าเสร็จสมบูรณ์เนื่องจากยังมีโมเลกุลใหญ่บางส่วนไม่สามารถย่อยได้ จะต้องมีการย่อยด้วยเอนไซม์กลูโคสไมเลสอีกครั้ง (saccharification) และทำการกรองเอาส่วนที่เป็นของเหลือหรือส่วนที่ไม่ต้องการออกไป จึงถือว่าเสร็จสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น และสำหรับแหล่งไนโตรเจนซึ่งเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อเชื้อยีสต์นั้นจะมีการใช้เพปโตนและสารสกัดยีสต์เพื่อส่งเสริมการเจริญและการสร้างผลิตภัณฑ์ของเชื้อยีสต์ โดยที่เชื้อยีสต์นั้นจะมีการเลี้ยงในอาหารที่เหมาะสมให้สามารถปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อมได้ จากนั้นจะมีการถ่ายเชื้อลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อบำบัดระบบการหมัก โดยมีการให้อากาศสำหรับเชื้อยีสต์ขึ้นต้นเพื่อการเจริญจากนั้นจะดำเนินกระบวนการหมักโดยสภาวะไม่ใช้อากาศเพื่อให้เชื้อยีสต์มีกระบวนการเมตาบอลิซึมเปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นเอทานอลที่เป็นผลผลิตสุดท้ายต่อไป เอทานอลที่มีอยู่ในน้ำหมักจะถูกนำไปกลั่นแบบลำดับส่วนเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ประมาณร้อยละ 95 โดยนำหนักก่อนที่จะนำไปแยกน้ำส่วนที่เหลือ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่ามีจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถผลิตเอทานอลได้เช่น *Kluyveromyces sp.* โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ซึ่งรู้จักกันดีในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ โดยที่ปฏิกิริยาการหมักเอทานอลจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในระบบไร้อากาศเกิดขึ้นจากการทำงานของเอนไซม์ Zymase โดยที่น้ำตาลกลูโคส 1 โมล จะผ่านวิถี Emben-Meyer ก่อนที่จะได้กรดไพรูวิก (pyruvic acid) ซึ่งต่อมาจะถูกเปลี่ยนไปเป็น Acetaldehyde โดยผลิตผลสุดท้ายที่เกิดขึ้นคือเอทานอลและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละ 2 โมลเท่า ๆ กัน นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวจะผลิต ATP ได้ 2 โมล รูปภาพ 2 แสดงวิถี Emben-Meyer ในการสลายกลูโคสได้เอทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการ



รูปภาพ 1 ระบบการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลัง (Nguyen *et al.*, 2007)



รูปภาพ 2 วิธี Emben-Meyer (Bailey and Ollis, 1986)

### 1.3 การหมักเอทานอล

ขั้นตอนการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์จะเริ่มขึ้นหลังจากที่กระบวนการหมักยุติลงโดยความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลในน้ำหมักจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 5 – 10 โดยน้ำหนัก น้ำหมักดังกล่าวจะถูกกลั่นโดยการให้ความร้อนจนได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนักและไม่สามารถทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้นไปอีกแล้วด้วยวิธีการกลั่นแบบธรรมดา โดยที่ของผสมเอทานอล/น้ำ ที่ความเข้มข้นนี้จะถูกเรียกว่าของผสมอะซีโอโทรป หรือ azeotropic solution การผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะต้องใช้ขั้นตอนพิเศษที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดของผสมอะซีโอโทรป ซึ่งไม่สามารถจะแยกน้ำออกได้อีกจากการกลั่นแบบธรรมดา โดยทั่วไปแล้วการกำจัดน้ำออกจากของผสมนี้สามารถทำได้ 3 วิธีใหญ่ ๆ คือ การกลั่นอะซีโอโทรป ส่วนระบบที่สองคือการใช้เยื่อแผ่นชนิดที่ขบนำซึ่งอาจจะเป็น pervaporation หรือ vapor permeation ก็ได้ ส่วนระบบที่สามคือ การใช้ molecular sieve

ตาราง 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอลบริสุทธิ์

สมบัติ	ค่า
สูตรโครงสร้าง	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$
มวลโมเลกุล	46
จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )	78.32
อุณหภูมิวิกฤต ( $^{\circ}\text{C}$ )	243.1
ความหนาแน่นที่ $20^{\circ}\text{C}$	0.7893 กรัม.ซม <sup>3</sup>
ความร้อนของการสันดาป, กิโลจูลต่อกิโลกรัม	29.68
อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง ( $^{\circ}\text{C}$ )	793.0

เอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) เป็นของเหลวใสไม่มีสี ถูกย่อยสลายได้ มีความเป็นพิษต่ำและเกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมน้อยถ้าเกิดการรั่วไหล เอทานอลเผาไหม้แล้วสามารถผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การผสมแอลกอฮอล์ลงในน้ำมันเบนซินเพื่อปรับปรุงค่า Oxygenates และออกเทนของน้ำมันเบนซินแทนสาร MTBE (Methyl Tertiaryl Butyl Ether) ซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายยากและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการใช้เอทานอลเป็นสารเพิ่มปริมาณออกซิเจนในแก๊สโซฮอล์ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในทางตรงกันข้าม จะลดปริมาณสารที่

ก่อให้เกิดมลพิษต่างๆ เช่น สารประเภทไฮโดรคาร์บอน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากออกซิเจนในเอทานอลที่ผสมอยู่ในแก๊สโซฮอล์นั้น จะช่วยให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์สมบูรณ์ขึ้น และส่งผลทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์จากท่อไอเสียลดลงได้ นอกจากนี้ น้ำมันที่ผสมแอลกอฮอล์สามารถสันดาปได้เร็ว ทำให้คาร์บอนหรือควันดำจากการเผาไหม้ลดลงได้ ส่งผลให้อากาศมีคุณภาพดีขึ้นและลดปัญหาสภาวะเรือนกระจกที่ทำให้โลกร้อน อีกทั้งเอทานอลเป็นสารที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ จึงสามารถลดปัญหาการนำเข้าจากต่างประเทศและช่วยประหยัดเงินตราให้ประเทศปีละหลายพันล้านบาท

ตาราง 2 มาตรฐานสหภาพยุโรปของเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง(ASTM International 2004)

Components	Unit	Min.	Max.	Test Method
Ethanol	wt%	98.7	-	EC/2807/2000 method I
Higher Saturated mono-alcohol	wt%	-	2	EC/2807/2000 method II
Methanol	wt%	-	1	EC/2807/2000 method III
Water	wt%	-	0.3	EN 15489
Inorganic chloride	mg/L	-	20	EN 15484
Copper	mg/kg	-	0.1	EN 15488
Total acidity (as acetic acid)	wt%	-	0.007	EN 15491
Phosphorus	mg/L	-	0.5	EN 154887
	mg/100		10	EC/2807/2000 method II
Nonvolatile material	mL	-		
	mg/kg	-	10	EN 15485, EN 15486
pH		6.5	9	EN 15490
Appearance	-	Clear and bright		Visual inspection

เอทานอลบริสุทธิ์สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้โดยการเติมผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วนเอทานอลที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่นเอทานอล 1 ส่วนต่อน้ำมัน 9 ส่วนเพื่อปรับเพิ่มค่าออกเทน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สโซฮอล์ E10 เป็นการลดปริมาณการใช้ น้ำมันเบนซิน



ลง สามารถลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้ เอทานอลผสมน้ำมันเชื้อเพลิงมีขายกันอย่างแพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกา ที่พบมากที่สุดคือน้ำมันร้อยละ 10 ผสมเอทานอลร้อยละ 90 (E10) ยานพาหนะต้องมีการปรับเปลี่ยนเครื่องยนต์ให้ทำงานได้เมื่อเติมน้ำมัน E10 และเฉพาะยานพาหนะที่สามารถปรับเปลี่ยนมีความยืดหยุ่น (flexible fuel vehicles) ที่สามารถใช้งานกับเชื้อเพลิง E85 นอกจากนี้เอทานอลบริสุทธิ์สูงมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆเช่น อุตสาหกรรมสี ยา เครื่องสำอาง น้ำหอม ฯลฯ นอกจากนี้แล้ว เอทานอลความบริสุทธิ์สูงหรือเอทานอลไร้น้ำ (anhydrous ethanol) ได้ดึงดูดความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมพลาสติกย่อยสลายได้ (biodegradables) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในเป็นสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยา esterification สำหรับการทำให้กรดแลคติกบริสุทธิ์จากน้ำหมักเพื่อนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิต Polylactic acid (PLA)

#### 1.4 จลนศาสตร์การหมักเอทานอล

ปัญหาในเชิงเทคนิคที่สำคัญในการทำให้ผลผลิตของเอทานอลต่ำนั้น เกิดมาจากเชื้อยีสต์ซึ่งจะอ่อนไหวต่อความเป็นพิษของเอทานอลมาก โดยที่เอทานอลความเข้มข้นเพียงร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนักก็จะเพียงพอที่จะทำให้ความสามารถในการหมักของเชื้อยีสต์ลดลง และที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ก็จะสามารถทำให้เชื้อยีสต์ตายลงได้ ซึ่งจะส่งผลในด้านลบต่อการพัฒนาการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นที่ทราบกันอยู่ทั่วไปว่าเอทานอลจะถูกดูดซับที่เยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อยีสต์ และจะทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ในส่วนที่เป็นฟอสโฟลิปิด (Phospholipid) และกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ส่งผลทำให้ความสามารถในการคัดเลือกผ่านสารของเยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียไป ทำให้เซลล์ยีสต์ตายไปในที่สุด ซึ่งจะเรียกว่าการยับยั้งจากผลิตภัณฑ์ (product inhibition) นอกจากนี้แล้วการใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สูงเกินไป ก็จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการยับยั้งจากสารตั้งต้นได้ (substrate inhibition) โดยการยับยั้งทั้งสองชนิดนี้ จะส่งผลโดยตรงถึงค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอล (specific volumetric productivity,  $v$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ของการยับยั้งดังสมการ (Lin *et al*, 2008);

$$v = v_{\max} \left( \frac{S}{K'_S + S + (S^2 / K'_i)} \right) \left[ \prod \left( 1 - \frac{P}{P'_m} \right) \right]^{a_i} \quad (1)$$

โดยที่  $v_{max}$  คือค่าผลิตผลจำเพาะสูงสุด (maximum specific volumetric productivity),  $S$  คือค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (substrate concentration),  $K_s$  คือค่าคงที่อิ่มตัว (saturation constant), และ  $K_i$  คือค่าคงที่ของการยับยั้งจากน้ำตาล (substrate inhibition constant),  $P$  คือความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (product concentration),  $P_m$  คือความเข้มข้นสูงสุดของเอทานอลที่เชื้อยีสต์สามารถทนได้ (maximum product concentration), และ  $a_i$  แสดงถึงค่าคงที่ที่เป็นเลขยกกำลังสำหรับการยับยั้งของผลิตภัณฑ์ (exponential constant of the inhibitory product) ตามลำดับ

### 1.5 การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมัก (Extractive Fermentation of ethanol)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ปัญหาหลักในการหมักเอทานอลคือการยับยั้งปฏิกิริยาของเชื้อยีสต์ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแนวความคิดที่จะทำการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากกระบวนการหมัก (extractive fermentation หรือ *in situ* product removal) ซึ่งจะเป็นการพัฒนากระบวนการหมักไปพร้อม ๆ กับการแยกผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลดีในด้านต่าง ๆ ดังนี้ 1.) ลดความเป็นพิษของเอทานอลที่มีต่อเชื้อยีสต์ลง จะทำให้เชื้อยีสต์สามารถผลิตเอทานอลได้มากขึ้น 2.) สมดุลของสมการจะไปข้างหน้าเนื่องจากการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากระบบอยู่ตลอดเวลา 3.) การสูญเสียผลิตภัณฑ์จะมีความลดลง และ 4.) เป็นการลดขั้นตอนของการผลิตโดยรวมลง (Mattiasson *et al.*, 1991) ซึ่งข้อได้เปรียบต่าง ๆ เหล่านี้จะนำไปสู่การลดขนาดของถังหมักลง (เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตผลของเอทานอลที่เท่ากัน) ทำให้สามารถลดต้นทุนทั้งต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรต่าง ๆ ลงได้ ได้มีการพัฒนาเทคนิคต่าง ๆ สำหรับการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากรู้น้ำหมักในระหว่างที่การหมักกำลังดำเนินไปอยู่นี้หลายเทคนิคโดยอาศัยสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจะแยกเป็นพื้นฐานในการพิจารณาเช่น ขนาด รูปร่าง จุดหลอมเหลว จุดเดือด ค่าความดันไอ ความสามารถในการละลาย ความชอบหรือไม่ชอบน้ำ (hydrophilic/hydrophobic property) และความเป็นประจุ เป็นต้น โดยตัวอย่างเทคนิคต่าง ๆ สามารถดูได้จากตาราง 3 นอกจากนี้การเลือกใช้วิธีการแยกให้เหมาะสมยังต้องพิจารณาถึงศักย์ทางเคมี (chemical potential,  $\chi_i$ ) อีกด้วย โดยที่ศักย์ทางเคมีนี้จะเป็ปัจจัยสำคัญในการกำหนดฟลักซ์หรืออัตราการถ่ายเทมวลสารต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (mass flux,  $J_i$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D_i$ ) และแรงขับ (driving force,  $d\chi_i/dy$ ) โดยเป็นไปตามกฎข้อแรกของ Fick ดังสมการ

$$J_i = -D_i \frac{d\chi_i}{dy} \quad (2)$$

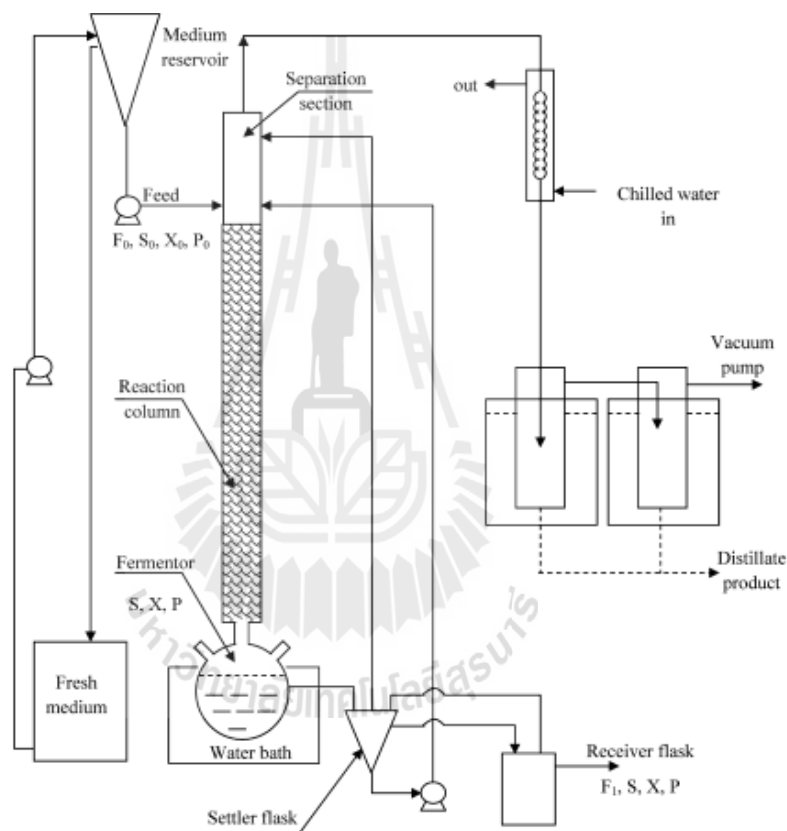
ซึ่งการออกแบบกระบวนการแยกผลิตภัณฑ์ควบคู่ไปกับกระบวนการหมักนั้น ปัจจัยหลักในการพิจารณาคือสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังแสดงในตาราง 3 สำหรับการแยกเอทานอลนั้นสามารถใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่นการพาโดยก๊าซ (stripping), การสกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (solvent extraction), เพอร์เว็ปออเรชั่น (pervaporation), เพอร์สแทรกชั่น (perstraction) และ การดูดซับ (adsorption) เป็นต้น

**ตาราง 3** ตัวอย่างการแยกผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพโดยอาศัยสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน (Lye *et al.*, 1999).

สมบัติทางกายภาพและเคมี (driving force)	ข้อสังเกต	ตัวอย่างระบบของการแยก
<b>สมบัติทางกายภาพ</b>		
ความสามารถในกลายเป็นไอ		การกลั่น (distillation) การพาโดยก๊าซ (stripping)
ขนาดและรูปร่าง		การใช้เยื่อแผ่น การปั่นแยก การกรอง
ความสามารถในการละลาย	มีการคัดเลือกต่ำ (low selectivity) แต่มีความจุสูง (high capacity)	การตกตะกอน การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ การตกผลึก
<b>สมบัติทางเคมี</b>		
การแสดงประจุ		การแลกเปลี่ยนประจุ Electrodialysis
ความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ	มีการคัดเลือกสูง (High selectivity) แต่มีความจุต่ำ (low capacity)	โครมาโตกราฟี การดูดซับ
อื่น ๆ		Affinity methods

### 1.5.1 การหมักแบบสุญญากาศ

การหมักแบบสุญญากาศเป็นเทคนิคที่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแยกผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพที่มีสมบัติในการระเหยได้ดีกว่าน้ำ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการลดความดันในถังปฏิกรณ์ชีวภาพลงจนกระทั่งทำให้น้ำหมักเดือด ณ อุณหภูมิที่ทำการหมักปกติ โดยจะเกิดไอของเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงแยกตัวออกมาจากน้ำหมัก ซึ่งสามารถควบแน่นภายนอกถังหมักได้



รูปภาพ 3 การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบสุญญากาศ (Nguyen *et al.*, 2011)

Nguyen *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาการแยกเอทานอลควบคู่กับระบบการหมักแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปภาพ 3 ซึ่งโดยใช้น้ำตาลกลูโคสความเข้มข้นสูง (350 กรัมต่อลิตร) เป็นแหล่งคาร์บอนหลัก ในขั้นตอนแรกได้ทำการเลี้ยงเชื้อยีสต์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการป้อนน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้นดังกล่าวแบบต่อเนื่องเข้าไปยังด้านบนของคอลัมน์ที่ต่อเข้ากับด้านบนของถังหมัก ซึ่งคอลัมน์นี้จะทำหน้าที่ในการเกิดปฏิกิริยาการหมักควบคู่กับการ

แยก ส่วนของเหลวที่ตกลงสู่ด้านล่างของคอลัมน์จะล้นออกจากถังหมักและถูกปั๊มกลับเข้าสู่ด้านบนของคอลัมน์ เพื่อทำปฏิกิริยาการหมักกับน้ำตาลกลูโคสที่ป้อนสู่คอลัมน์ ณ ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถแยกเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 33.2 โดยน้ำหนัก ออกจากระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานมากกว่า 250 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถลดการยับยั้งที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.5.2 การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการแยกสารชีวโมเลกุลโดยอาศัยหลักการของความสามารถในการละลายในตัวทำละลาย 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งปกติแล้วนั้น มักจะเป็นระบบของตัวทำละลายอินทรีย์กับน้ำ สำหรับการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์นั้น พบว่าไม่ค่อยประสบความสำเร็จมากนัก โดย Richard *et al.*, 2008 ได้ศึกษาการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นอัลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ ในการสกัดเอทานอล นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาความเป็นพิษของสารเหล่านี้ที่มีต่อเซลล์อีกด้วย โดยพบว่าอัลกอฮอล์หลายชนิดได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้แยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมัก แต่ปัญหาหลักของระบบดังกล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวหรือที่เรียกว่า distribution coefficient ที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากเอทานอลเป็นสารที่มีขั้ว ทำให้สามารถละลายในน้ำได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้แล้วตัวทำละลายอัลกอฮอล์ทุกชนิดมีความเป็นพิษต่อเซลล์สูง จึงทำให้ระบบดังกล่าวไม่ได้รับการพัฒนามากนัก

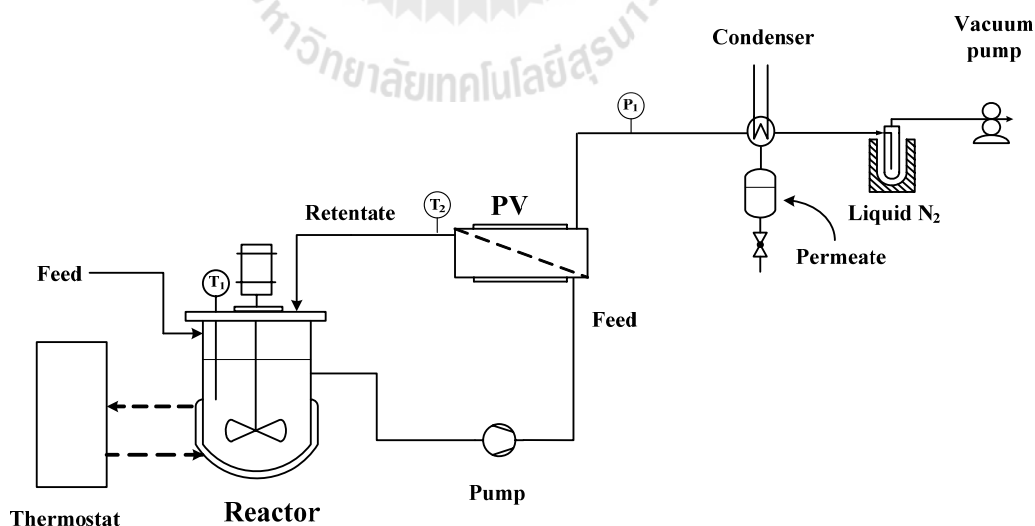
### 1.5.3 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนโดยใช้ระบบเพอร์เวปอเรชัน

เพอร์เวปอเรชันเป็นเทคนิคที่สามารถนำมาใช้ในการแยกเอทานอลควบคู่กับการหมักได้อย่างจึงทำให้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ซึ่งระบบเพอร์เวปอเรชันเป็นการแยกด้วยเยื่อแผ่นโดยอาศัยหลักการในความสามารถในการแพร่ในเยื่อแผ่นที่แตกต่างกันของสารที่ต้องการแยก ซึ่งไม่ถูกจำกัดเหมือนกับความสามารถในการระเหยตัว ดังเช่นในระบบการกลั่น สำหรับการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักนั้น สามารถทำได้โดยใช้เยื่อแผ่นชนิดที่ไม่ชอบน้ำหรือที่เรียกว่า hydrophobic membrane มาทำการแยกเอทานอลออกจากสารละลาย ซึ่งสามารถที่จะแยกเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงออกจากน้ำหมักได้อย่างต่อเนื่อง O'Brien *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาการแยกผลิตภัณฑ์เอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบเพอร์เวปอเรชัน (รูปภาพ 4) โดยใช้แหล่งคาร์บอนที่ได้จากการย่อยเซลลูโลสจากข้าวโพดด้วยกรดซัล

ฟูริก จากนั้นทำการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุ โดยผลการทดลองพบว่าสามารถทำการแยกเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 17 ออกจากน้ำหมักได้ ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลในด้านของสารป้อนมีเพียงร้อยละ 2.5 เท่านั้น

Chen *et al.*, 2012 ได้ทำการศึกษาการใช้เมมเบรนชนิด polydimethylsiloxane (PDMS) ในการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมัก โดยใช้น้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าสามารถทำการหมักได้ยาวนานมากกว่า 500 ชั่วโมง และสามารถแยกเอทานอลได้ความเข้มข้นร้อยละ 22 ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลในด้านของน้ำหมัก มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 5 ตามลำดับ

แต่อย่างไรก็ตาม การใช้เยื่อแผ่นในการสัมผัสกับน้ำหมักเป็นเวลานาน ๆ จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อแผ่นลดลง โดย Van de Bruggen *et al.*, 2011 ได้ทำการศึกษาถึงผลของการเติมสารที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหมักเอทานอลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแยกและค่าฟลักซ์ ของเมมเบรนชนิด PERVAP 4060 (Sulzer chemtech, Switzerland) และ Pervatech PDMS (Pervatech, Netherland) ซึ่งผลการทดลองพบว่าน้ำตาลและเกลือต่าง ๆ จะเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของเยื่อแผ่น เนื่องจากสมดุลวัฏภาคของของเหลวและไอ ที่เปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตาม 2,3 butanediol และกรดอินทรีย์ จะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแยกและค่าฟลักซ์ลดลง



รูปภาพ 4 การทดลองระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบเพอร์เวปพอร์ชัน (O'Brien *et al.*, 2004)

#### 1.5.4 การพาโดยก๊าซ (Gas stripping)

การพาโดยก๊าซเป็นกระบวนการแยกสารทางกายภาพชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นการใช้ก๊าซในการทำให้สารที่สามารถระเหยได้ การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นจากการแยกตัวจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว มักจะเป็นการแยกตัวของสารจากของเหลวไปยังก๊าซ สำหรับการประยุกต์ใช้ระบบดังกล่าวในการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักนั้น ยังไม่พบว่ามีการศึกษาแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตาม Frank *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาการแยกเอทานอลออกจากน้ำหมักในระดับโรงงานต้นแบบ โดยทำการบีมน้ำหมักเข้าไปในคอลัมน์ทางด้านบน จากนั้นป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางด้านล่างของคอลัมน์ในการพาเอทานอลออกจากน้ำหมัก โดยผลการทดลองพบว่าสามารถทำการหมักได้ต่อเนื่องยาวนานมากกว่า 60 วันและสามารถแยกเอทานอลความเข้มข้นประมาณร้อยละ 25 ออกจากถังหมักได้

### 1.6 หอกลับลำดับส่วนประสิทธิภาพสูง

#### 1.6.1 หลักการทั่วไป

แม้ว่าเอทานอลเป็นสารที่ระเหยง่าย แต่การกำจัดน้ำก็ทำได้ยากเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากจุดเดือดของเอทานอลและน้ำมีค่าที่ไม่ต่างกันมากนัก คือ 78 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ นอกจากนี้เอทานอลยังเป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี สามารถดูดความชื้นจากบรรยากาศได้ (hygroscopic) ระบบการกลั่นที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปเป็นการกลั่นแบบลำดับส่วนแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะต้องใช้จำนวนชั้นในการกลั่นมากกว่า 75 ชั้น ทำให้จำเป็นต้องสร้างหอกลับที่มีความสูงมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและดูแลรักษาลำบาก ทำให้การกลั่นขนาดเล็กไม่สามารถทำได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการการพัฒนาหน่วยการกลั่นแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

#### 1.6.2 การออกแบบชิ้นส่วนหอกลับ

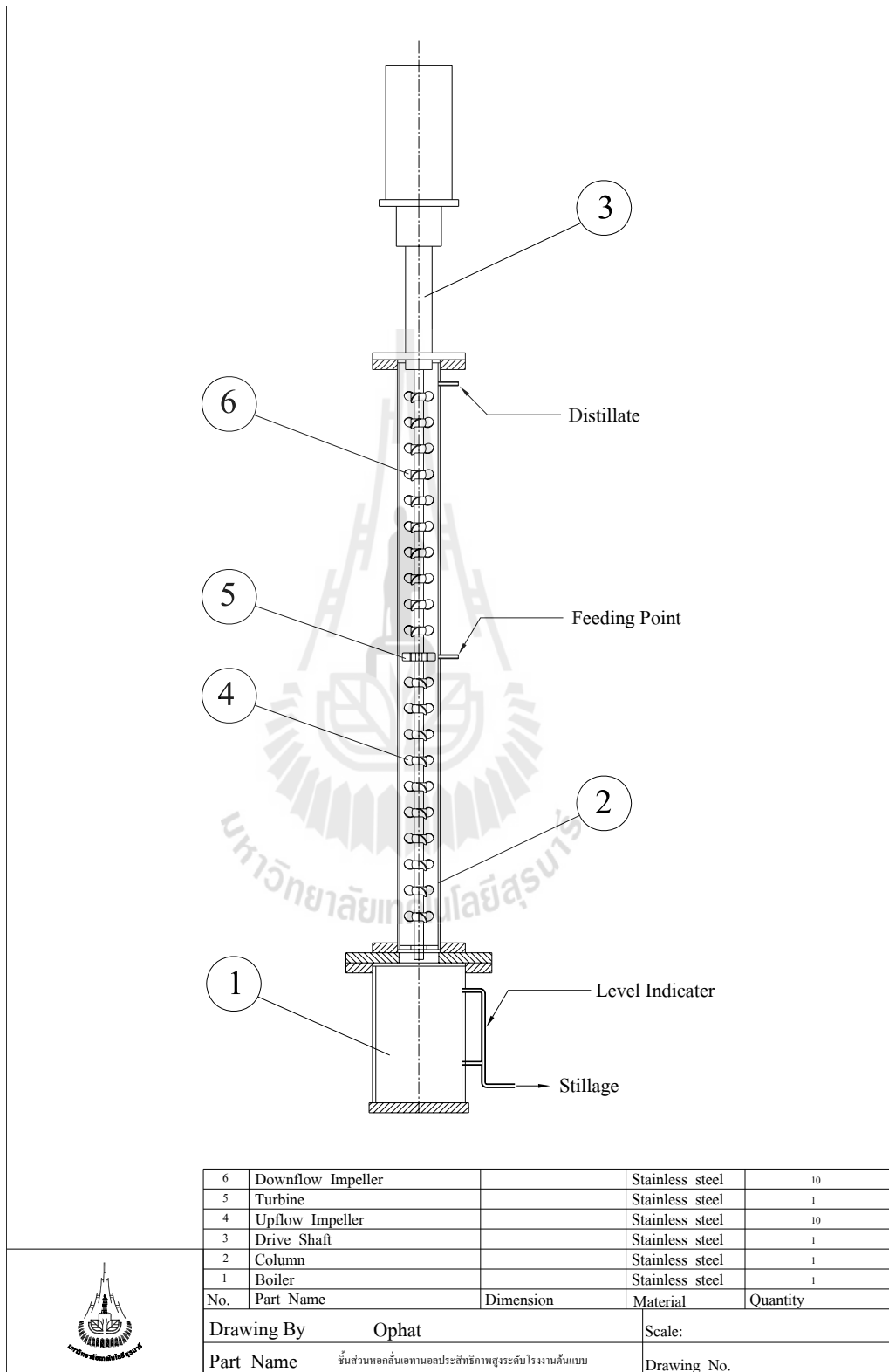
หอกลับเอทานอลแบบต่อเนื่องที่ได้ทำการออกแบบใหม่นี้ ประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ ออกเป็น 6 ส่วน ดังแสดงในรูปภาพ 5 คือ

- 1) หม้อต้ม (boiler) – ทำหน้าที่ในการให้ความร้อนหลักกับระบบ โดยผลิตจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ด้านล่างถูกปิดด้วยแผ่นสแตนเลส

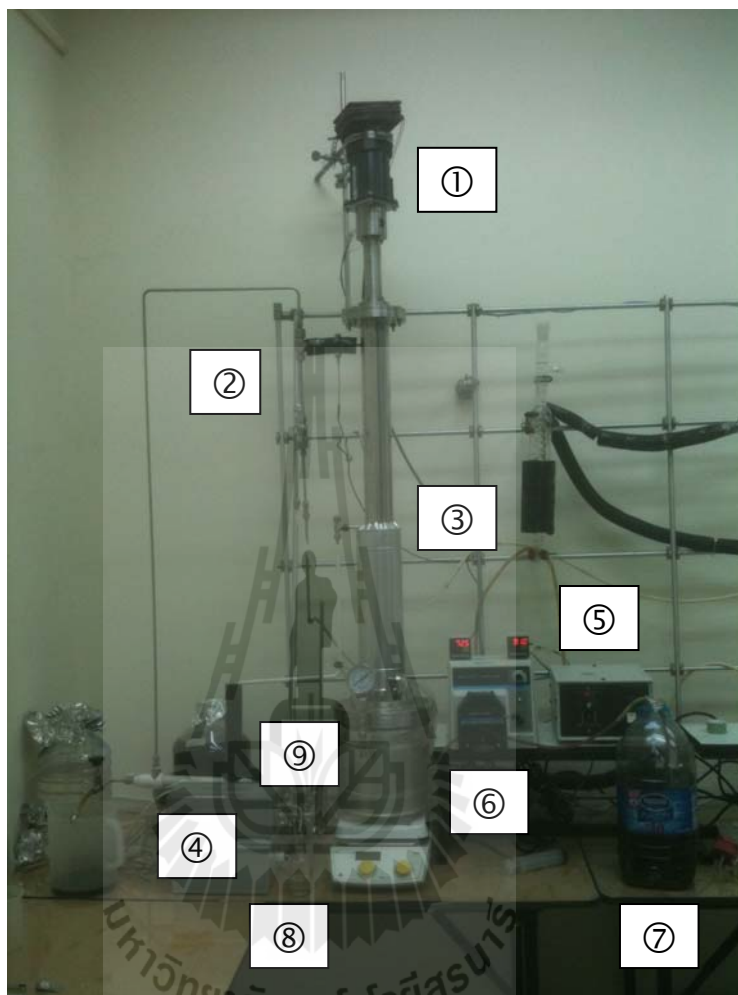
ขนาด  $15 \times 15$  เซนติเมตร เพื่อใช้สำหรับวางลงบนแผ่นให้ความร้อน (hot plate) ด้านบน เชื่อมกับหน้าแปลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร ด้านข้างหม้อต้มเชื่อมด้วยท่อโลหะ เพื่อให้สามารถมองเห็นระดับของของเหลวภายในหม้อต้มได้ (level indicator) ด้านล่าง มีรูระบายของเหลวออก เพื่อใช้ในกรณีที่ทำกรกลั่นแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้ฝาด้านบนของหน้าแปลนยังได้ทำเป็นช่อง สำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดอื่น ๆ เช่น มาตรวัดความดัน และ อุณหภูมิ เป็นต้น

- 2) คอลัมน์ (column) – ผลิตขึ้นจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.4 เซนติเมตร ยาว 89 เซนติเมตร ด้านบนเชื่อมด้วยหน้าแปลนขนาด 14 เซนติเมตร เพื่อต่อเข้ากับมอเตอร์และ แกนหมุน ส่วนด้านท้ายเชื่อมด้วยหน้าแปลนขนาด 14 เซนติเมตร เพื่อต่อเข้ากับหน้าแปลนของหม้อต้ม ตรงกลางของคอลัมน์มีท่อต่อเข้าสำหรับสารป้อน (feeding point) ส่วน ด้านบนของคอลัมน์ต่อเข้ากับช่องนำไอออก (distillate)
- 3) แกนหมุน (drive shaft) - เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดสำหรับการประดิษฐ์นี้ ด้านบนสุดทำเป็น สลัก เพื่อต่อเข้ากับมอเตอร์กระแสตรงขนาด 120 วัตต์ ที่ปรับความเร็วการหมุนได้ โดย แกนหมุนมีขนาด 1.4 เซนติเมตร ยาว 88.5 เซนติเมตร ด้านบนเชื่อมต่อกับหน้าแปลนขนาด 14 เซนติเมตร และมีประเก็นกันรั่ว (mechanical seal) โดยมีการออกแบบให้สามารถรับ แรงอัดได้สูงถึงความดัน 6 บรรยากาศ แกนหมุนนี้เมื่อประกอบเข้ากับคอลัมน์แล้ว จะอยู่ ณ จุดกึ่งกลางของคอลัมน์พอดี และจะทำหน้าที่ในการยึดใบพัด
- 4) ใบพัดในส่วนของ stripping section จะเป็นใบพัดที่มีทิศทางพัดให้ไอลอยขึ้นด้านบน (upward direction) ประกอบด้วยใบพัดเชิง 45 องศา จำนวน 3 ใบ หนา 1.5 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับปลอกแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.42 เซนติเมตร หนา 8 มิลลิเมตร ด้านข้าง เจาะรู สำหรับใช้เกลียวยึดใบพัดกับแกนหมุนให้แน่น โดยมีจำนวนใบพัดทั้งหมด 10 อัน และมีระยะห่างระหว่างตัวใบพัดที่เท่า ๆ กัน
- 5) ใบพัดสำหรับกระจายน้ำหมัก เพื่อให้การแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพสูงสุด โดย ใบพัดจะทำหน้าที่กระจายน้ำหมักที่ถูกฉีดเข้ามาจากจุดป้อนให้มีลักษณะเป็นละอองเล็ก ๆ กระจายไปทั่วด้านในของหอกกลั่น โดยเป็นแบบ 6-bladed disc turbine
- 6) ใบพัดในส่วนของ rectifying section จะมีลักษณะเดียวกันกับส่วนประกอบในข้อ 4 แต่จะมี มุมเอียง 135 องศา ทำหน้าที่ในการพัดไอให้มีทิศทางลง (downward direction) และเข้าหา ผนังด้านในของคอลัมน์ ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างส่วนควบแน่นและระเหยที่ดีที่สุด





รูปภาพ 5 ภาพวาดการออกแบบภายในของหอกลั่นแบบการปั่นผสมไอ



รูปภาพ 6 การทดลองระบบการกลั่นเอทานอลบริสุทธิ์แบบต่อเนื่องจากน้ำหมัก (Boontawan A., 2553): 1, มอเตอร์; 2, เครื่องควบคุมแรงดัน; 3, ทางเข้าหอกกลั่น; 4, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน; 5, เครื่องควบคุมความเร็วรอบของการหมุน; 6, ปั๊มด้านสายป้อน; 7, สายป้อน; 8, ฟิลเตอร์เอทานอล; 9, หม้อต้ม

ในการออกแบบชิ้นส่วนของหอกกลั่นประสิทธิภาพสูงนี้ ได้มีการออกแบบระบบการกลั่นให้มีประสิทธิภาพในการแยกสารที่สูงมาก ซึ่งภายในหอกกลั่นจะมีลักษณะเป็นท่อกลวง และมีการเพิ่มระบบการปั่นผสมไอและของเหลวควบแน่นด้วยใบพัดที่อยู่ภายในหอกกลั่น ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วรอบในการหมุนได้ น้ำหมักจะถูกป้อนเข้า ณ จุดกึ่งกลางของท่อ ก่อนที่เอทานอลจะ

แยกตัวลอยขึ้น ด้านบน โดยไอร้อนที่ลอยขึ้นมาจะถูกใบพัด พัดให้เข้ากับผนังด้านในของท่อหอก  
 ล้น ทำให้เกิดการควบแน่นบางส่วน ในขณะที่ไอร้อนที่ถูกพัดตามมาจากด้านล่างจะทำให้เกิดการ  
 ระเหยของของเหลวเพิ่มขึ้น และเกิดการผสมกันระหว่างไอและของเหลว ทำให้เกิดสมดุลระหว่าง  
 การควบแน่นและการกลายเป็นไอที่รวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการแยกที่สมบูรณ์ภายในหอกล้น ซึ่งหาก  
 เทียบประสิทธิภาพที่เท่ากันแล้ว ความสูงของหอกล้นที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ จะสั้นกว่าหอกล้นแบบชั้น  
 เป็นอย่างมาก ทำให้ประหยัดพลังงานในการกลั่นลงได้มาก และเนื่องจากการออกแบบที่ไม่มี  
 ชั้นภายในหอกล้น จึงเป็นการกำจัดปัญหาในการที่มีของเหลวตกค้างอยู่ภายในชั้นของหอกล้น ได้  
 อีกด้วย

### 1.7 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล

จากการที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะต้องใช้ขั้นตอน  
 พิเศษที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดของผสมอะซีโอโทรป ซึ่งไม่สามารถจะแยกน้ำออกได้อีกจากการ  
 กลั่นโดยปกติ ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปแล้วการกำจัดน้ำออกจากของผสมนี้ในระดับอุตสาหกรรมสามารถ  
 ทำได้ 3 วิธีใหญ่ ๆ คือ การกลั่นอะซีโอโทรป (Azeotrop distillation) ซึ่งจะมีการเติมสารเคมีพวก  
 Benzene หรือ Cyclohexane เพื่อทำให้ความดันไอของระบบลดลง ก่อนที่จะใช้ความร้อนในการ  
 กลั่นอีกครั้งหนึ่ง ในปัจจุบันระบบนี้จะใช้ต้นทุนการผลิตสูงทำให้ไม่คุ้มค่ากับการลงทุนเนื่องจาก  
 ต้องทำการกลั่นถึงสองครั้ง นอกจากนี้แล้วสารเคมีที่เติมไปนั้น เป็นสารก่อมะเร็ง จึงมีปัญหาเรื่อง  
 ความกังวลต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานเป็นอย่างมาก ส่วนระบบที่สองคือการใช้เยื่อแผ่นชนิดที่ชอบ  
 น้ำซึ่งอาจจะเป็น pervaporation หรือ vapor permeation ก็ได้ โดยเยื่อแผ่นชนิดนี้จะยอมให้น้ำผ่าน  
 ได้ดีกว่าเอทานอล ส่วนระบบที่สาม คือ การใช้ molecular sieve ซึ่งทำจากสารพวกซิลิกา มาบีบอัด  
 และให้ความร้อนจะเกิดเป็นรูพรุนข้างในมีขนาดเล็กประมาณ 3 อังสตรอมซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า  
 โมเลกุลของน้ำ แต่มีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของเอทานอล ทำให้น้ำสามารถเข้าไปอยู่ในรูเหล่านี้ได้  
 ในขณะที่เอทานอลจะมีขนาดใหญ่กว่าและจะออกจากระบบไป เนื่องจากว่าปริมาณของรูที่สามารถ  
 กักกันน้ำได้นี้มีจำกัด ดังนั้นถ้าความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนมีมากเกินไป ก็จะทำให้เกิดจุดอิ่มตัวเร็ว  
 ต้องทำการ regenerate บ่อยครั้ง ประสิทธิภาพการทำงานก็จะลดลง

### 1.7.1 การแยกโดยใช้เยื่อแผ่น

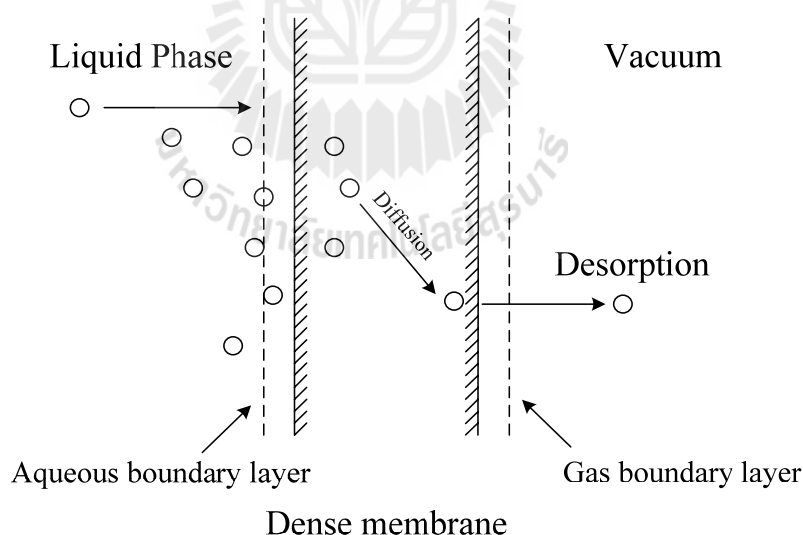
กระบวนการทางเยื่อแผ่นกลายเป็นสิ่งที่ได้รับการค้นคว้าวิจัยอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากระบบนี้มักจะใช้พลังงานน้อยกว่าวิธีการแยกแบบอื่น เช่น การกลั่น การซึมผ่านของแก๊สโดยใช้เยื่อแผ่นมีการใช้อย่างแพร่หลายในการแยกสารผสม เช่น ออกซิเจน/ไนโตรเจน ไฮโดรเจน/คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน/ไนโตรเจนและอื่น ๆ ระบบการทำงานของเยื่อแผ่นสำหรับการแยกแก๊สเหล่านี้เป็นแบบอุณหภูมิคงที่ (isothermal) เพราะจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเกิดขึ้น และมีหลายประเภทที่เป็นระบบเยื่อแผ่นของเหลว

Pervaporation (PV) และ vapor permeation (VP) คือกระบวนการเยื่อแผ่นที่เหมาะสมสำหรับการแยกสารผสมอินทรีย์หลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแยกสารออกจากจุดอะซีโอโทรปที่ไม่สามารถใช้เทคนิคการกลั่น กระบวนการเยื่อแผ่นทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิดแตกต่างกันเพียงสายป้อนของระบบแรกอยู่ในเฟสของเหลว และระบบหลังสารสายป้อนต้องอยู่ในรูปเฟสไอตามลำดับ ในขณะที่อัตราการซึมผ่านในทั้งสองระบบเป็นไอ แรงขับเคลื่อนทางอุณหพลศาสตร์สำหรับการขนส่งวัสดุที่ผ่านเยื่อแผ่นแบบไม่มีพอรุนจะได้รับโดยความแตกต่างด้านศักย์ทางเคมี (chemical potential) ของส่วนประกอบที่ซึมผ่านระหว่างด้านป้อนและด้านเพอมีเอท ซึ่งการแยกมักจะประสบความสำเร็จที่ความดันด้านเพอมีเอทต่ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบ pervaporation และระบบ vapor permeation พบว่าระบบ vapor permeation มีความได้เปรียบกว่าที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้นระหว่างด้านสายป้อนและด้านเพอมีเอท ปัญหาในเรื่องของการเพิ่มพลังงานเพื่อให้สารเกิดการระเหยก็ถูกหลีกเลี่ยงไป สำหรับสภาพการทำงานที่เหมือนกัน ของผสมด้านสายป้อนในระบบ pervaporation และสมดุลของไอด้านสายป้อนในระบบ vapor permeation มีความสอดคล้องกันของลักษณะการซึมผ่านคือ การซึมผ่านได้ของสารทั้งสองระบบสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีความแตกต่างของศักย์เคมีระหว่างทั้งสองด้านของเยื่อแผ่น (Schehlmann *et al.*, 1995)

ในปัจจุบัน ระบบ pervaporation (PV) ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการแยกที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและถูกเลือกใช้อย่างมากสำหรับการแยกผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้และการแยกน้ำจากสารเคมีอินทรีย์ นอกจากนี้การผลิตและอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเกิดเป็นคู่กับ PV เช่น เครื่องปฏิกรณ์ PV Pervaporation เกี่ยวกับการใช้สายป้อนที่เป็นของเหลวในการผลิตไอเพอมีเอท และของเหลว retentate การแยกของสารองค์ประกอบสองสารหรือมากกว่าในเยื่อแผ่นในกระบวนการ

pervaporation จะเกิดขึ้น โดยความแตกต่างของอัตราการแพร่ผ่านพอลิเมอร์บาง ๆ และการเปลี่ยนเฟสระเหยเทียบได้กับขั้นตอนแฟลชแบบง่าย สารสามารถซึมผ่านเยื่อแผ่นได้เนื่องจากความเข้มข้นและความดันไอที่แตกต่าง ความดันสูญญากาศถูกนำไปใช้ในด้านเพอมีเอทควบคู่กับการควบแน่นของไอเพอมีเอท

กลไกพื้นฐานของกระบวนการ pervaporation คือ การถ่ายเทองค์ประกอบหนึ่งๆผ่านเยื่อแผ่นไม่มีรูพรุน (non-porous) สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่-การละลาย ดังแสดงในรูปภาพ 7 ซึ่งประกอบด้วยสามขั้นตอนหลักดังนี้ ขั้นตอนแรกเกี่ยวข้องกับการละลายหรือการดูดซับของสารเข้าสู่เยื่อแผ่น ขั้นตอนที่สองคือการแพร่กระจายของสารผ่านเยื่อแผ่นเนื่องจากความแตกต่างของความดัน หรือความแตกต่างของความเข้มข้น ขั้นตอนสุดท้ายคือขั้นตอนการคายออก (desorption) หรือการระเหยของสารในรูปของไอทางด้านเพอมีเอท ซึ่งสามารถที่จะเป็นไอภายใต้สูญญากาศหรือก๊าซเฉื่อยก่อนที่จะถูกจัดเก็บอยู่ใน cold trap การแยกสารของเหลวผสมสามารถทำได้ประสบความสำเร็จขึ้นอยู่กับการเลือกของเยื่อแผ่นทั้งอัตราการซึมผ่านที่สูงและการเลือกผ่านที่ดี



รูปภาพ 7 รูปภาพหลักการทำงานของการทำงานของการแยกสารด้วยเทคนิค pervaporation (Huang, 1991)

ในระบบ PV ด้านสายป้อนอยู่ในรูปแบบของของเหลว ในขณะที่สายป้อนถูกนำไปใช้เป็นเฟสไอสำหรับระบบ VP ในระบบ VP เพียงแค่มีการซึมผ่านเยื่อแผ่นก็สามารถแยกส่วนประกอบของสารได้ ดังนั้นปัญหาของการจัดหาความร้อนของการกลายเป็นไอก็สามารถหลีกเลี่ยงได้

นอกจากนี้ระบบน่าจะเหมาะสมสำหรับการแยกน้ำออกจากกระบวนการกลั่นแบบลำดับส่วนที่ ด้านบนของคอลัมน์การกลั่น ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไอด้านสายป้อนสามารถส่งไปยังโมดูลเยื่อแผ่นได้โดยตรง

ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำออกจากไอผสมนั้นสามารถแสดงได้ 2 อย่างคือค่าฟลักซ์ ( $J$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$J = \frac{W}{At} \quad (2)$$

โดยที่  $W$  หมายถึงน้ำหนักของเพอมีเอทที่ได้ (กิโลกรัม),  $t$  เป็นเวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง) และ  $A$  หมายถึงพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ใช้ (ตารางเมตร) ดังนั้นหน่วยของฟลักซ์ก็คือ กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรนั่นเอง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแยก (separation factor,  $\alpha$ ) นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha = \frac{w_{P,water}/w_{f,water}}{w_{P,ethanol}/w_{f,ethanol}} \quad (3)$$

โดยที่  $w_f$  และ  $w_p$  คือสัดส่วนน้ำหนักของน้ำและเอทานอลในส่วนของสารป้อนและเพอมีเอทตามลำดับ การถ่ายเทมวลของสารบนพื้นฐานแบบจำลองของสารละลาย-การแพร่ ในระบบ pervaporation สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (4)

$$m_{i,p} = A \cdot Q_i \cdot \Delta p_i \quad (4)$$

โดยที่  $A$  คือพื้นที่ของเยื่อแผ่น ( $m^2$ )

$Q_i$  คือ permeance ( $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ )

$\Delta p_i$  คือแรงขับเคลื่อนผ่านเยื่อแผ่น (Pa) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (5)

$$\Delta p_i = x_{i,f} \cdot P_f - x_{i,p} \cdot P_p \quad (5)$$

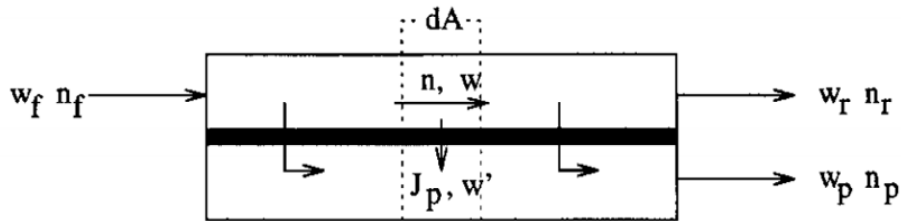
- โดยที่  $x_{i,f}$  คือสัดส่วนโดยโมลของสาร I ในส่วนของสายป้อน
- $\gamma_i$  คือสัมประสิทธิ์ของแอกติวิตี้ของสาร  $i$  ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของ UNIQUAC
- $p_i^*$  คือความดันไออิ่มตัวของสาร  $i$  ซึ่งสามารถหาได้โดยสมการของ Antoine
- $x_{i,p}$  คือเศษส่วนโมลของสาร  $i$  ในด้านเพอมีเอท
- $P_p$  คือความดันด้านเพอมีเอท ตามลำดับ (Ried, R.C. *et al.*, 2000).

สำหรับระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น  $\Delta p_i$  ในสมการที่ (5) คือความแตกต่างของความดันไอย่อยของสาร  $i$  ระหว่างด้านสายป้อน ( $p_{i,f} = x_{i,f}P_p$ ) และด้านเพอมีเอท ( $p_{i,p} = x_{i,p}P_p$ ) โดยที่  $P_p$  คือความดันรวมด้านสายป้อน ในการแยกน้ำออกจากของผสมเอทานอล/น้ำ สามารถแยกได้สำเร็จทั้งในระบบ VP และ PV และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ PV และ VP ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระบบ VP มีข้อได้เปรียบที่ดีกว่าในเทอมของประสิทธิภาพการแยก (Boontawan *et al.*, 2007)

### 1.7.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

สำหรับโมดูลการซึมผ่านไอน้ำต่อไปนี้จะถูกใช้โดยแบบจำลองการแพร่ (Torbjorn *et al.*, 1995) : ปัญหาหลักในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการซึมผ่านไอคือการอธิบายการขนส่งมวลผ่านเยื่อแผ่น เหตุผลก็คือการ coupling ระหว่างคุณสมบัติของการขนส่งของประเภทสารที่แตกต่างกันแสดงในสายด้านป้อน เช่นการซึมผ่านของแต่ละองค์ประกอบขึ้นอยู่กับความเข้มข้น การซึมผ่านยังขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิในระบบ สมมติฐานหลักในการออกแบบจำลองนี้คือ

1. ความดันตกคร่อมทางด้านของพื้นผิวเยื่อแผ่นไม่มีความสำคัญ
2. อุณหภูมิในโมดูลเยื่อแผ่นคงที่
3. การไหลผ่านด้านสายป้อนของเยื่อแผ่นเป็นแบบ Plug - flow
4. อัตราการซึมผ่านของเยื่อแผ่นเป็นแบบ Cross - flow



รูปภาพ 8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และลักษณะการถ่ายเทมวลภายในระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น (ดัดแปลงจาก Pettersen, 1995)

รูปภาพ 6 แสดงให้เห็นภาพอย่างง่ายของโมดูลการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นสำหรับการแยกของผสมสองชนิด (binary mixture) การเปลี่ยนแปลงในอัตราการผลิตของมวล ( $n$ ) ทางด้านสายป้อนของพื้นที่เยื่อแผ่น ( $A$ ) มีการแสดงออกโดยการไหลซึมผ่านรวม ( $J_p$ )

$$\frac{dn}{dA} = -J_p \quad (6)$$

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางด้านสายป้อนของเยื่อแผ่นอาจจะได้รับจากสมมูลมวลที่เกี่ยวข้องกับการซึมผ่านของส่วนประกอบที่เร็วที่สุด

$$\frac{dw}{dA} = \frac{J_p (r-w)}{n} \quad (7)$$

ด้วยการไหลข้าม (cross-flow) ทางด้านเพอมีเอทของเยื่อแผ่น องค์ประกอบของสารด้านเพอมีเอทจึงไม่ได้รับผลกระทบจากรูปแบบการไหล (ตัวอย่างเช่น การไหลร่วม (co-current flow) หรือการไหลสวนทาง (counter-current flow)) และองค์ประกอบของการซึมผ่านไอผ่านเยื่อแผ่นอาจจะกำหนดไว้ในเทอมของการเลือกผ่านเยื่อแผ่น ( $\alpha$ )

$$w' = \frac{\alpha w}{1+w(\alpha-1)} \quad (8)$$



ถ้าโมเดลสามารถใช้ได้สำหรับการคำนวณ  $\alpha$  และ  $I_p$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับส่วนประกอบของสารด้านสายป้อน สมการ (6)-(8) อาจมีการแก้ปัญหาในการหาค่าได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์แก้ปัญหาอาจจะได้รับ โดยมีเงื่อนไขว่าสมมติฐานนั้นจะต้องมีความเหมาะสมเกี่ยวกับคุณสมบัติการขนส่งของ  $\alpha$  และ  $I_p$

### 1.7.3 การศึกษาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

การกระจายของส่วนประกอบของทั้งสองสายผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะประเมินประสิทธิภาพของการแยกในระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น โดยเป็นการรวมสองสมการสมดุลมวลความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของสารด้านสายป้อนที่มีอยู่เดิมและองค์ประกอบสารด้านป้อนที่ได้มา

$$\frac{dn}{dw} = \frac{\frac{dn}{dA}}{\frac{dw}{dA}} = \frac{-n}{w - \alpha w / (1 + w(\alpha - 1))} \quad (9)$$

สมการที่ (9) สามารถแยกเป็นสมการใหม่และจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$-\int_{n_f}^{n_r} \frac{dn}{n} = \int_{w_f}^{w_r} \frac{dw}{w - \alpha w / (1 + w(\alpha - 1))} \quad (10)$$

เทอมที่อยู่ด้านซ้ายมือของสมการที่ (10) เป็นเทอมเล็ก ๆ และสามารถนิยามเป็น module cut rate ( $\theta$ ) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลด้านเพอมีเอทและอัตราการไหลด้านสายป้อน แสดงดังสมการที่ (11)

$$\theta = \frac{n_p}{n_f} = 1 - \exp\left(\int_{w_f}^{w_r} \frac{dw}{w - \frac{\alpha w}{1 + w(\alpha - 1)}}\right) \quad (11)$$

ส่วนด้านขวามือของสมการ (11) ยังอยู่ในรูปแบบของอินทิกรัล และเพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการวิเคราะห์การตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับการเลือกผ่านเยื่อแผ่นซึ่งเป็นฟังก์ชันกับส่วนประกอบของสารด้านสายป้อนที่มีอยู่เดิมก็มีความจำเป็น พฤติกรรม monotonic นี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบอาจจะมีการระบุโดยค่าคงที่เฉลี่ยของการเลือกผ่านเยื่อแผ่น  $\bar{\alpha}$

$$\bar{\alpha} = \frac{\int_{w_f}^{w_r} \alpha(w) dw}{w_r - w_f} \quad (12)$$

ถ้าแสดงความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงระหว่าง  $\ln \alpha$  และส่วนประกอบของสารด้านสายป้อน  $w$  อาจจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (12) ซึ่งเป็นค่าลอกการิทึมการเลือกผ่านเยื่อแผ่นเฉลี่ย (the logarithmic mean membrane selectivity);

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha(w_r) - \alpha(w_f)}{\ln \frac{\alpha(w_r)}{\alpha(w_f)}} \quad (13)$$

ซึ่งค่าคงที่การเลือกผ่านเยื่อแผ่นสามารถหาได้จากสมการที่ (13) และเมื่อแทนค่าลงในสมการ (11) จะได้

$$\theta = 1 - \exp\left(\frac{1}{\bar{\alpha} - 1} \left(\ln \frac{w_r}{w_f} - \bar{\alpha} \ln \frac{1 - w_r}{1 - w_f}\right)\right) \quad (14)$$

ความเข้มข้นของสารด้านสายเพอมีอิตสามารถหาได้จากสมการรวมรอบๆ โมดูลเยื่อแผ่นดังนี้

$$w_p = \frac{w_f - (1 - \theta)w_r}{\theta} \quad (15)$$

จากสมมติฐานที่ว่าค่าการเลือกผ่านเยื่อแผ่นคงที่ตามพื้นผิวของเยื่อแผ่นและค่าความสามารถในการระเหยได้ (relative volatility) คงที่ในขั้นตอนการกลั่น ถ้าเราพิจารณาสาย retentate  $\theta$  อาจจะแสดงในรูปของ recovery ของ retentate และความบริสุทธิ์ของ retentate ดังนี้:

$$\theta = 1 - r_r \left(\frac{1 - w_r}{1 - w_f}\right) \quad (16)$$

จากการแก้สมการที่ (14) และแทนค่าการเลือกผ่านเยื่อแผ่นเฉลี่ยลงในสมการที่ (16) เราจะได้

$$\bar{\alpha} = \frac{\ln \left( \frac{r \frac{1-w_f w_r}{1-w_r w_f}}{r} \right)}{\ln r_r} \quad (17)$$

การแสดงออกที่คล้ายกันอาจจะมาจากที่เกี่ยวกับความบริสุทธิ์และ recovery ในสายเพอมีเอท ในกรณีนี้ สามารถแสดงในทอม ของ recovery ในสายเพอมีเอท ( $r_p$ ) และความบริสุทธิ์ของสารใน ด้านเพอมีเอท ( $w_p$ ) ได้ดังนี้

$$\theta = r_p \left( \frac{w_f}{w_p} \right) \quad (18)$$

ความสัมพันธ์ของค่าการเลือกผ่านเยื่อแผ่นเฉลี่ยที่จำเป็นกับค่า recovery ในสายเพอมีเอท ( $r_p$ ) และความบริสุทธิ์ของสารในด้านเพอมีเอท ( $w_p$ ) ในระบบเยื่อแผ่นชั้นตอนเดียวแสดงดังสมการที่ (19)

$$\bar{\alpha} = \frac{\ln(1-r_p)}{\ln \left( \frac{1-r \frac{1-w_p w_f}{1-w_r w_p}}{r} \right)} \quad (19)$$

พื้นที่เยื่อแผ่นซึ่งจะต้องใช้ในขั้นตอนของกระบวนการแยกสารเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดจะมีผลกระทบที่สำคัญเกี่ยวกับค่าใช้จ่าย อาจจะสังเกตได้จากสมมูลมวลรวมในสมการที่ (6) พื้นที่เยื่อแผ่นที่ต้องการมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับฟลักซ์การซึมผ่านรวม โดยการจัดเรียงสมการที่ (6) พื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องการแสดงออกดังนี้

$$A = - \int_{n_f}^{n_r} \frac{dn}{J_p} \quad (20)$$

ดังนั้นเราจึงเสนอให้ใช้ฟลักซ์การซึมผ่านรวมเฉลี่ย ( $\bar{J}_p$ ) กำหนดเป็นค่าเฉลี่ยลอการิทึมระหว่างค่าของ  $J_p$  ที่ทางเข้าของสารป้อนของโมดูลและค่าของ  $J_p$  ที่ทางออกด้านretentate ของโมดูล

$$\bar{J}_p = \frac{J_p(w_f) - J_p(w_r)}{\ln \frac{J_p(w_f)}{J_p(w_r)}} \quad (21)$$

จากสมการที่ (20) สามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$A = \frac{n_f \theta}{J_p}$$

$$A = \frac{n_f \left[ 1 - \exp \left( \frac{1}{\alpha - 1} \left( \ln \frac{w_r}{w_f} - \bar{\alpha} \ln \frac{1 - w_r}{1 - w_f} \right) \right) \right]}{\frac{J_p(w_f) - J_p(w_r)}{\ln \frac{J_p(w_f)}{J_p(w_r)}}} \quad (22)$$

module cut rate สามารถหาได้จากสมการที่ (14) ให้สังเกตว่าพื้นที่เยื่อแผ่นที่ต้องการเป็นสัดส่วนกับอัตราการไหลด้านสายป้อน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานของการไหลแบบ plug - flow ในด้านสายป้อนของเยื่อแผ่น และไม่คิดความดันตกคร่อมตามพื้นผิวเยื่อแผ่น

รายชื่อสัญลักษณ์

$A$  คือพื้นที่ของเยื่อแผ่น membrane area ( $m^2$ )

$w$  สัดส่วนมวลที่ซึมเข้าไปได้มากที่สุด

$w'$  สัดส่วนมวลของสารส่วนที่ซึมเข้าไปได้มากที่สุดในด้านเพอมีเอท

$J_p$  ฟลักซ์การซึมผ่านรวมข้ามเยื่อแผ่น ( $kg.m^{-2} h^{-1}$ )

$\bar{J}_p$  ฟลักซ์การซึมผ่านรวมเฉลี่ยจากสมการ 21 ( $kg.m^{-2} h^{-1}$ )

$n$  อัตราการไหลของมวล ( $kg.h^{-1}$ )

$r_p$  recovery การซึมผ่านที่เร็วที่สุดของสารในสายเพอมีเอท ( $r_p = \theta w_p/w_f$ )

$r_r$  recovery การซึมผ่านที่ช้าที่สุดของสารในสาย retentate ( $r_r = (1 - \theta) \left( \frac{1 - w_r}{1 - w_f} \right)$ )

$\alpha$  การเลือกผ่านเยื่อแผ่น  $\alpha = w'/w \cdot (1 - w)/(1 - w')$

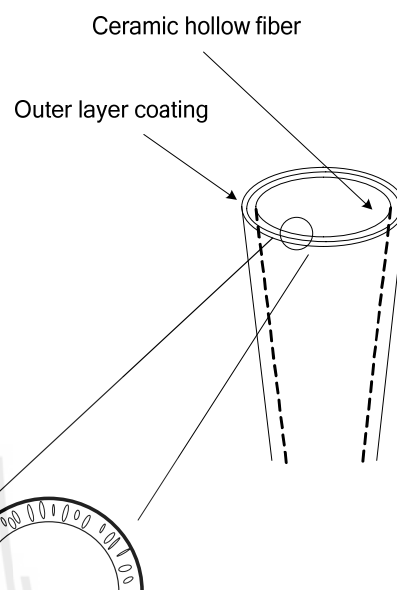
$\bar{\alpha}$  การเลือกผ่านเยื่อแผ่นเฉลี่ย

$\theta$  module cut rate ( $\theta = n_p/n_f$ )

#### 1.7.4 เยื่อแผ่นสำหรับการกำจัดน้ำออกจากสารละลายเอทานอล

หลักการที่สำคัญในการผลิตเยื่อแผ่นสำหรับเชื้อเพลิงเอทานอลคือ การทำให้เยื่อแผ่นนั้นมีความชอบน้ำมากกว่าเอทานอล (hydrophilic) โดยวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปเยื่อแผ่นนั้น อาจจะเป็นพอลิเมอร์หรือเซรามิกก็ได้ ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นชนิดเซรามิก (ceramic membrane) กันอย่างแพร่หลายและมีข้อได้เปรียบที่สำคัญกว่าเยื่อแผ่นพอลิเมอร์คือมีความคงตัวเชิงกล (mechanical stability) ที่สูงมาก โดยสามารถทำให้มีสมบัติเป็น molecular sieve ได้เช่นเดียวกับตัวดูดซับที่ใช้ในระบบดูดซับแบบสลับความดัน (pressure swing adsorption, PSA) ซึ่งจะทำให้สามารถแยกน้ำออกจากเอทานอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ต้องทำการ regeneration ระบบเมื่อเทียบกับการดูดซับแบบสลับความดัน นอกจากนี้เยื่อแผ่นพอลิเมอร์จะมีการบวมตัว หากทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงและมีการสัมผัสกับตัวทำละลายอินทรีย์เป็นเวลานาน ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ไว้บริเวณพื้นผิวและเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสายโซ่ของ พอลิเมอร์ และตัวทำละลายอินทรีย์ ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขยายตัว ส่งผลให้ความสามารถในการแยกลดลง

การผลิตเยื่อแผ่นเซรามิกเชิงประกอบโดยทั่ว ๆ ไปแล้วมักจะทำขึ้นโดยการนำทอกลงเซรามิกที่มีความเป็นรูพรุนประมาณร้อยละ 40 ของพื้นที่ผิว และมีขนาดของรูพรุนประมาณ 1.5 ไมครอน (ชั้นรองรับ) มาทำการเคลือบด้วยสารเคมีเช่น ซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ เซรามิก NaA โดยเทคนิคในการเคลือบนั้น มักจะนิยมใช้เทคนิคการจุ่ม-เคลือบ (dip-coating technique) เพื่อทำให้เกิดการตกผลึกของซีโอไลต์บนพื้นผิวของทอกลงเซรามิกนั้น เกิดเป็นชั้นเคลือบบาง ๆ ที่มีคุณสมบัติในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลได้ โดยจะเรียกชั้นนี้ว่าชั้นคัดเลือก (selective layer) ซึ่งรูปร่างของเยื่อแผ่นเซรามิกเชิงประกอบนั้น สามารถทำได้หลายรูปแบบเช่นแบบแผ่นเรียบ (flat sheet) และแบบทอกลงที่มีชั้นเคลือบอยู่ด้านในหรือด้านนอกเป็นต้น รูปภาพ 9 แสดงภาพวาดของเยื่อแผ่นเซรามิกเชิงประกอบที่มีชั้นเคลือบอยู่ด้านนอก



รูปภาพ 9 ภาพวาดแสดงท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกโดยมีชั้นแยกอยู่ภายนอก

Sato และ คณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล/น้ำ จากน้ำหมัก เพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลโดยใช้ระบบผสมระหว่างการกลั่นและการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น ซึ่งผลิตขึ้นจากโซเดียมเอซีโอไลต์ (NaA zeolite) โดยทำการสังเคราะห์บนท่อ  $\alpha$  alumina ที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ 0.8 ไมครอน โดยเทคนิคการจุ่มเคลือบ (dip-coating) ผลของตัวแปรในการสังเคราะห์ เช่น การก่อก้อน (seeding) และสภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิและเวลาต่อความสำเร็จของเยื่อแผ่นเชิงประกอบที่เกิดขึ้น จากนั้นทำการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเครื่อง x-ray diffraction ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลึกที่มีขนาดสม่ำเสมอก่อตัวขึ้นบนผิวของตัวรองรับ ผลึกที่มีขนาดเล็กที่สุดที่สังเคราะห์ขึ้น คือ 1 ไมครอนเติบโตขึ้นบนผิวของตัวรองรับฟิล์มซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นมีความต่อเนื่องและแน่นตัว เยื่อแผ่นชนิดโซเดียมเอซีโอไลต์ที่มีคุณภาพสูงที่สังเคราะห์จากเทคนิคดังกล่าวมีค่าแฟกเตอร์การแยกของน้ำออกจากของผสมเอทานอล/น้ำ 90% โดยน้ำหนักมีค่ามากกว่า 10,000 ขณะที่ค่าการไหลของน้ำผ่านเยื่อแผ่นหรือฟลักซ์มีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ  $31 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  (Sato *et al.*, 2008)

## 1.8 จุดประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.8.1 ผลิตเยื่อแผ่นเชิงประกอบจากเซรามิก และเพื่อเป็นการเพิ่มความทนทานทางเชิงกลและความร้อน (thermal and mechanical stability) โดยสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิการป้อนสูงถึง 145 °C
- 1.8.2 ทำการปรับปรุงและทดสอบชั้นแยก (separation layer) โดยทำการเคลือบชั้นรองรับด้วยสารซีโอไลท์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ค่า separation factor ที่สูง
- 1.8.3 ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกน้ำจากเยื่อแผ่นที่ผลิตได้ในห้องปฏิบัติการกับเยื่อแผ่นที่มีจำหน่ายอยู่แล้ว เช่นจากบริษัท Mitsui Engineering & Shipbuilding เป็นต้น
- 1.8.4 ผลิตท่อใยกลวงเชิงประกอบในระดับโรงงานต้นแบบและทำการทดสอบกับระบบการผลิตจริง



## บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย

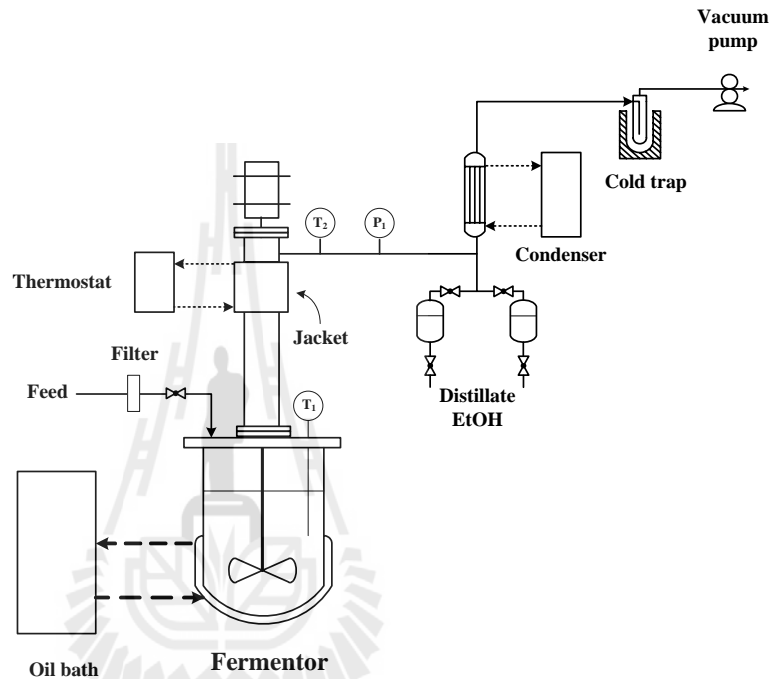
### 2.1 การแยกผลิตภัณฑ์ควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ

จากการพิจารณาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอลนั้น พบว่ามีความสามารถในการกลายเป็นไอสูง กล่าวคือเอทานอล มีจุดเดือดอยู่ที่ 78 องศาเซลเซียส ดังนั้นกระบวนการที่เหมาะสมในการแยกเอทานอลออกจากน้ำก็คือการกลั่นลำดับส่วน ส่วนการใช้สมบัติอย่างอื่นจะทำให้การแยกทำได้ค่อนข้างยาก เช่นการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการสกัดจะพบปัญหาสำคัญคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแยก (distribution coefficient) ที่ต่ำ โดยเฉพาะเอทานอลซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังจำเป็นต้องทำการกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกผลิตภัณฑ์ออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ภายหลังจากการสกัดอีกด้วย หอกลั่นเอทานอลแบบต่อเนื่องที่ทำการพัฒนาขึ้นมาี้ สามารถทำการกลั่นสารได้หลากหลายชนิด และทำการกลั่นลำดับส่วนได้หลายประเภท เช่นการกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ การกลั่นแบบความดันสูง หรือการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ เป็นต้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าได้มากขึ้น ทำให้เป็นการเพิ่มผลผลิต (yield) เนื่องจากหอกลั่นลำดับส่วนประสิทธิภาพสูงที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ สามารถประยุกต์ใช้งานในการกลั่นแยกสารได้หลากหลายชนิด เช่น การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ ซึ่งการหมักเอทานอลสามารถหมักได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรหลายชนิดเช่น กากน้ำตาลอ้อย ข้าวฟ่างหวาน เซลลูโลส (cellulosic ethanol) และจากมันสำปะหลัง เป็นต้น โดยใช้เชื้อยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำตาลในถังหมักให้เป็นเอทานอล ซึ่งกระบวนการหมักจะสิ้นสุดเนื่องจาก ปริมาณเอทานอลที่สะสมในน้ำหมักมีมากจนเกิดความเป็นพิษต่อเชื้อยีสต์ก่อนที่จะนำน้ำหมักดังกล่าวไปกลั่นลำดับส่วนต่อไป โดยเอทานอลเป็นสารพิษต่อเซลล์ของเชื้อยีสต์ ซึ่งมีรายงานว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ 1-2% สามารถก่อให้เกิดความเครียดในเชื้อยีสต์ได้และความเข้มข้นของเอทานอลที่ประมาณ 10% จะทำให้การหมักสิ้นสุดลง

หลักการการทำงานของระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศนั้น เริ่มต้นจะใช้น้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานเข้มข้นมาทำการละลายน้ำให้มีค่าปริมาตรประมาณ 25 จากนั้นจะทำการเติมกรดซิตริกเพื่อปรับค่า pH เริ่มต้นให้ได้ 4.5 จากนั้นจะเติมยีสต์ลงไป 50 กรัมต่อลิตร ในระหว่างการหมักจะทำการลดความดันบรรยากาศให้ต่ำลงเหลือประมาณ 65 มิลลิบาร์ ซึ่งจะทำให้น้ำหมักเดือดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการหมักปกติ เอทานอลซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าจะกลายเป็นไอ และลอยขึ้นสู่ด้านบนของหอกลั่น โดยจะมีความเข้มข้นของเอทานอลบริเวณผิวหน้าของน้ำหมัก (vapor-liquid interface) ประมาณ 25% โดยเมื่อ



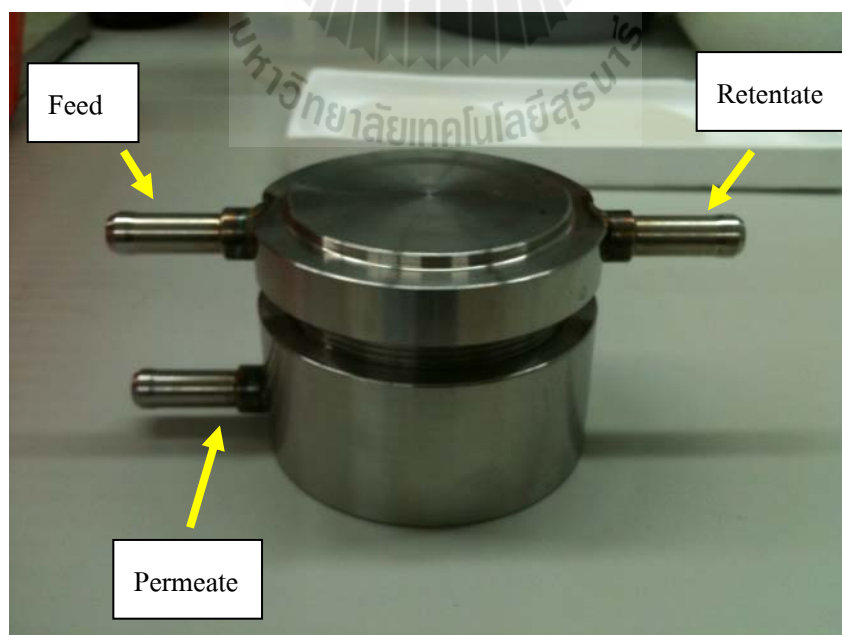
ไอผสมของน้ำและเอทานอลลอยเข้าสู่บริเวณที่มีการควบคุมอุณหภูมิด้วยท่อสองชั้น (Jacket) จะมีการใช้ระบบทำความเย็น (Thermostat) ในการลดอุณหภูมิของไอผสมดังกล่าวลง ทำให้เกิดการควบแน่นของน้ำบางส่วนกลายเป็นของเหลวไหลกลับลงสู่ถังหมัก ก่อนที่ไอของเอทานอลบริสุทธิ์จะยังคงสถานะที่เป็นไอและถูกแยกออกไปจากระบบ กลายเป็นส่วนกลั่น (distillate) ต่อไป



รูปภาพ 10 แสดงภาพวาดของระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ (บน) และ โถแก้วรองรับส่วนกลั่นเอทานอลพร้อมวาล์ว 3 ทางสำหรับการกลั่นแบบต่อเนื่อง (ล่าง)

## 2.2 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

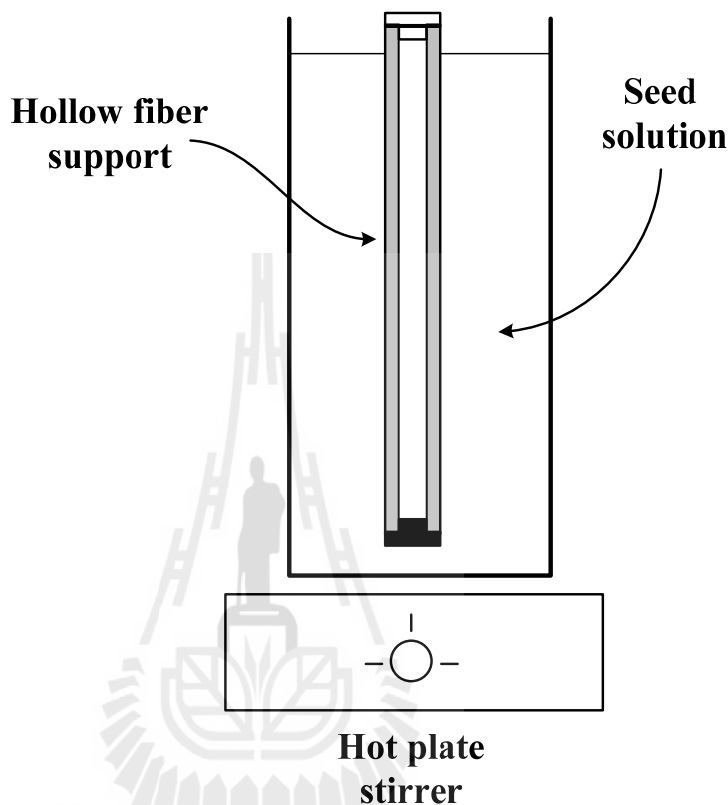
### 2.2.1 การพัฒนาเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกแบบแผ่นเรียบ



รูปภาพ 11 การเตรียมเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกแบบแผ่นเรียบ (VP) และ โมดูลเยื่อแผ่น (ล่าง)

สำหรับการพัฒนาเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกนั้น จะทำการผลิตเมมเบรนเชิงประกอบแบบแผ่นเรียบในขั้นตอนแรกดังรูปภาพ 11 (บน) โดยทำการผลิตเซรามิกชั้นรองรับก่อนจากการนำผงดินขาวหรือ Kaolin มาทำให้เป็น slurry แล้วทำการอัดขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นแผ่นกลม ๆ ซึ่งมีพื้นที่ผิว 20 ซม<sup>2</sup> (เส้นผ่าศูนย์กลางของเยื่อแผ่น 5 ซม) จากนั้นทำการเผาซินเทอร์ (sintering) ที่อุณหภูมิประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส เพื่อให้ผิวด้านนอกของผงดินขาวเกิดการหลอมและเชื่อมติดกัน เมื่อทิ้งให้เย็นตัวลง จะเกิดเป็นรูพรุนเล็ก ๆ ระหว่างผงของดินขาว ซึ่งรูพรุนเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นบนแผ่นเซรามิกนี้จะไม่ทำหน้าที่เป็นชั้นคัดเลือก เนื่องจากยังมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่กว่าโมเลกุลของเอทานอลและน้ำมาก แต่จะทำหน้าที่เป็นชั้นที่เสริมความแข็งแรงให้กับเยื่อแผ่น (supportive layer) จากนั้นจึงทำการเคลือบด้วยซีโอไลต์ โดยได้ทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของผลึกซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแผ่นเซรามิกที่ใช้เป็นชั้นรองรับ โดยทำการทดสอบสถานะเหมาะสมในการเกิดผลึก การใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดผลึกของสารละลาย สำหรับรายละเอียดของการสังเคราะห์ผลึกซีโอไลต์ลงบนผิวของแผ่นเซรามิกนั้น ในขั้นแรกจะทำการเตรียมสารละลายอิมตัวของ อะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) โดยผสมสารละลาย 2 ชนิดคือ 1. สารละลายอะลูมิเนต (aluminate solution) เตรียมโดยการต้มโซเดียมอะลูมิเนต (Sodium aluminate, Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 2. สารละลายซิลิเกต (silicate solution) สามารถเตรียมโดยการละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ในน้ำกลั่น จากนั้นนำสารละลายทั้งสองชนิดมาผสมกันโดยมีองค์ประกอบทางเคมีของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : SiO<sub>2</sub> : Na<sub>2</sub>O : H<sub>2</sub>O ที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถที่จะเรียกสารละลายนี้อีกอย่างหนึ่งว่า seed solution จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวบรรจุลงในกระบอกแก้วเพื่อทำการการเคลือบซีโอไลต์ลงบนชั้นรองรับเซรามิกที่เป็นแผ่นเรียบด้วยวิธีจุ่มเคลือบ อุณหภูมิของสารละลายที่ใช้เคลือบคือ 80-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากที่ทำกรเคลือบเสร็จสิ้นแล้ว พื้นผิวของตัวอย่างจะถูกล้างด้วยน้ำกลั่นและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกที่ทำการผลิตขึ้นนี้ จะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) จากนั้นจะทำการทดสอบการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลด้วยระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น โดยการนำเอาตัวอย่างบรรจุไว้ในตัวเรือนหรือโมดูลที่มีลักษณะดังรูปภาพ 11 (ล่าง) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะ 2 ชั้นประกบกันโดยมีเยื่อแผ่นคั่นกลาง แผ่นด้านบนทำเป็นช่องสำหรับการไหลของไอสารป้อน โดยมีการทำช่องให้ไอไหลเข้า (feed) และไอไหลออก (retentate) ส่วนแผ่นด้านล่างจะมีการต่อท่อสำหรับต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศเพื่อนำเพอร์มิเอท (permeate) ออกไป

### 2.2.2 ท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิก



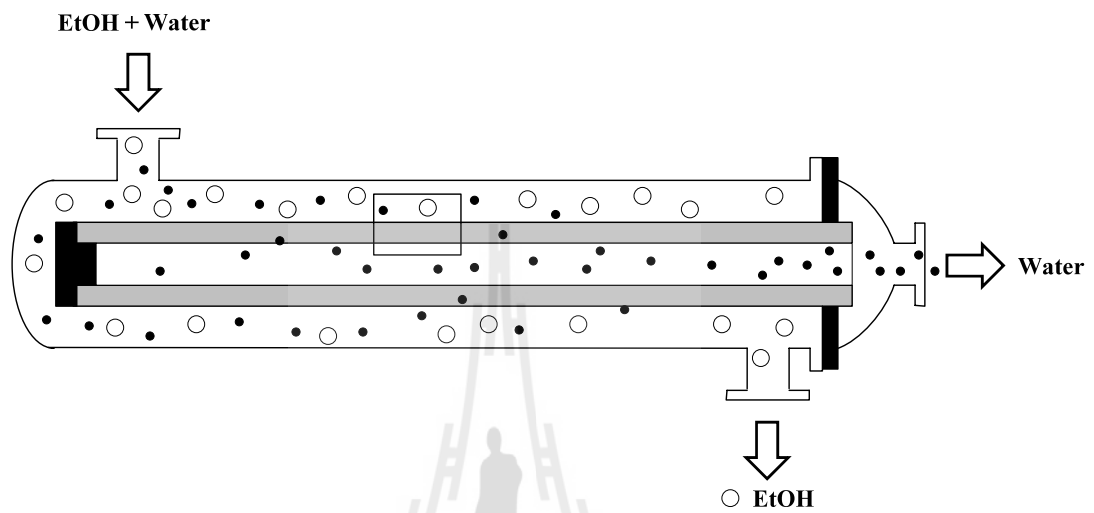
รูปภาพ 12 การเคลือบซีโอไลต์ลงบนชั้นรองรับท่อกลวงเซรามิกด้วยวิธีจุ่ม-เคลือบ (Sato and Nakane, 2007)

ท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิก (Composite ceramic hollow fiber membrane) มีข้อดีมากกว่าแบบแผ่นเรียบ กล่าวคือมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มากกว่าแบบแผ่นเรียบ ทำให้สามารถลดขนาดของโมดูลลงได้เป็นอย่างมากดังที่ได้แสดงในรูปภาพ 9 เพื่อให้เข้ากับจุดประสงค์ของโครงการวิจัยหัวข้อ 1.6.4 ซึ่งเป็นการผลิตท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลในระดับโรงงานต้นแบบนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือเฉพาะในการผลิต ซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจัดซื้อจากต่างประเทศ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบจากบริษัท Mitsui Engineering & Shipbuilding ประเทศญี่ปุ่น มีขนาดพื้นที่ผิว 0.0352 ตารางเมตร (เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 ซม และยาว 75 ซม) ขั้นตอนการผลิตที่สำคัญสองขั้นตอนคือ การผลิตชั้นรองรับซึ่งเป็นท่อใยกลวงเซรามิก และการเคลือบซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ (NaA

zeolite) เพื่อทำเป็นชั้นคัดเลือก (selective layer) เช่นเดียวกันกับการผลิตเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกแบบแผ่นเรียบ โดยขั้นตอนการผลิตโดยคร่าว ๆ จะเริ่มจากการเตรียมสารตั้งต้นที่จะนำไปขึ้นรูป (Sato and Nakane, 2007) โดยการผสมผงอะลูมิเนียมออกไซด์ และตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) รวมถึงสารผสม (additives) เพื่อปรับสภาพต่าง ๆ ก่อนที่จะทำการแยกฟองออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ จากนั้นทำการปั๊มสารผสมที่เตรียมไว้ ผ่านรูเล็ก ๆ ของ spinnerette และทำการควบคุมอัตราการไหลโดยใช้แรงดันจากก๊าซไนโตรเจนและวาล์วควบคุมการไหล (mass flow controller) ก่อนที่จะผ่านกระบวนการที่เรียกว่า การเปลี่ยนเฟส หรือ phase inversion ซึ่งจะทำให้เกิดการตกตะกอน (precipitation) ของสารผสมดังกล่าว โดยการผ่านสารละลายไปในถังตกตะกอน (Coagulation bath) จากนั้นจะเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายโดยที่ในระหว่างนี้ตัวทำละลายอินทรีย์ จะละลายตัวออกมาในน้ำและน้ำ บางส่วนจะเข้าไปแทนที่ ทำให้ความเข้มข้นของผสมดังกล่าวมีความเข้มข้นสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดเป็นเจลก่อนที่จะมีการตกตะกอนขึ้นกลายเป็นรูปทรงของท่อใยกลวง เยื่อแผ่นที่ผลิตขึ้นมาโดยวิธีนี้มีความหนาประมาณ 100-200 ไมครอน โดยที่โครงสร้างของชั้นผิวที่เกิดขึ้นจะมีโครงสร้างที่แน่นและมีความหนาประมาณ 0.1-1.0 ไมครอนเท่านั้น ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการอบที่อุณหภูมิสูงหรือ sintering เพื่อที่จะทำให้เกิดการหลอมตัวและเชื่อมติดกันของผงเซรามิก (sintering) ที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส กลายเป็นท่อใยกลวงเซรามิกขึ้น ซึ่งท่อดังกล่าวจะทำการอุปถัมภ์ด้านหนึ่งไว้

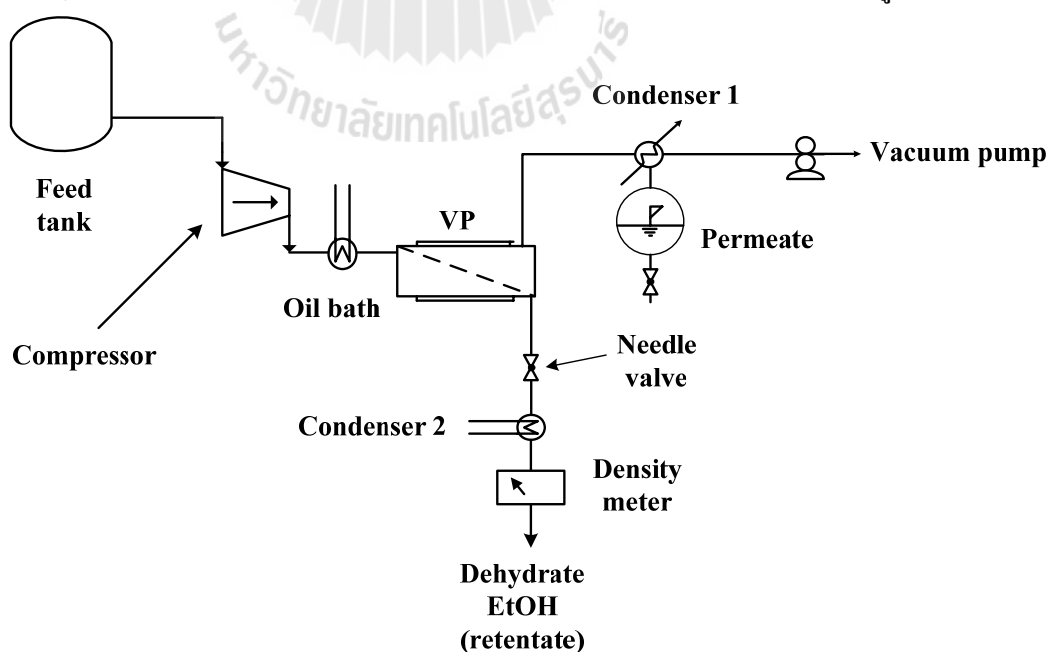
ในขั้นตอนถัดมาจะเป็นการเคลือบสารซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ ลงบนท่อใยกลวงที่ผลิตเตรียมไว้แล้ว เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นคัดเลือก (selective layer) โดยมีจุดประสงค์ให้มีขนาดของความหนาของเปลือกซีโอไลต์ให้น้อยที่สุด ประมาณ 20 ไมครอน การเคลือบสารนั้นทำได้หลายวิธี เช่นทำการเคลือบจากด้านนอกด้วยเทคนิคการจุ่ม-เคลือบ ดังแสดงในรูปภาพ 12 สารละลายของอะลูมิเนียมซิลิเกตจะถูกเตรียมไว้ในภาชนะทรงสูงที่วางอยู่บนแผ่นให้ความร้อน จากนั้นจะทำการจุ่มท่อใยกลวงเซรามิกลงไป เพื่อทำการเคลือบ โดยสภาวะการเคลือบนั้น จะมีการใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดผลึกที่มีความหนาตามต้องการ โดยสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดีของสารที่นำมาเป็นสารเคลือบนั้น ควรจะแสดงความชอบน้ำสูง (hydrophilicity) และยอมให้น้ำผ่านได้ดี ในขณะที่เดียวกันก็ควรที่จะสามารถกักกันเอทานอลได้ดีอีกด้วย ท่อใยกลวงเชิงประกอบที่ผลิตได้นี้ จะถูกนำไปทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบต่าง ๆ เช่น การทดสอบสัณฐานด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM picture) ของโครงสร้างภายในและชั้นผิว รวมทั้งประสิทธิภาพการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น เป็นต้น

### 2.3 ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นระดับโรงงานต้นแบบ

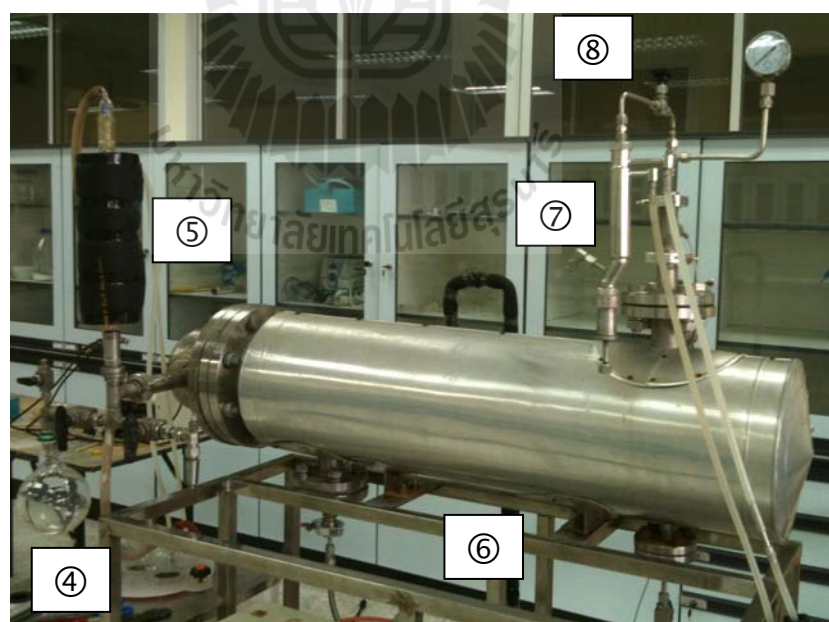
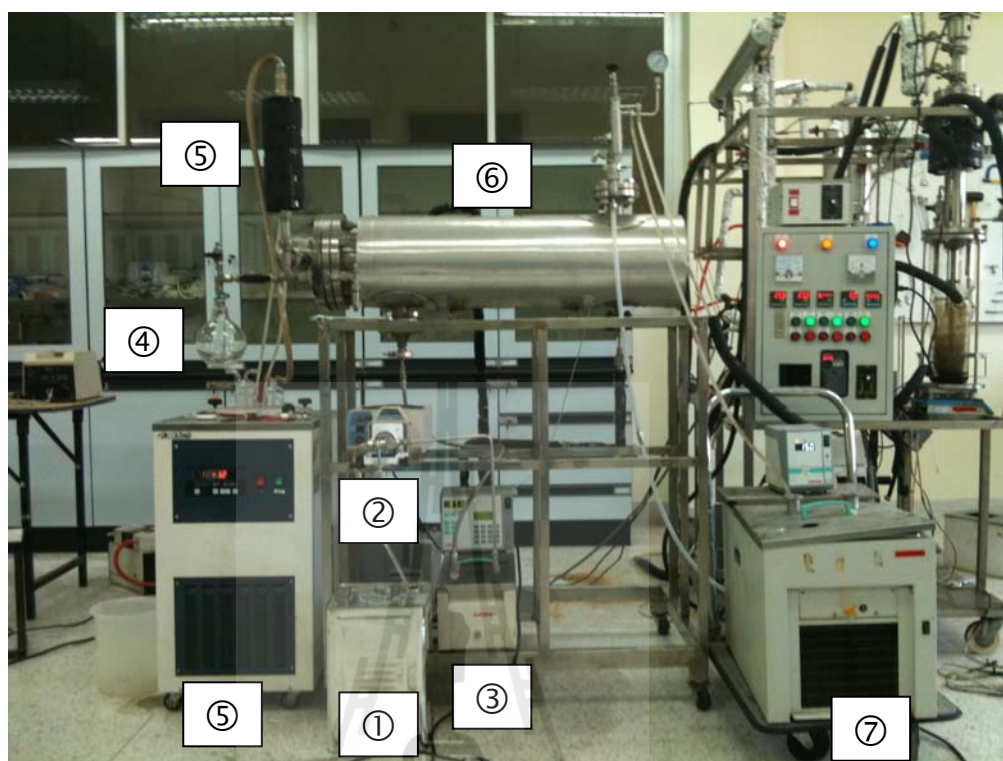


รูปภาพ 13 รูปภาพโมดูลเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกชนิดท่อใยกลางในระดับโรงงานต้นแบบ และ  
การจัดสร้างโมดูลภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับ ระบบการทดลองสำหรับเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นในระดับโรงงานต้นแบบ สามารถแสดงดังรูปภาพ 13 (บน) โดยโมดูลของเยื่อแผ่น ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้น ปลายด้านหนึ่งปิดไว้ รูปภาพ 13 (ล่าง) ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งทำเป็นหน้าแปลนและทำการเจาะรู เพื่อที่จะใส่ท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิก โดยสามารถใส่ได้ 10 หลอด ทำให้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.35 ตารางเมตร จากนั้นปิดปลายอีกด้านหนึ่งของโมดูลเพื่อทำการต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ สารป้อนที่ใช้คือเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ซึ่งถูกทำให้กลายเป็นไอร้อนและมีความดันสูงโดยใช้ปั๊มแรงดันสูง (compressor) และมีหัวปั๊มแบบลูกสูบ (FMI piston pump head, USA) ทำการปั๊มเอทานอลที่เป็นของเหลวจากถังป้อน (feed tank) ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้อ่างน้ำมัน (Oil Bath, Julabo F4, Germany) ไอที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่าน โมดูลเยื่อแผ่น เมื่อไอผสมน้ำและเอทานอลเคลื่อนที่เข้าไปใน โมดูลเยื่อแผ่น จะถูกแยกออกเป็นสองสายคือ permeate ซึ่งเป็นด้านที่มีการใช้ปั๊มสุญญากาศทำการลดความดันบรรยากาศ โดยที่ด้านของ permeate นี้จะมีน้ำอยู่เป็นปริมาณมากและมีเอทานอลปนมาด้วยเล็กน้อย จึงจำเป็นต้องทำการจับไอของสารดังกล่าวด้วยการใช้เครื่องควบแน่น (condenser 1) ส่วนสายที่สองจะเป็น retentate เคลื่อนที่ออกจากโมดูลเยื่อแผ่น ก่อนที่จะถูกควบแน่น (condenser 2) กลายเป็นเชื้อเพลิงเอทานอล โดยที่ความเข้มข้นของเอทานอลในด้าน retentate นี้จะถูกวัดแบบออนไลน์โดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่น (Density meter, Anton Paar, Austria) ลักษณะการทำงานของระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นแสดงโดยรูปภาพ 14



รูปภาพ 14 การจัดการทดลองระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล



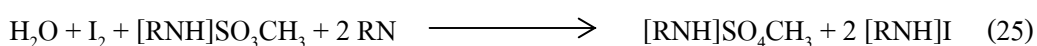
รูปภาพ 15 ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นในระดับโรงงานต้นแบบโดยใช้ท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบ; 1 = Feed tank, 2 = Compressor, 3 = Super heater, 4 = Permeate, 5 = Condenser 1, 6 = Membrane module, 7 = Condenser 2 และ 8 = Back pressure valve



## 2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 2.4.1 การหาปริมาณน้ำในสารละลายเอทานอลโดยใช้ Karl Fischer titration และ เครื่องวัดความหนาแน่น

การหาปริมาณน้ำที่เจือปนในตัวอย่างไม่สามารถหาโดยใช้ชุดการวิเคราะห์ HYDRANAL® - Moisture Test Kit (Sigma-Aldrich) สำหรับหลักการของ Karl Fischer's titration (Schott, Germany) คือเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยสารละลายไอโอดีน (Hydranal®) ทำปฏิกิริยากับน้ำที่ปนเปื้อนในตัวอย่างไม่ซึ่งมีความเหมาะสมในการที่จะวัดปริมาณน้ำปนเปื้อนในตัวอย่างไม่ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ โดยเครื่องดังกล่าวจะใช้เป็นการอ้างอิงสำหรับการใช้ software ในการสร้างกราฟมาตรฐาน สำหรับชุด HYDRANAL® - Moisture Test Kit ตัวทำละลายคือ HYDRANAL®-Solvent E จะถูกเทลงไปในขวดไทเทรต จากนั้นจะทำการไล่น้ำที่อยู่ในตัวทำละลายโดยการไทเทรตด้วยสารละลาย HYDRANAL®-Titrant Component จนถึงจุดยุติ โดยที่จุดยุติของการไทเทรตนั้น สารละลายจะเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีเหลือง ในการไทเทรตสารตัวอย่างแต่ละครั้งต้องใช้เข็มฉีดยา (syring) เพื่อดูดสารตัวอย่างมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่เจือปน จากนั้นทำการไทเทรตด้วย HYDRANAL® อีกครั้ง ซึ่งปฏิกิริยา Karl's Fischer Titration เป็นการทำปฏิกิริยาดังสมการ



โดยปฏิกิริยานี้ จะเป็นการทำปฏิกิริยาของน้ำและไอโอดีนในอัตราส่วน 1:1 โมล ซึ่งวิธีวัดน้ำนี้เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการวัดปริมาณน้ำปนเปื้อนในเอทานอล

อันดับแรกในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เจือปนในสารตัวอย่างด้วยวิธี Karl Fischer's titration จะต้องทำการหาค่าที่ใช้วัดมาตรฐานที่เรียกว่าค่า titre [mg water/mL] หรือค่า b ก่อนโดยค่านี้นี้หาได้จากสาร HYDRANAL®-Standard ซึ่งในสารดังกล่าวจะมีปริมาณน้ำเจือปนอยู่ 5 มิลลิกรัม น้ำต่อมิลลิลิตร ทำการดูดสาร HYDRANAL®-Standard มา 0.50 มิลลิลิตร จากนั้นทำการไทเทรตด้วยสาร HYDRANAL®-Titrant Component จนถึงจุดยุติ ค่า titre (b) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$b = (5.0 * 0.50)/a$$

โดยที่ a = ปริมาตรของสาร HYDRANAL®-Titrant Component [มิลลิลิตร]

สำหรับปริมาณน้ำที่เจือปนในสารตัวอย่างที่วัดเป็นร้อยละโดยปริมาตร (c) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$c = a * b * 100 / V$$

โดยที่ a = ปริมาตรของสาร HYDRANAL®-Titrant Component [มิลลิลิตร]

b = titre ที่หาได้จากสมการข้างต้น

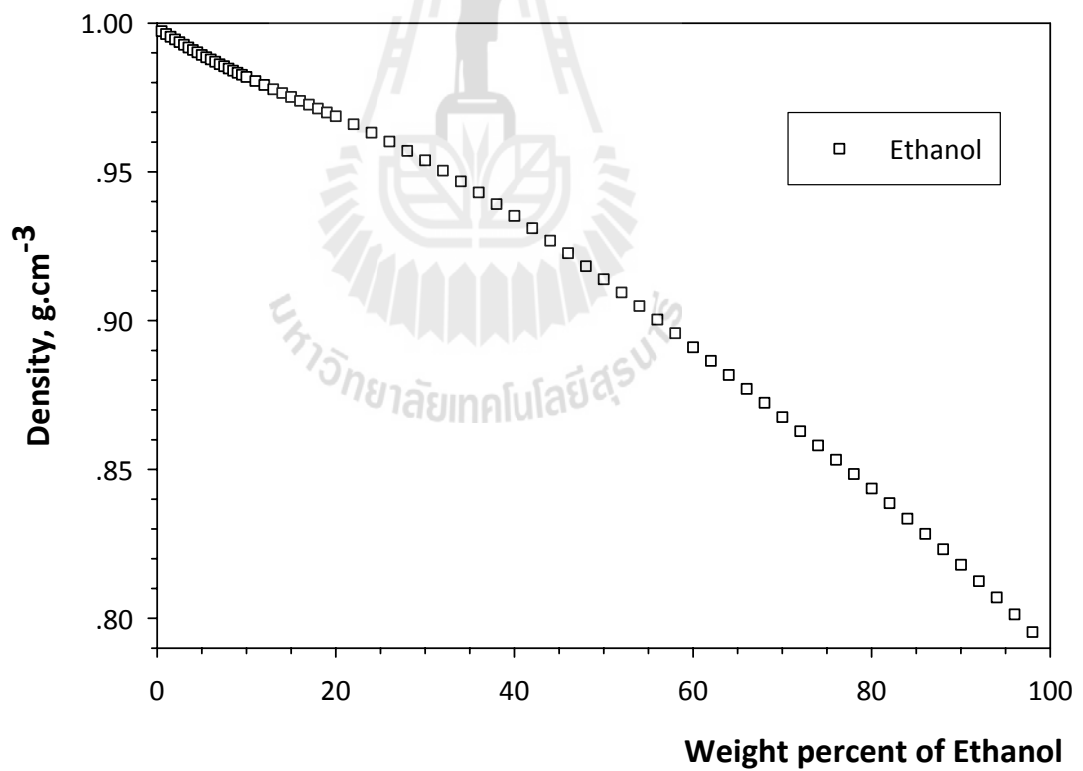
V = ปริมาตรของสารตัวอย่าง [ไมโครลิตร] ตามลำดับ

หมายเหตุ: ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของเอทานอลคือ 0.7893 กรัมต่อมิลลิลิตร และความหนาแน่นของน้ำคือ 0.9982 กรัมต่อมิลลิลิตร

ส่วนการวัดปริมาณน้ำที่รวดเร็วอีกวิธีหนึ่งคือการใช้เครื่องวัดความหนาแน่น (Density meter) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้เครื่องวัดความหนาแน่นรุ่น L-Dens 313 ของบริษัท Anton Paar ประเทศออสเตรีย รูปภาพ 16 (บน) ซึ่งสามารถวัดความหนาแน่นได้ถึง 3 ตำแหน่ง ซึ่งค่าความหนาแน่นดังกล่าวที่ได้จากการวัดเชื้อเพลิงเอทานอล จะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าความเข้มข้นของน้ำ โดยการเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้ทำการเทียบ (Calibration curve) ดังรูปภาพ 16 (ล่าง) โดยความสัมพันธ์ของความหนาแน่น (แกน y) กับสัดส่วนของเอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (แกน x) พบว่ามีความสัมพันธ์กันแบบพาราโบลาดังสมการ

$$y = a + bx + cx^2$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์  $a = 6.104032$ ,  $b = -4.658177 \times 10^2$ , และ  $c = -8.703533 \times 10^2$  ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.8896



รูปภาพ 16 อุปกรณ์สำหรับวัดความหนาแน่น (Density meter) สำหรับการวัดปริมาณน้ำในสารละลายเอทานอล (บน) กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความเข้มข้นของเอทานอล (ล่าง)

### 2.4.2 การหาประสิทธิภาพของเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

ส่วนประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอลโดยเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกนั้น สามารถแสดงได้ 2 ค่าคือค่าฟลักซ์ ( $J$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$J = \frac{w}{At}$$

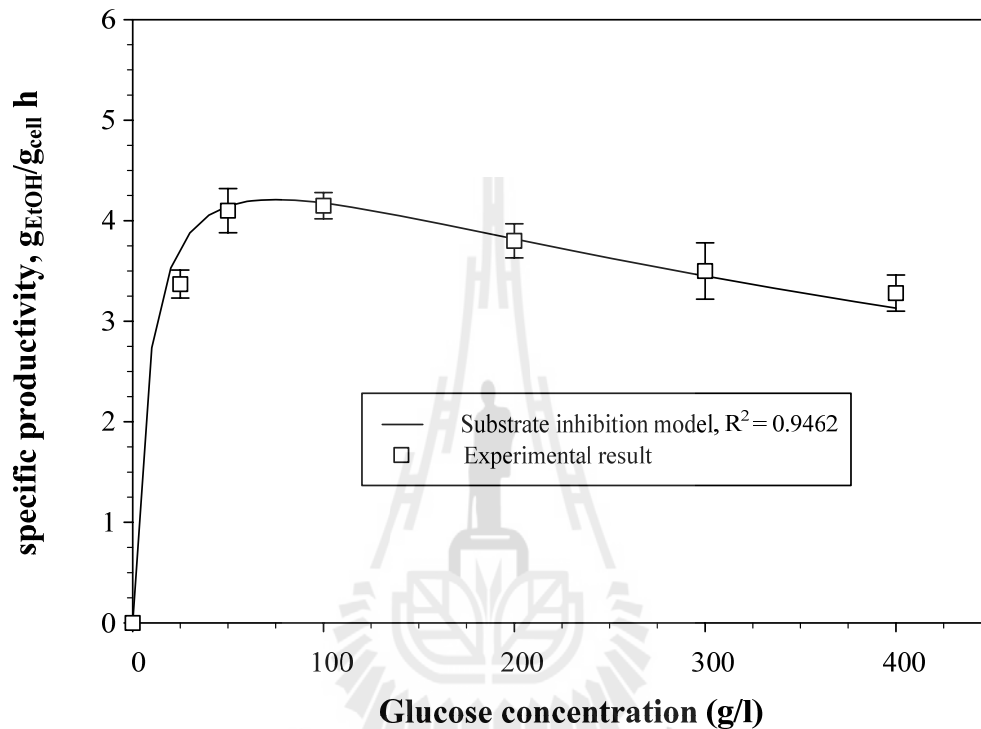
โดยที่  $w$  หมายถึงน้ำหนักของเพอมีเอทที่ได้ (กิโลกรัม),  $t$  เป็นเวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง) และ  $A$  หมายถึงพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ใช้ (ตารางเมตร) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแยก (separation factor,  $\alpha$ ) นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha = \frac{w_{P,H_2O} / w_{F,H_2O}}{w_{F,EtOH} / w_{P,EtOH}}$$

โดยที่  $w$  หมายถึงน้ำหนักของน้ำและเอทานอลในส่วนของสารป้อน (F) และ เพอมีเอท (P) ตามลำดับ

### บทที่ 3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์

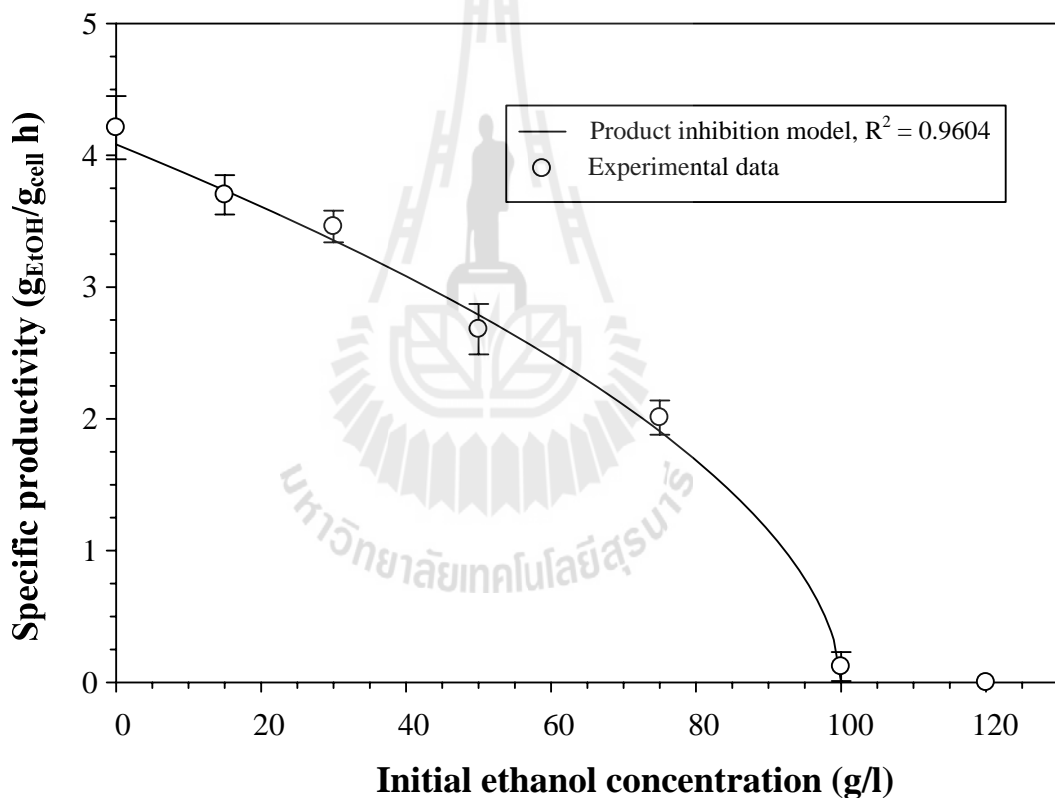
#### 3.1 การศึกษาจลศาสตร์การหมักเอทานอล



รูปภาพ 17 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสที่มีต่อค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอล

ในงานวิจัยนี้จลศาสตร์ของการยับยั้งที่เกิดจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เอทานอลได้ถูกศึกษาในเบื้องต้นเพื่อทำความเข้าใจในผลกระทบของแต่ละสารประกอบต่อประสิทธิภาพในกระบวนการหมักเอทานอล โดยปัจจัยแรกคือการศึกษากการยับยั้งสารตั้งต้น (น้ำตาลกลูโคส) ซึ่งผลการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลศาสตร์การผลิตเอทานอลแสดงในรูปภาพ 17 โดยเป็นทำการศึกษาความเข้มข้นของกลูโคสเริ่มต้นในช่วงระหว่าง 0 ถึง 400 กรัมต่อลิตร ซึ่งผลดังกล่าว ได้จากการหาค่าความชันระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลกับเวลา โดยพิจารณาจากช่วงเวลาที่ความเข้มข้นเอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ๆ ของการหมัก ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการยับยั้งจากสารตั้งต้นที่มีต่ออัตราการผลิตเอทานอลแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องเป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยผลของการยับยั้งกลูโคสที่มีต่อผลิตผลจำเพาะของเอทานอลพบว่าไม่มีอิทธิพลมากนัก จากกราฟจะพบว่าค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอล

จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นของกลูโคสที่ 0-50 กรัมต่อลิตร โดยมีค่าสูงที่สุดคือ 4.08 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ต่อชั่วโมง และที่ระดับความเข้มข้นของกลูโคส 100 กรัมต่อลิตร จากนั้นค่าดังกล่าวจะลดลงอย่างช้าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นกลูโคส ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่าคงที่อิ่มตัว ( $K_s$ , saturation constant) และค่าคงที่ของการยับยั้งจากน้ำตาล ( $K_i$ , substrate inhibition constant) คือ 0.892 และ 620.71 กรัมต่อลิตรตามลำดับ จากกราฟสามารถบ่งบอกได้ว่าสามารถทำการหมักได้ที่ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่สูง โดยที่ไม่เกิดการยับยั้งเชื้อยีสต์ และความเข้มข้นที่เหมาะสมของกลูโคสเริ่มต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 200 ถึง 300 กรัมต่อลิตร



รูปภาพ 18 อิทธิพลของความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้นที่มีต่อค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอล

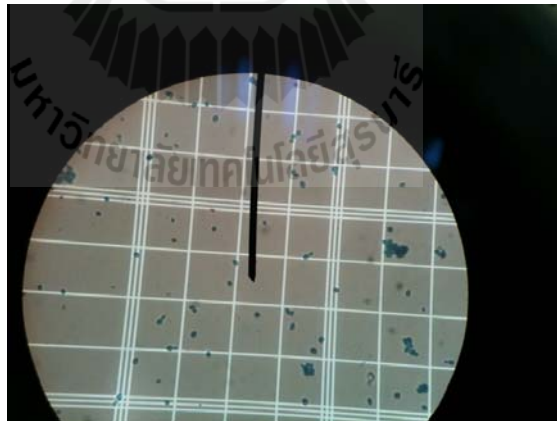
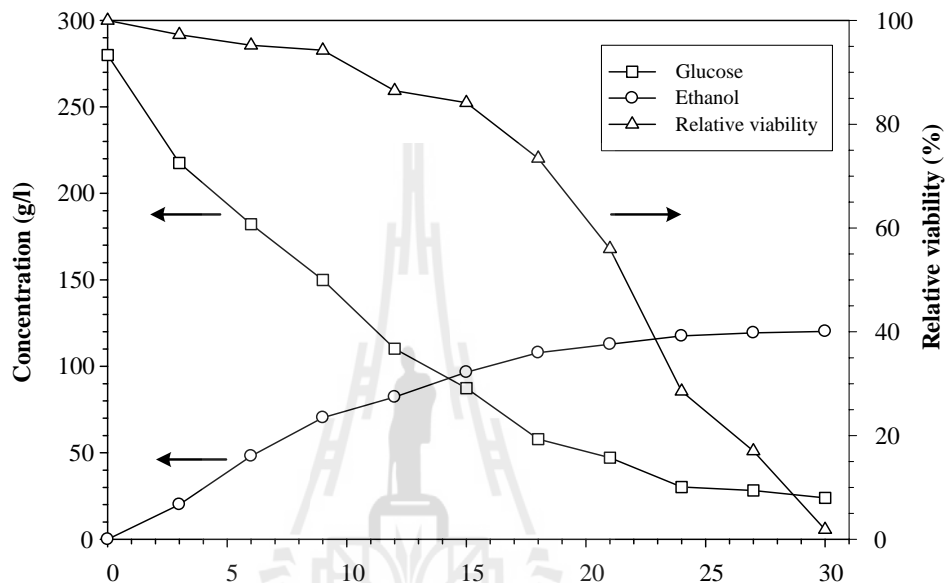
ในทางตรงกันข้ามกับการยับยั้งจากน้ำตาลกลูโคส อิทธิพลของการยับยั้งจากเอทานอลเริ่มต้นที่มีต่อกระบวนการหมักเอทานอลนั้น พบว่ามีความอ่อนไหวมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอลที่หลายๆ ความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นระหว่าง 0 ถึง 120 กรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้นได้ถูกตรึงไว้ที่ระดับ 100 กรัมต่อลิตร ซึ่งผลการ

ทดลองอิทธิพลของเอทานอลเริ่มต้นที่มีต่อค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอลได้แสดงไว้ในรูปภาพ 18 ซึ่งข้อมูลด้านการทดลองยืนยันว่าความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักมีอิทธิพลที่สำคัญต่อค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอล ซึ่งค่าดังกล่าวจะเริ่มลดลงแม้กระทั่งที่ระดับความเข้มข้นของเอทานอลค่า โดยที่ค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอลสูงสุดจะอยู่ที่เมื่อไม่มีเอทานอลอยู่ในระบบ และค่าดังกล่าวจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้นในระบบ ที่ระดับ 75 กรัมต่อลิตร ค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอลลดลงมาที่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และค่าดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็วไปที่ 0 เมื่อความเข้มข้นเข้าใกล้ 100 กรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้นของเอทานอลที่ 120 กรัมต่อลิตร ไม่มีการผลิตเอทานอลเพิ่มขึ้น โดยจากการคำนวณพบว่า ที่ความเข้มข้นของเอทานอลวิกฤต ( $P'_{m}$ ) 100 กรัมต่อลิตร ในสมการ (1) จะได้ความความสัมพันธ์ที่เหมาะสมโดย ค่า  $a_1$  คือ 0.56 ( $R^2=0.9604$ ) โดยสรุปแล้ว น้ำตาลกลูโคสและเอทานอลที่มีอยู่ในน้ำหมักจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการหมักของเชื้อยีสต์ลดลง ซึ่งการยับยั้งที่เกิดจากน้ำตาลกลูโคสสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการควบคุมปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสในน้ำหมักให้เหมาะสม และหากจะหลีกเลี่ยงการยับยั้งที่เกิดจากเอทานอล จำเป็นที่จะต้องกำจัดเอทานอลที่เกิดขึ้นออกจากระบบอยู่ตลอดเวลา

### 3.1.1 การหมักแบบดั้งเดิมและการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมัก

จากผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 แสดงให้เห็นว่าการรักษาระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่ระดับต่ำส่งผลทำให้ค่าผลิตผลจำเพาะของเอทานอลมีค่าสูง นอกจากนี้แล้วยังส่งผลทำให้อัตราการบริโภคกลูโคสสูง และมีความเป็นพิษต่อเซลล์ยีสต์ รูปภาพ 19 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาในการใช้น้ำตาลกลูโคส, การผลิตเอทานอล, และความสามารถในการมีชีวิตของเซลล์ยีสต์ (relative cell viability) ซึ่งเป็นการใช้สีย้อม methylene blue ในการย้อมเซลล์ยีสต์ ซึ่งในเซลล์ยีสต์ที่ยังมีชีวิตอยู่ จะไม่ย้อมติดสีดังกล่าว ส่วนเซลล์ยีสต์ที่ตายแล้วจะย้อมติดสีน้ำเงิน ซึ่งการทดลองนี้เป็นการทดลองการหมักเอทานอลแบบกะ โดยผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็วที่ 12 ชั่วโมงแรกของการหมักก่อนที่อัตราการใช้น้ำตาลกลูโคสจะค่อย ๆ ลดลง จนความเข้มข้นคงที่ ณ ประมาณ 30 กรัมต่อลิตร ซึ่งน้ำน้ำตาลกลูโคสยังคงเหลืออยู่ในตอนสุดท้ายของการหมักบ่งชี้ว่า เซลล์ยีสต์ไม่ได้บริโภคกลูโคสอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่เดียวกัน อัตราการลดลงของการบริโภคกลูโคสจะมีความสัมพันธ์ไปกับการเพิ่มขึ้นของเอทานอล ซึ่งผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 15 ชั่วโมงแรกด้วยอัตราการผลิตประมาณ 6.20 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง โดยความเข้มข้นสูงสุดของเอทานอลอยู่ที่ 119.7 กรัมต่อลิตร คิดเป็น 93.6 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตตาม

ทฤษฎี (theoretical yield) ที่ระดับความเข้มข้นเอทานอลสูงกว่า 70 กรัมต่อลิตร จะพบว่าค่า relative viability ของเชื้อยีสต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ผลิตผลของเอทานอล และอัตราการใช้น้ำตาลกลูโคสเริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากผลการยับยั้งเชื้อยีสต์จากเอทานอลนั่นเอง



รูปภาพ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส ( $\square$ ), ความเข้มข้นของเอทานอล ( $\circ$ ), และความสามารถในการมีชีวิตของเซลล์ยีสต์ ( $\Delta$ ) ในระหว่างการหมักเอทานอลแบบกะ

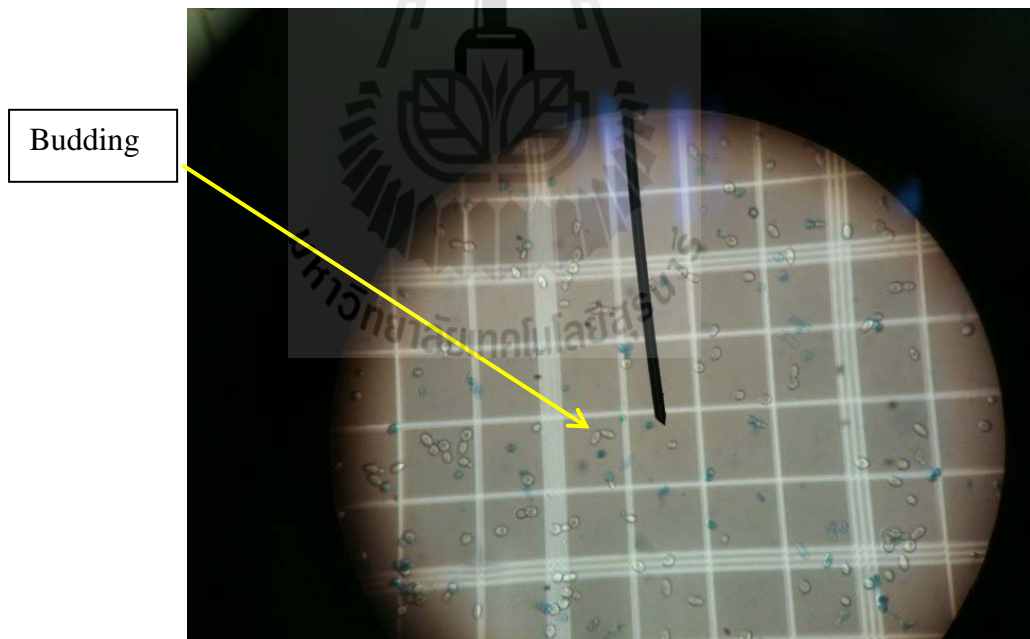
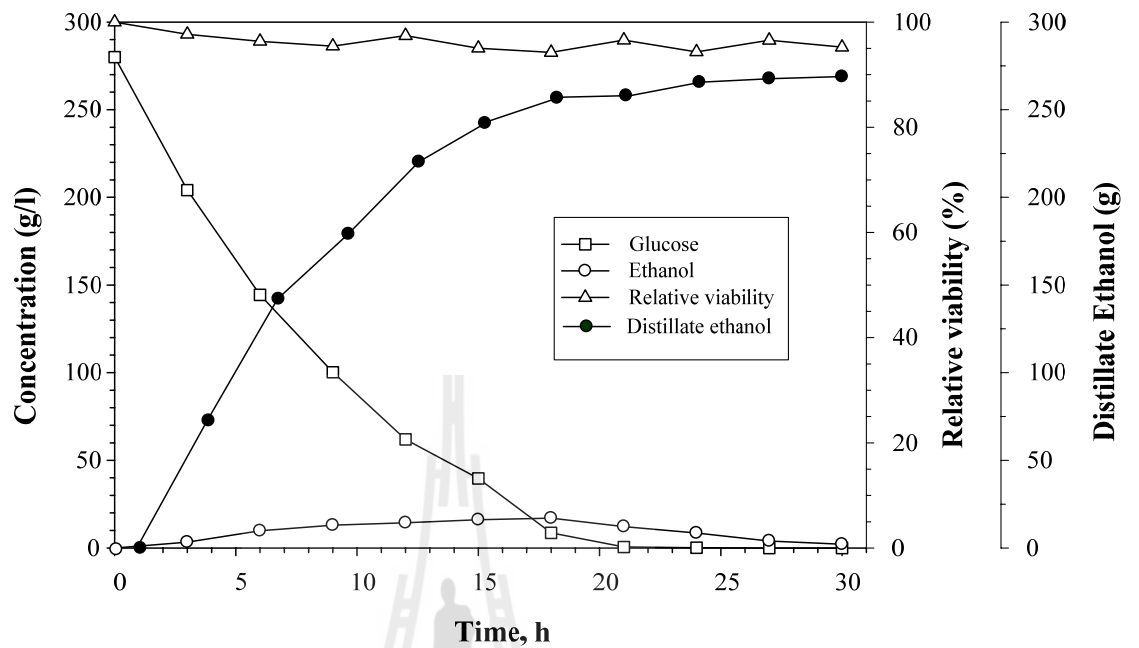
นอกจากนี้แล้ว เมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง ความเข้มข้นเอทานอลอยู่ที่สูงกว่า 100 กรัมต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นดังกล่าวส่งผลโดยตรงในการยับยั้งเชื้อยีสต์จากเอทานอล จากผลการทดลองจะ



พบว่า ไม่มีการใช้กลูโคสและไม่มีการสร้างเอทานอลเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการสิ้นสุดกระบวนการหมัก โดยที่เซลล์ยีสต์ส่วนใหญ่จะตายหมดแล้ว ดังที่ติดสีย้อมด้วยสีเมธิลีนบลู (รูปภาพ 19 ล่าง)

ในทางตรงกันข้ามกับการหมักแบบกะ การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศจะได้ผลผลิตดีกว่ามากดังที่แสดงไว้ในรูปภาพ 20 โดยหลังจาก 1 ชั่วโมงของการลากล้าเชื้อ จะเริ่มทำการแยกเอาเอทานอลออกจากระบบ โดยค่อย ๆ ลดความดันบรรยากาศที่อัตรา 200 มิลลิบาร์ต่อนาที จนกระทั่งถึง 45 มิลลิบาร์ จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นกลูโคสลดลงอย่างคงที่ที่ 26.6 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ก่อนที่จะหมดไปที่ 21 ชั่วโมง สาเหตุหลักคือการนำเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 94 ออกมาอย่างต่อเนื่องในส่วนกลั่น และผลผลิตของเอทานอลอยู่ที่ประมาณ 12.5 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และค่าดังกล่าวจะค่อย ๆ ลดลงจนสิ้นสุดกระบวนการหมัก ซึ่งอัตราการลดลงนี้ไม่ได้มีผลจากการยับยั้งจากเอทานอล แต่เกิดขึ้นจากความเข้มข้นของกลูโคสที่ลดต่ำลงในระบบ โดยที่ความเข้มข้นเอทานอลในน้ำหมัก พบว่าคงที่ในระดับต่ำกว่า 25 กรัมต่อลิตร เมื่อกลูโคสหมดลง พบว่าไม่มีการผลิตเอทานอลอีกและความเข้มข้นเอทานอลในน้ำหมักจะคงลดลงไปที่ประมาณ 2.7 กรัมต่อลิตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถกลั่นเอทานอลได้ใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์เมื่อสิ้นสุดการหมัก เอทานอลที่ได้ทั้งหมดจากการทดลองคือ 268 กรัม จาก 560 กรัมของกลูโคส (น้ำหมัก 2 ลิตร) เทียบได้กับ 93.63 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตตามทฤษฎี ถึงแม้ว่าค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับการหมักแบบกะ ระบบนี้มีข้อดีมากกว่าการหมักกะอย่างยิ่ง โดยเฉพาะเซลล์ยีสต์ที่ยังไม่ตาย (รูปภาพ 20, ข้างล่าง) โดยมีค่า relative viability มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ตลอดระยะเวลา 30 ชั่วโมงของการหมัก และบางเซลล์อยู่ในระยะแตกหน่อ ซึ่งส่งผลทำให้สามารถเติมกลูโคสลงไปได้อีก ทำให้สามารถเพิ่มการผลิตเอทานอลได้มากขึ้น

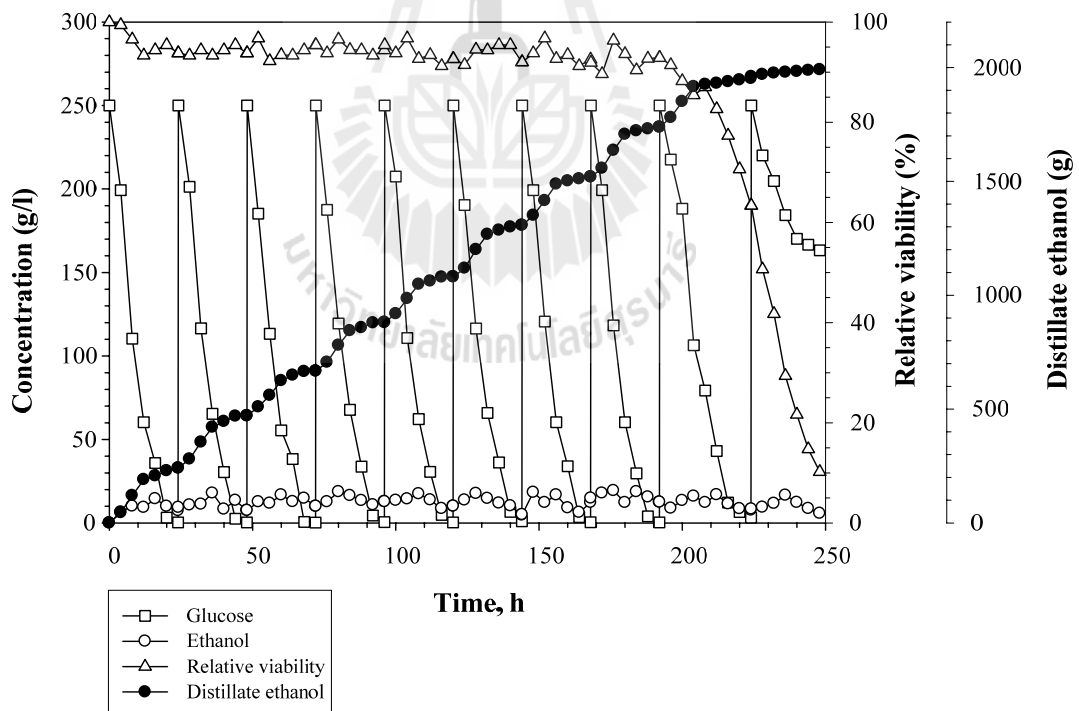
นอกจากนี้การทดลองการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักโดยใช้เทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศได้แสดงไว้ในวิดีโอประกอบการอธิบายลักษณะการทำงานของระบบดังกล่าว ภาพวิดีโอแสดงการเดือดของน้ำหมักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดการแยกสถานะของไอเอทานอลออกจากน้ำหมัก เนื่องจากความเข้มข้นเอทานอลในน้ำหมักจะอยู่ในระดับต่ำ ทำให้ความเข้มข้นของไอเอทานอลอยู่ประมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อไอผสมนี้ลอยเข้าไปในคอลัมน์แยก จะเกิดการควบแน่นของน้ำ ณ บริเวณ jacket ก่อนที่จะไหลกลับลงไปในถังปฏิกรณ์ และหากทำการควบคุมอุณหภูมิของ jacket ที่เหมาะสม จะทำให้เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 94 จะยังคงมีสถานะเป็นไอ และลอยออกจากระบบเป็นส่วนกลั่นเอทานอลต่อไป



รูปภาพ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส (□), ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมัก (○), ปริมาณของเอทานอลในส่วนกลั่น (●) และความสามารถในการมีชีวิตของเซลล์ยีสต์ (△) ในระหว่างการแยกเอทานอลควบคู่กับการหมักเอทานอลแบบกะ

ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบในจำนวนหลาย ๆ เทคนิคสำหรับการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักนั้น เพอแบริบพอเรชั่นคือระบบที่มีการศึกษามากที่สุด อย่างไรก็ตามปัญหาที่แท้จริงเกี่ยวกับปฏิบัติการแยกของเมมเบรนทำให้ระบบนี้ไม่สามารถทำได้ในทางเทคนิค ยกตัวอย่างเช่น การแยกต้องทำให้สำเร็จที่อุณหภูมิ 30 ถึง 35 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ของเอทานอลต่ำ และความเข้มข้นของเอทานอลในด้านของเพอร์มีเอทจะต่ำลง เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในด้านของสารป้อนลดลง ซึ่งไม่เหมือนกับการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักอื่นๆ ระบบการแยกด้วยการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศนี้ ไม่มีข้อจำกัดในด้านความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมัก ความเข้มข้นของเอทานอลในส่วนกลั่นจะเป็นร้อยละ 94 เสมอ ไม่ว่าความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักจะเป็นเท่าใดก็ตาม

### 3.1.2 การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักแบบกะซ้ำ



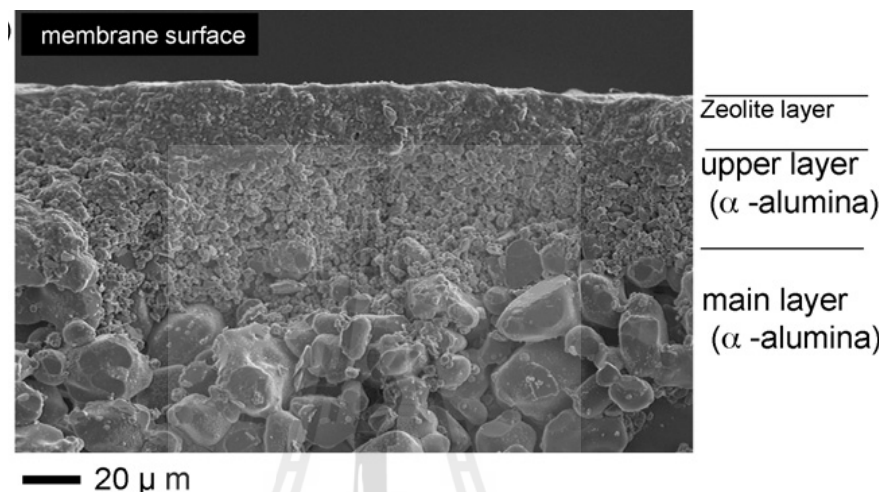
รูปภาพ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส ( $\square$ ), ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมัก ( $\circ$ ), ปริมาณของเอทานอลในส่วนกลั่น ( $\bullet$ ) และความสามารถในการมีชีวิตของเซลล์ยีสต์ ( $\Delta$ ) ในระหว่างการแยกเอทานอลควบคู่กับการหมักเอทานอลแบบกะซ้ำ (repeated-batch extractive fermentation)

จากข้อได้เปรียบของการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักคือการบูรณาการของกระบวนการผลิตและการทำบริสุทธิ์ในขั้นต้น โดยเป็นการแยกผลิตภัณฑ์เป้าหมายให้ได้ในรูปความเข้มข้นของความเข้มข้นที่สูง และส่งผลให้มีการสร้างผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการทดลองก่อนหน้านี้ พบว่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของเชื้อยีสต์ยังคงมีชีวิตอยู่เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาหมัก ทำให้มีความเป็นไปได้ในการที่จะเติมกลูโคสเข้าไปในระบบให้มากขึ้น โดยสามารถทำเป็นกะซ้ำ (repeated-batch fermentation) โดยในแต่ละรอบของการหมักนั้น จะใช้ความเข้มข้นของกลูโคสเริ่มต้นที่ 250 กรัมต่อลิตร เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากการยับยั้งสารตั้งต้น รูปภาพ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาของการหมักกับความเข้มข้นของกลูโคส ความเข้มข้นของเอทานอล ปริมาณของส่วนกลั่นเอทานอลและ relative viability ของเซลล์ยีสต์ระหว่างแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักซ้ำแบบกะซ้ำโดยใช้การกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ โดยเริ่มทำการแยกเอทานอลหลังจาก 0.5 ชั่วโมงจากการเติมกลูโคสและเซลล์ยีสต์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของกลูโคสเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการหมักเป็นเวลา 15 ชั่วโมงและอัตราการใช้น้ำตาลกลูโคสจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งกลูโคสถูกใช้อย่างสมบูรณ์หลังจาก 24 ชั่วโมง โดยเอทานอลที่ผลิตได้จะถูกแยกอย่างต่อเนื่องจากระบบที่อัตราเฉลี่ย 25 กรัมต่อชั่วโมง โดยมีความเข้มข้นประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักมีค่าคงที่ต่ำกว่า 20 กรัมต่อลิตร การเติมกลูโคสจะทำการเติมเมื่อปริมาณของน้ำตาลกลูโคสในถังหมักหมดลง ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถทำการเติมกลูโคสเพื่อทำการหมักแบบกะซ้ำได้ถึง 8 ครั้ง และพบว่าระบบมีความเสถียรมากเป็นระยะเวลา 230 ชั่วโมง เอทานอลถูกแยกออกมาเรื่อยๆเกือบ 2000 กรัม อย่างไรก็ตาม หลังจากการเติมน้ำตาลกลูโคสครั้งที่เก้า ประสิทธิภาพการหมักลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีอัตราการใช้กลูโคสลดลงเป็นอย่างมาก โดยการทดลองสิ้นสุดหลังจาก 250 ชั่วโมง เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสคงที่และไม่มีการผลิตเอทานอลอีก โดยสอดคล้องกับการลดลงอย่างรวดเร็วของค่า relative viability ซึ่งผลการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย HPLC พบว่ามีกรดแลกติกปนเปื้อนอยู่ประมาณ 70 กรัมต่อลิตร ซึ่งอาจจะจะเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้เซลล์ยีสต์ตาย กรดแลกติกคือผลพลอยได้ที่ถูกสร้างขึ้นในระหว่างที่มีการหมักเอทานอล (Chovau *et al*, 2011) กลไกที่เป็นที่ยอมรับของการยับยั้งโดยกรดแลกติกคือการเกี่ยวข้องกับการละลายของส่วนที่ไม่แตกตัว จากภายในไซโตพลาสซึมเมมเบรน ทำให้เกิดความเป็นกรดในไซโตพลาสซึม และการเสื่อมสภาพของกลไกการนำสารเข้าออกเซลล์ของเซลล์เมมเบรน (Lin *et al*, 2004) นอกจากนี้ ยังไม่ได้มีการควบคุมพีเอชของน้ำหมัก และกรดแลกติกที่อยู่ในรูปไม่แตกตัวจะมีความเป็นพิษที่สูงกว่ารูปแบบที่แตกตัว (lactate) ทั้งนี้กรดแลกติกเป็นสารที่ไม่ระเหยก็เลยมีการสะสมในน้ำหมักและทำให้เกิดผลการยับยั้งในที่สุด

### 3.2 การพัฒนาเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกสำหรับการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล

#### 3.2.1 การวิเคราะห์พื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

##### 3.2.1.1 ท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ

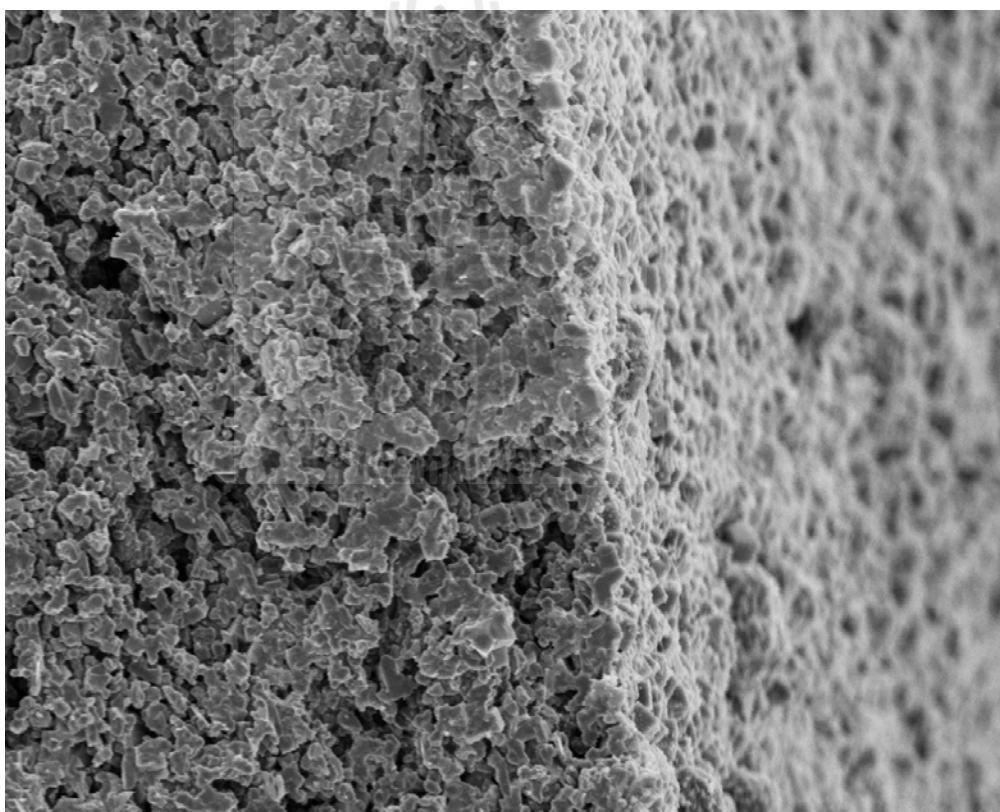


รูปภาพ 22 ภายถ่ายท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ (NaA) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Sato *et al.*, 2008)

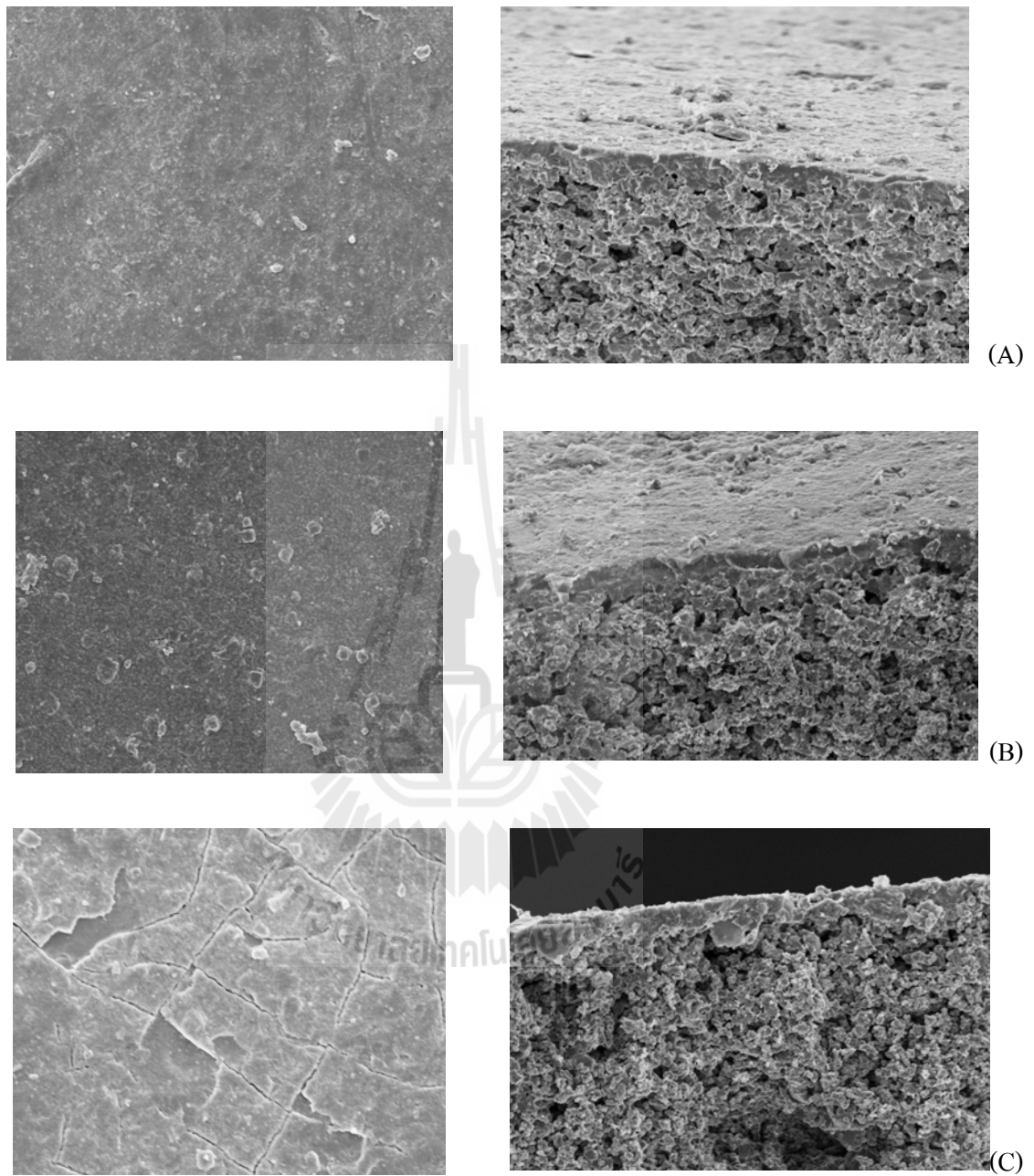
พื้นฐานของท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกชนิดโซเดียมเอ จากบริษัท Mitsui Engineering & Shipbuilding ได้ถูกศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดย Sato และคณะ (2008) โดยจะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับโครงสร้างของเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกชนิดแผ่นเรียบที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งรูปภาพ 22 แสดงภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกดังกล่าว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของเยื่อที่แยกออกเป็น 3 ชั้นคือ ชั้นล่างและชั้นกลางจะเป็นส่วนของเซรามิกที่เป็นชั้นรองรับ (supportive layer) โดยจะมีการออกแบบเป็นพิเศษให้มีลักษณะที่ไม่สมมาตร (asymmetric) กล่าวคือชั้นล่างซึ่งเป็นส่วนหลักของชั้นรองรับ (main layer) ซึ่งจะมีลักษณะที่เป็นเม็ดของผงอะลูมินาที่เกาะกันอย่างหนาแน่น ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดขึ้นมากมาย โดยช่องว่างที่ใหญ่จะไม่ทำหน้าที่ในการคัดเลือกผ่าน แต่จะส่งเสริมความแข็งแรงให้กับชั้นรองรับเท่านั้น ส่วนชั้นที่อยู่เหนือขึ้นไปจะเรียกว่า upper layer ซึ่งเป็นชั้นที่มีลักษณะเป็นเม็ดของผงอะลูมินาที่เกาะกันอย่างละเอียด โดยหน้าที่หลักของชั้นนี้ก็คือช่วยป้องกันการเกิดผลึกของซีโอไลต์ที่ไม่ให้เกิดขึ้นใน

main layer ซึ่งหากไม่มีชั้น upper layer นี้ สารละลายของซีโอไลต์จะซึมเข้ามาใน main layer ทำให้เกิดผลึกของซีโอไลต์ที่หนา ส่งผลให้ชั้นคัดเลือกมีความหนามาก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ การถ่ายเทมวลของน้ำที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่น ส่วนชั้นบนสุดจะเป็นชั้นของซีโอไลต์ (zeolite layer) โดย ชั้นดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นชั้นคัดเลือก (selective layer) ซึ่งผลึกของซีโอไลต์ได้ซึมผ่านชั้น upper layer เข้าไปเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ความหนาของชั้นซีโอไลต์มีเพียง 20 ไมครอนเท่านั้น ซึ่ง ความหนาของชั้นคัดเลือกที่น้อย จะส่งผลทำให้ความต้านทานในการถ่ายเทมวล (mass transfer resistance) ที่ต่ำ ค่าฟลักซ์ที่ได้จะเพิ่มมากขึ้น

### 3.2.1.2 เยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ



รูปภาพ 23 ภาพผิวหน้าและตัดขวางของชั้นรองรับก่อนที่จะทำการเคลือบซีโอไลต์



รูปภาพ 24 ภาพถ่ายภาพผิวด้านหน้า (surface) และภาคตัดขวางของเชื้อแผ่นเซรามิกชนิดต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูปภาพ 23 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชั้นรองรับเซรามิกที่ได้ทำการเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ จากภาพจะสังเกตเห็นได้ว่าหลังจากที่ขึ้นรูป slurry ของผล kaolin และนำไปเข้ากระบวนการอบร้อนหรือ sintering แล้ว โดยจากภาพถ่านจะสังเกตเห็นการเรียงตัวของเม็ด kaolin ซึ่งเชื่อมติดกันบางส่วน เกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุนและมีความสมมาตร (symmetric support) ตลอดทั้งด้านบนและด้านล่างของชั้นรองรับดังกล่าว โดยชั้นรองรับเซรามิกที่ผ่านกระบวนการ sintering แล้วนี้ จะทำหน้าที่หลักในการเสริมสร้างความแข็งแรงเชิงกลให้กับเยื่อแผ่น เนื่องจากระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นเป็นระบบที่ต้องมีการใช้อุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว จะมีการใช้ความดันประมาณ 4 บาร์ และลักษณะของรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ จะไม่ได้มีหน้าที่ในการคัดเลือกการแพร่ผ่านของน้ำโดยตรง แต่จะทำหน้าที่ในการทำให้โมเลกุลของน้ำที่ผ่านชั้นคัดเลือก (selective layer) มาแล้วให้หลุดออกไปทางด้านเพอร์มิเอทอย่างรวดเร็ว โดยจะมีค่าความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลที่ต่ำมาก แต่อย่างไรก็ตาม รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ จะมีข้อเสียคือสารละลายอิมตัวของซีโอไลต์จะสามารถแทรกซึมเข้าไปและเกิดผลึกขึ้นภายในชั้นที่อยู่ลึกเข้าไปด้านใน ส่งผลทำให้เกิดเป็นชั้นคัดเลือกที่หนา ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าฟลักซ์โดยรวมได้

รูปภาพ 24 แสดงภาพถ่ายทางด้านบน (top surface) และภาคตัดขวางของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกที่ได้ทำการเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ โดยได้ทำการผสมโดยผสมสารละลายทั้ง 2 ชนิดคือ สารละลายอะลูมิเนต (aluminate solution) และ สารละลายซิลิเกต (silicate solution) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันโดยมีองค์ประกอบทางเคมีของ  $Al_2O_3 : SiO_2 : Na_2O : H_2O$  อยู่ที่ 3 ความเข้มข้นคือ 1:2:2:100 (A), 1:2:2:150 (B) และ 1:2:2:200 (C) ตามลำดับ โดยจากสถานะที่ใช้ในการเคลือบดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2.1 พบว่าเกิดผลึกของชั้นเคลือบซีโอไลต์บนผิวหน้าของชั้นรองรับเซรามิกได้เป็นอย่างดี โดยมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 50 ไมครอน โดยความหนาขนาดนี้จะสังเกตพบได้ในตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด ซึ่งสารละลายของ seed solution ได้ซึมเข้าไปในชั้นด้านในของชั้นรองรับเซรามิก ก่อนที่จะมีการเกิดผลึกขึ้นปกคลุมผิวหน้าของชั้นรองรับเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นคัดเลือก โดยความเข้มข้นของ seed solution จะมีผลต่อลักษณะของผิวหน้าเยื่อแผ่นโดยรูปภาพ 24 (A) และ (B) แสดงให้เห็นถึงการเกิดผลึกซีโอไลต์ที่สม่ำเสมอทำให้ได้พื้นผิวที่เรียบ (smooth) ในขณะที่รูปภาพ 24 จะสังเกตเห็นได้ว่าผิวหน้าของเยื่อแผ่นจะมีลักษณะที่แตกเป็นร่อง (crack) ซึ่งเกิดขึ้นจากการใช้ seed solution ที่มีความเข้มข้นมากเกินไป แต่อย่างไรก็ตามส่วนที่สำคัญกว่าคือการทดสอบประสิทธิภาพการแยกน้ำซึ่งจะได้แสดงในหัวข้อถัดไป



### 3.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกน้ำออกจากเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกชนิดต่าง ๆ

สำหรับการทดลองการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลด้วยเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้น จะทำการเปรียบเทียบเยื่อแผ่นเชิงประกอบแบบแผ่นเรียบที่ได้พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการกับกับท่อใยกลวงเชิงประกอบทางการค้าจากบริษัท Mitsui Engineering & Shipbuilding, Japan โดยทำการทดลองที่ความดัน 1 บรรยากาศและใช้อุณหภูมิของสารป้อน 85 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศในด้านของเพอร์มิเอทเท่ากับ 5 มิลลิบาร์ และความเข้มข้นของน้ำในด้านของสารป้อนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งการแยกน้ำออกจากเอทานอลเป็นผลมาจากความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ระหว่างน้ำและเอทานอลภายในโครงสร้างของสลิคซีโอไลต์ที่นำมาทำเป็นเยื่อแผ่นนี้ โดยผลการทดลองค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท ค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การแยก ( $\alpha$ ) นั้นแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ประสิทธิภาพการแยกน้ำออกจากไอของผสมเอทานอลด้วยเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกชนิดต่าง ๆ โดยใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของน้ำในสารป้อน (%)	ความเข้มข้นของน้ำในเพอร์มิเอท (%)	ฟลักซ์โดยรวม (kg.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup> )	$\alpha$
A	5.0	98.20	0.96	1040
B	5.0	98.01	0.72	940
C	5.0	98.30	0.41	1100
D*	5.0	98.25	3.06	1066

จากผลการทดลองการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นของตัวอย่างทั้งสี่ตัวอย่างนั้น พบว่าตัวอย่าง D ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ได้จากทางการค้านั้น จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยมีค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทเท่ากับ 3.06 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ความเข้มข้นของน้ำในเพอร์มิเอทนั้น มีค่าสูงถึงร้อยละ 98.25 ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูงถึง 1066 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง A B และ C นั้น จะให้ค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทเท่ากับ 0.92, 0.72, 0.41 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง

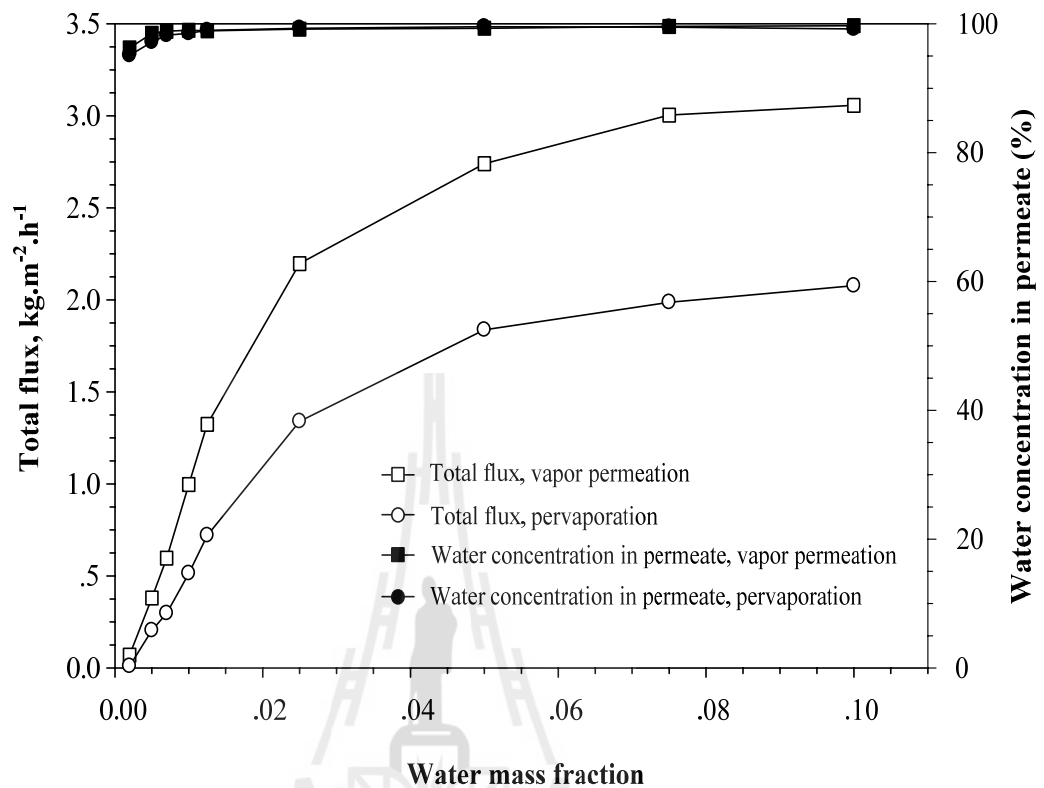
\* ท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกชนิดโซเดียมเอโนในเชิงพาณิชย์ (Mitsui Engineering & Shipbuilding, Japan)

และความเข้มข้นของน้ำในเพอร์มิอเททเท่ากับร้อยละ 98.20, 98.01 และ 98.30 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของทุกตัวอย่างจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 1000 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำออกจากสารป้อนได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้เนื่องจากคุณลักษณะที่เป็น molecular sieve ของสารซีโอไลท์ที่ใช้เป็นชั้นคัดแยกนั่นเอง ส่วนค่าฟลักซ์ที่แตกต่างกันนี้ เป็นผลโดยตรงจากความเข้มข้นของสารละลาย (ซีโอไลท์) ที่นำมาใช้ในการเคลือบ ซึ่งยังมีความเข้มข้นมากขึ้นเท่าใด ก็จะส่งผลให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลสูงขึ้นเท่านั้น นอกจากนี้การเคลือบที่มีความหนาที่มาก ก็จะส่งผลให้ค่าฟลักซ์ยิ่งต่ำลงไปเช่นกัน ซึ่งข้อได้เปรียบของท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกชนิดโซเดียมเอที่ได้จากการค้ำนั้น จะมีการใช้ชั้นรองรับซึ่งเป็นแบบไม่สมมาตร (asymmetric) ทำให้สามารถเคลือบชั้นผลึกของซีโอไลท์ที่มีความบางมากได้ โดยสารละลายอิมตัวของซีโอไลท์จะไม่ซึมเข้าไปด้านในของชั้นรองรับ ซึ่งแตกต่างจากเยื่อแผ่นเชิงประกอบที่ผลิตขึ้นภายในห้องปฏิบัติการที่ชั้นรองรับมีลักษณะเป็นแบบสมมาตร (symmetric support) ทำให้สารละลายอิมตัวของซีโอไลท์ซึมเข้าไปด้านในของชั้นรองรับและเกิดผลึกภายใน ซึ่งส่งผลให้ได้ชั้นซีโอไลท์ที่หนา ยิ่งหนามากก็จะทำให้ได้ค่าฟลักซ์ที่ต่ำลงไป ดังนั้นในการทดลองถัดไป จะเป็นการพัฒนาระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นให้อยู่ในระดับโรงงานต้นแบบ ซึ่งการใช้ท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกชนิดโซเดียมเอที่ได้จากการค้ำ จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการแยกน้ำที่ดีกว่าการพัฒนาเยื่อแผ่นขึ้นมาใช้เอง

### 3.3 การศึกษาอิทธิพลของสถานะต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำของท่อใยกลวงเชิงประกอบซีโอไลท์ชนิดโซเดียมเอ

#### 3.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการแยกน้ำด้วยระบบเพอร์เวิร์ปเพอร์ซันและการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น

จากผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกน้ำด้วยระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นระหว่างเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกที่ได้พัฒนาขึ้นภายในห้องปฏิบัติการและท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกที่ได้จากการค้ำนั้น พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์การแยกมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นทางการค้ำนั้น จะให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่าเยื่อแผ่นที่ได้จากห้องปฏิบัติการมาก ทำให้มีข้อได้เปรียบในการพัฒนาระบบให้เป็นขนาดโรงงานต้นแบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ท่อใยกลวงเชิงประกอบเซรามิกที่ได้จากการค้ำมาทำเป็นระบบดังกล่าว



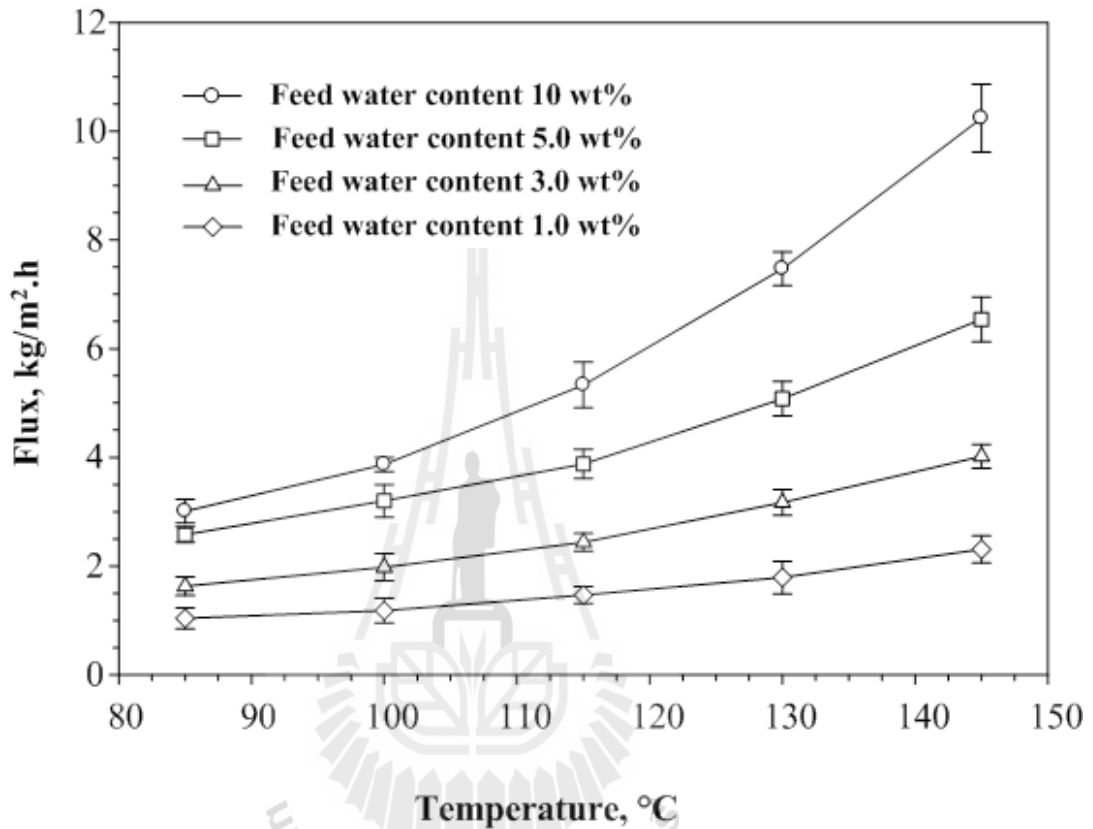
รูปภาพ 25 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำในสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวมและความเข้มข้นของน้ำในด้านเพอร์มิเอทเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบเพอร์เว็ปพอเรชั่นและการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

การทดลองนี้จะเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำในไอของสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวมและความเข้มข้นของน้ำในด้านเพอร์มิเอท ซึ่งมีการผันแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่ร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังเป็นการคัดเลือกระบบเมมเบรนที่เหมาะสม โดยเป็นการเปรียบเทียบกันสำหรับค่าฟลักซ์ของเทคนิคเพอร์เว็ปพอเรชั่นและการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น โดยทำการควบคุมอุณหภูมิในการทดลองไว้ที่ 75 °C สำหรับระบบเพอร์เว็ปพอเรชั่น ในขณะที่ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้นจะใช้อุณหภูมิคงที่ ที่ 85 °C ซึ่งข้อมูลจากการทดลองที่เกี่ยวกับอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำในสารป้อน (feed water) กับค่าฟลักซ์โดยรวมและค่าสัมประสิทธิ์การแยก ( $\alpha$ ) ทั้งสองเทคนิค จะแสดงในรูปภาพ 25 สำหรับกระบวนการเพอร์เว็ปพอเรชั่นนั้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นในด้านของสารป้อนจะแปรผันโดยตรงกับค่าฟลักซ์โดยรวม ซึ่งเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นในด้านของสารป้อนจากร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 10 ค่าฟลักซ์โดยรวมนั้นจะอยู่ในช่วง 0.51 ถึง 2.08 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

ต่อชั่วโมง โดยมีลักษณะเป็นรูปโค้งดังภาพ ซึ่งการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์โดยรวมนั้น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในด้านของสารป้อนซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อน (driving force) โดยตรงของระบบการแยกด้วยเยื่อแผ่นดังแสดงในสมการที่ 1 ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปแล้วค่าฟลักซ์โดยรวมที่เพิ่มขึ้นมักจะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การแยก ( $\alpha$ ) แต่อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสนใจว่า เยื่อแผ่นเชิงประกอบแบบเซรามิก จะมีความสามารถในการกำจัดน้ำจากด้านไอของสารป้อนที่สูงมากและไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำในด้านสารป้อนมากนัก ซึ่งส่วนเพอร์มิเทจจะมีความเข้มข้นของน้ำมากกว่าร้อยละ 95 สำหรับทุกการทดลอง ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ ค่าการสัมประสิทธิ์การแยกมีมากกว่า 1000 และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่เป็น molecular sieve ของชั้นซีโอไลท่นั้นเอง โดยจะมีข้อได้เปรียบที่ดีกว่าเยื่อแผ่นชนิดที่เป็นพอลิเมอร์ ซึ่งอาจจะเกิดการบวมตัวของสายโซ่พอลิเมอร์จากการสัมผัสกับตัวทำละลายอินทรีย์โดยตรงได้ โดยปกติแล้วค่าฟลักซ์โดยรวมและค่าสัมประสิทธิ์การแยกของเยื่อแผ่นพอลิเมอร์จะอยู่ที่ประมาณ 1.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงและมีค่าสัมประสิทธิ์การแยกประมาณ 100

สำหรับระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้น โดยรวมแล้วพบว่าจะมีประสิทธิภาพในการแยกน้ำได้ดีว่าระบบเพอร์เวปพอเรชันสำหรับทุกความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นในด้านของสารป้อน แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของค่าฟลักซ์โดยรวม นั้น พบว่ามีค่าสูงสุดถึงประมาณ 3.06 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น เป็นระบบที่ต้องการพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่น้อยกว่าระบบเพอร์เวปพอเรชันสำหรับการแยกเอาน้ำออกในอัตราที่เท่ากัน โดยค่าฟลักซ์โดยรวมที่สูงกว่าระบบเพอร์เวปพอเรชันนั้น อาจเกิดจากหลายสาเหตุ รวมไปถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าในดำเนินการ และการที่สารป้อนอยู่ในสถานะที่เป็นไอ ส่งผลทำให้เกิดชั้นขอบเขต (hydrodynamic boundary layer) ที่บางมากเมื่อเทียบกับเทคนิคเพอร์เวปพอเรชัน ซึ่งสารป้อนจะอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว นอกจากนี้ส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและเพอร์เวปพอเรชันคือ ไอที่ป้อนเข้าไปในระบบผ่านผิวหน้าของเยื่อแผ่นนั้น สามารถควบคุมอุณหภูมิและความดันได้ ส่วนระบบเพอร์เวปพอเรชันนั้น อุณหภูมิสูงสุดของสารป้อนมักจะอยู่ใกล้กับจุดเดือดของสารละลายเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเหตุสมควรที่จะใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นสำหรับการทดลองที่เหลือทั้งหมดในการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล

### 3.3.2 อิทธิพลจากอุณหภูมิของสารป้อน



รูปภาพ 26 อิทธิพลของอุณหภูมิในด้านของสารป้อนและความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวม

อิทธิพลอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอลก็คือ อุณหภูมิของไอที่ผ่านโมดูลของเยื่อแผ่น ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาอัตราการกำจัดน้ำในไอของสารป้อนที่มีความเข้มข้นของน้ำร้อยละ 1 ถึง 10 และใช้อุณหภูมิ 85 ถึง 145 ตามลำดับ โดยการทดลองได้ทำการควบคุมความดันที่เข้าสู่ระบบ (feed pressure) ให้คงที่ที่ 3.0 บาร์ และมีอัตราการไหลของรีเทนเตต (retentate) ที่ 0.20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์โดยรวมและค่าฟลักซ์ของน้ำ (water flux) นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสำหรับทุก ๆ ความเข้มข้นน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (feed water concentrations) ดังที่ได้แสดงในรูปภาพ 26 โดยที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสนั้น ค่าฟลักซ์โดยรวมนั้นจะอยู่ในช่วงของ 1.04–3.01 กิโลกรัมต่อ

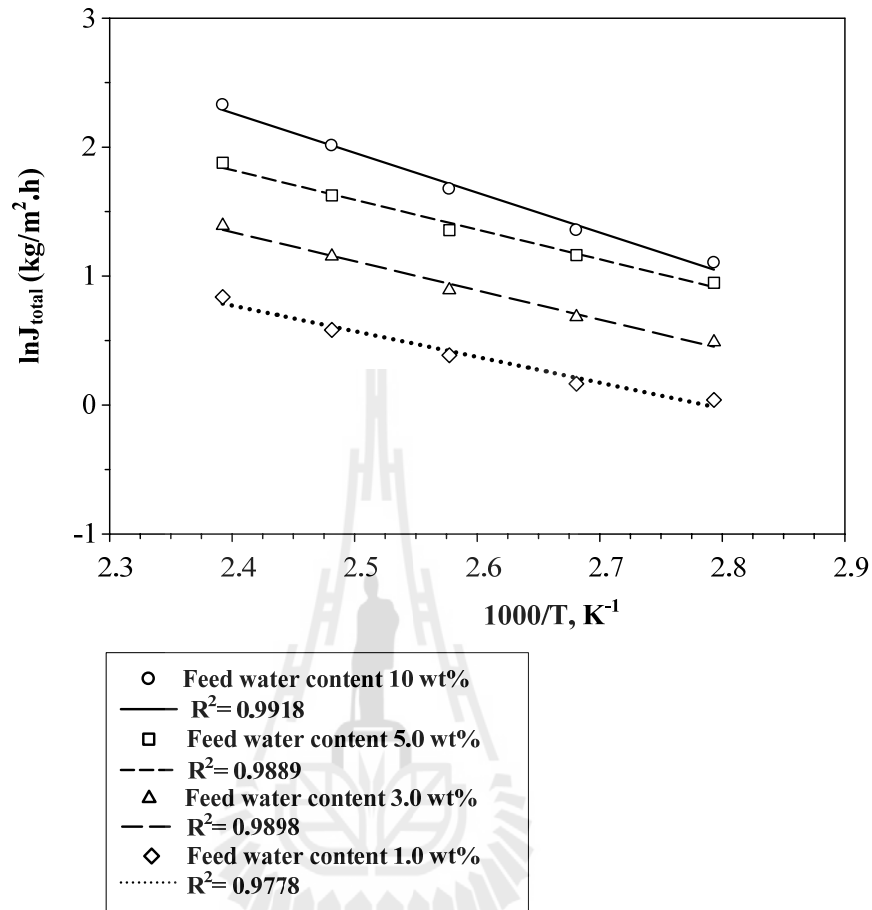
ตารางเมตรต่อชั่วโมง เป็นปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.0 ถึง 10.0 ตามลำดับ และมีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง โดยมีรูปร่างเป็นพาราโบลา จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทนั้น จะเพิ่มขึ้นอย่างมากในระดับที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำที่เพิ่มขึ้น สำหรับกราฟของความเข้มข้นของน้ำในด้านสารป้อนร้อยละ 1.0 พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไอที่เข้าสู่ระบบ นั้น มีผลแตกต่างเพียงเล็กน้อยต่อการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท กล่าวคือเพิ่มขึ้นจาก 1.04 ไปเป็น 2.30 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งการเพิ่มขึ้นประมาณ 120% นี้ เป็นสาเหตุมาจากค่าความดันไอลอยของน้ำ (water partial pressure) ที่อยู่ในระดับต่ำ ในขณะที่ไหลผ่านผิวหน้าของเยื่อแผ่นนั่นเอง จึงทำให้รูปกราฟเกือบจะเป็นเส้นตรง ในขณะเดียวกัน สำหรับความเข้มข้นของน้ำในด้านของสารป้อนที่ร้อยละ 10.0 จากกราฟจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทที่เข้าสู่ระบบของสารป้อน ในการทดลองนี้ พบว่าค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทมีค่าสูงสุด ที่ 10.24 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่า 3 เท่าหรือ 300% ของค่าที่วัดได้จากการทำการทดลอง ณ 85 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของอุณหภูมิที่ทำการทดลองกับค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท ( $J_{total}$ ) สามารถแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นไปตามลักษณะของสมการอาร์เรเนียส หรือ Arrhenius equation ตามสมการ

$$J_{total} = J_0 \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right)$$

โดย  $E_p$  คือพลังงานกระตุ้นของการถ่ายเทมวล ,  $J_0$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือที่เรียกว่า pre-exponential Arrhenius factor ซึ่งมีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ส่วนค่า  $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (กิโลจูลต่อโมลต่อเคลวิน) และ  $T$  คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) โดยที่พลังงานการกระตุ้นสามารถคำนวณได้จากเส้นความชันของลอการิทึมของค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท กับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ผกผันของการทดลอง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงใน

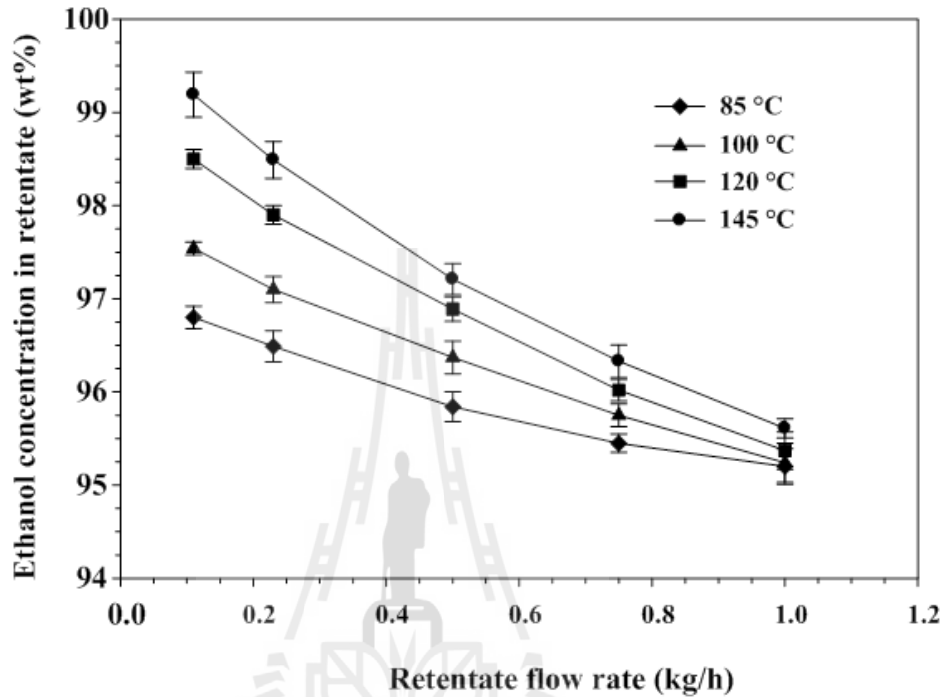
รูปภาพ 27



รูปภาพ 27. การพล็อตสมการอาร์เรเนียสระหว่างค่าการปลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทและค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ผกผัน

โดยในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่มีต่อค่าปลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทคือ 60.05 กิโลจูลต่อโมล โดยได้ทำการคำนวณจากค่าเฉลี่ยของความชันที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของน้ำในด้านของสารป้อนทั้ง 4 ความเข้มข้น ซึ่งค่าความชันที่ได้จะมีช่วงของการผันแปรอยู่ที่ 46.23–80.48 กิโลจูลต่อโมล กล่าวโดยสรุปแล้ว ถึงแม้ว่าค่าปลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทที่ได้จากการศึกษาในอุณหภูมิต่าง ๆ เหล่านี้ จะมีค่าน้อยกว่างานที่ได้ทำการศึกษาก่อนหน้านี้โดยใช้เยื่อแผ่นชนิดเดียวกัน (Sato *et al.*, 2008) แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของน้ำในด้านของเพอร์มิเอทนั้น ยังคงค่อนข้างสูง โดยทุก ๆ การทดลองจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแยกที่สูงกว่า 1000

### 3.3.3 อิทธิพลจากอัตราการไหลของรีเทนเนต (retentate)



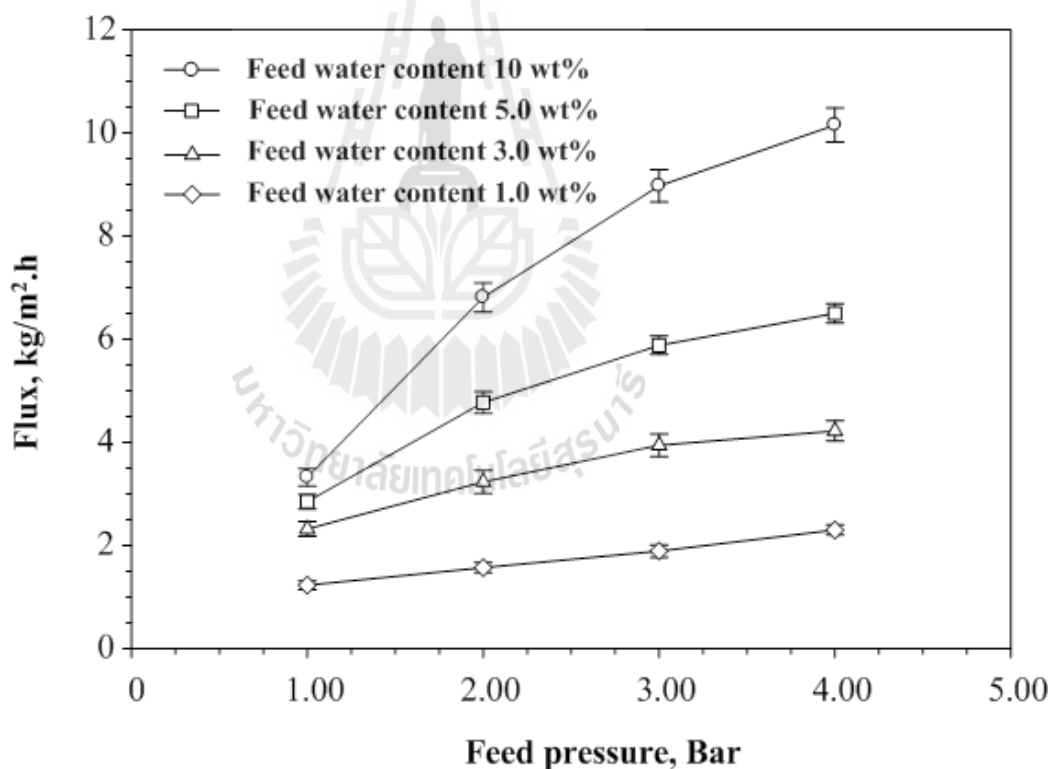
รูปภาพ 28 อิทธิพลของอัตราการไหลของรีเทนเนตและความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท

อิทธิพลอีกอย่างหนึ่งที่มีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำของระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นคืออัตราการไหลของรีเทนเนตที่ป้อนเข้าสู่โมดูลของเยื่อแผ่น ซึ่งแสดงในรูปภาพ 28 โดยในการทดลองนี้ ได้ทำการควบคุมอัตราการไหลของรีเทนเนต ให้อยู่ในช่วง 0.11 ถึง 1.00 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีการควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำที่เข้าสู่โมดูลระหว่าง 85 ถึง 145 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลของรีเทนเนต ที่ต่ำๆนั้น แสดงให้เห็นว่าไอน้ำของเอทานอลและน้ำ มีเวลาที่จะสัมผัสกับพื้นผิวของเยื่อแผ่นได้ยาวนานขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลในกระแสรีเทนเนตจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเป็นสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สำหรับอุณหภูมิไอน้ำของสารป้อนที่สูงๆ ยกตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 85 °C นั้น อัตราการไหลของรีเทนเนต จะมีผลกระทบน้อยที่สุด โดยที่อัตราการไหล 1.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของเอทานอลในรีเทนเนตที่วัดได้เมื่ออุณหภูมิของสารป้อนที่ 85, 100, 120, และ 145 องศาเซลเซียส จะค่อยๆ



เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 95.0 เป็น 95.20, 95.24, 95.37, และ 95.61 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของเอทานอลในรีเทนเตตจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล เมื่อมีการใช้อัตราการไหลที่ต่ำและมีอุณหภูมิของสารป้อนที่สูง เช่นความเข้มข้นของเอทานอลในรีเทนเตตมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 99.30 ที่อัตราการการไหล 0.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและที่อุณหภูมิไอของสารป้อน 145 องศาเซลเซียส กล่าวโดยทั่วไปแล้ว ประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากจากไอผสมของเอทานอลที่สูงนั้น จะมีเหตุมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้แรงผลักดัน (driving force) มีค่าที่มากขึ้นนั่นเอง

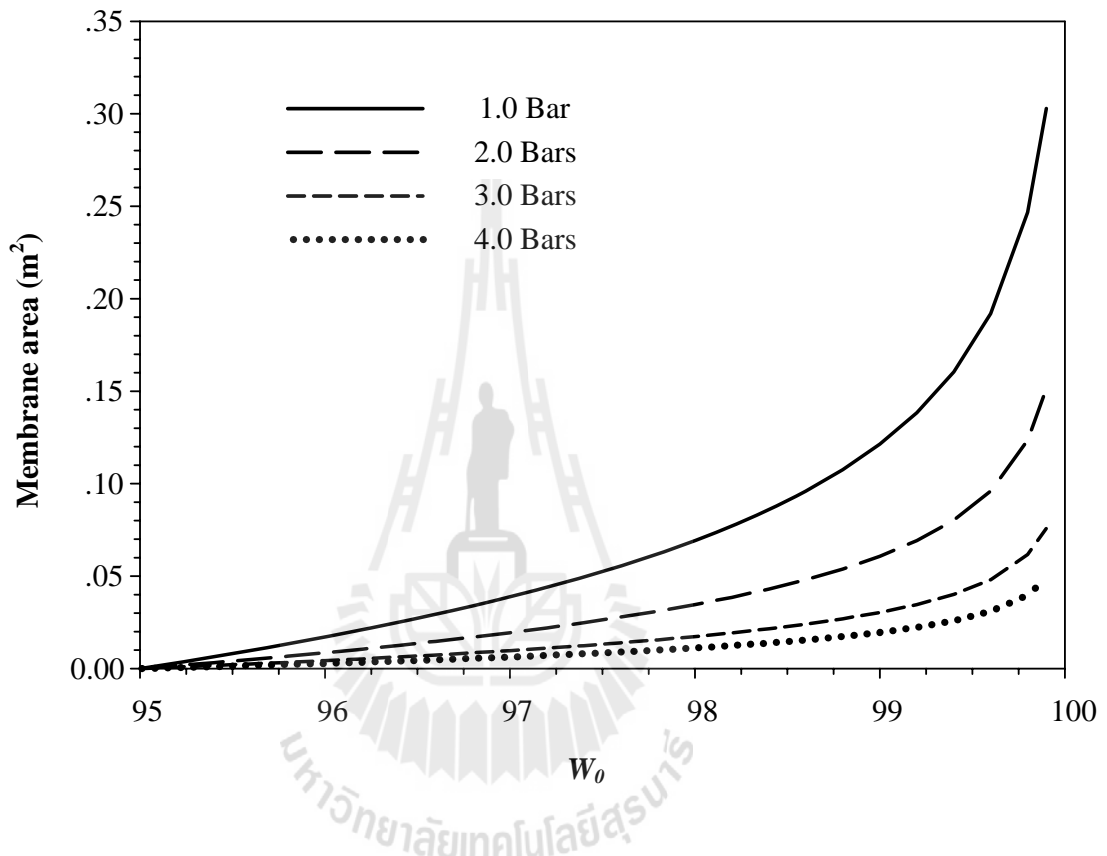
### 3.3.4 อิทธิพลจากความดันไอ



รูปภาพ 29 อิทธิพลของอัตราการไหลของรีเทนเตตและความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอต

นอกจากอิทธิพลของสภาวะการทดลองต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว หนึ่งในสิ่งที่สำคัญที่สุดของตัวแปรในระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้นคือความดันย่อยหรือ partial pressure ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงขับเคลื่อน (driving force) ของน้ำผ่านชั้นผิวของเยื่อแผ่นเซรามิกเมทริกซ์ดัง แสดงในสมการที่ (4) ซึ่งรูปภาพ 29 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเททกับความดันที่เข้าสู่ระบบ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิของสารป้อนคงที่ ที่ 145 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองโดยทั่วไป แสดงให้เห็นว่า ค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเททที่เพิ่มขึ้นนั้น จะแปรผันโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของความดันที่เข้าสู่ระบบ (feed pressure) โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนสูง ๆ และค่าฟลักซ์ของเอทานอลนั้น มีค่าที่เกือบจะเป็นศูนย์สำหรับทุก ๆ สภาวะของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างที่แข็งแรงของชั้นผิวที่เป็นเซรามิกนั่นเอง สำหรับความเข้มข้นน้ำในสารป้อนร้อยละ 1.0 พบว่าค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเททนั้น จะแปรผันโดยตรงกับความต่างของความดันไอย่อย (partial vapor pressure) ระหว่างทั้งสองด้านของเยื่อแผ่น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.23 ถึง 2.30 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้แล้ว ค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเททนั้นได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้นน้ำในสารป้อนเพิ่มขึ้น สำหรับความเข้มข้นน้ำในสารป้อนร้อยละ 3.0 นั้นพบว่ามีความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำ และความดันของสารป้อนที่เข้าสู่ระบบในช่วงไม่เกิน 3 บาร์ จากนั้นความสัมพันธ์จะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไม่เป็นเส้นตรง (เป็นเส้นโค้งแบบคว่ำ) เมื่อค่าความดันไอของระบบ (feed pressures) อยู่ที่ 3.0 ถึง 4.0 บาร์ โดยมีค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเททอยู่ที่ 2.32, 3.23, 3.94, และ 4.22 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้นน้ำในสารป้อนร้อยละ 10.0 นั้น ผลการทดลองพบว่า เมื่อค่าความดัน ไอของสารป้อนเพิ่มขึ้นจาก 1.0 เป็น 2.0 บาร์ จะส่งผลทำให้มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเททจาก 3.22 เป็น 6.81 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มความดันขึ้นไปให้สูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเททจะเพิ่มขึ้นอย่างเล็กน้อย โดยไม่ได้การเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเส้นตรงตามการเพิ่มขึ้นของความดันไอของสารป้อน ซึ่งค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเททที่ความดันไอ 2.0, 3.0, และ 4.0 บาร์ สามารถวัดได้คือ 6.81, 8.97 และ 10.15 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการกำจัดน้ำด้วยเยื่อแผ่นมักจะไม่คงที่ในช่วงทั้งหมดที่ทำการทดลอง

### 3.3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทมวลของน้ำบนเยื่อแผ่น



รูปภาพ 30 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ต้องการ ณ ความดันและความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นร้อยละของรีเทนเทต ( $W_0$ ).

ในการออกแบบและคำนวณพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นสำหรับอัตราการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลตามต้องการนั้น สามารถทำการคำนวณเพื่อประมาณค่าของพื้นที่เยื่อแผ่นที่ต้องการได้โดยอาศัยค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทและค่าสัมประสิทธิ์การแยก ณ สภาวะของการทดลองหนึ่ง ๆ ซึ่งการสร้างสมการพื้นฐานสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ จะอ้างอิงถึงอัตราของการถ่ายเทมวลของสารตามกฎข้อที่ 1 ของฟิคส์ (Fick's law) ซึ่งแสดงใน สมการที่ 1 โดยสมมุติฐานหลักของแบบจำลองนี้มีดังนี้ 1. การสูญเสียความดันจะมีเพียงเล็กน้อยในทางด้านใดด้านหนึ่งของเมมเบรน

2. การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่คงที่ (isothermal operation) และ 3. ทิศทางการไหลของไอสารป้อนและไอของเพอร์มิเอทผ่านที่ผ่านพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นเป็นแบบปลั๊กโฟลว์ (Plug Flow) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับลักษณะการถ่ายเทมวลของน้ำตามพื้นที่เมมเบรน ได้ถูกนำเสนอมาแล้วในสมการที่ 22 หัวข้อ 1.7.1 รูปภาพ 30 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ต้องการ ณ ความดันและความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นร้อยละของรีเทนเทต ( $WO$ ). ซึ่งค่าเฉลี่ยของพลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท และสัมประสิทธิ์การแยกนั้น ได้จากข้อมูลการทดลอง ในขณะที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของเอทานอลในด้านของสารป้อน กำหนดไว้ที่ 95 และค่าเฉลี่ยลอกกาลิทึมค่าการแยก (logarithmic mean) คือ 1000 ซึ่งในกราฟนี้ได้แสดงถึงอิทธิพลของความดันไอในด้านของสารป้อนที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อพื้นที่ผิวที่ต้องการในการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอลว่าเป็นเท่าใด ซึ่งกล่าวโดยรวมแล้วความดันไอของสารป้อนที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ ที่ความดันไอของสารป้อน 1.0 บาร์ พื้นที่เมมเบรนที่ต้องการนั้นจะเพิ่มขึ้น เกือบจะเป็นเส้นตรง กับการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนโมลเอทานอล นั้นเพิ่มเป็น 98.5 ในขณะที่หากต้องการความเข้มข้นของเอทานอลใน retentate ที่สูงกว่านี้ พื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ต้องการจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีลักษณะการเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ความดันไอของสารป้อนนั้น จะมีอิทธิพลสำคัญในการกำหนดพื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้ว พื้นที่เมมเบรนที่ต้องการนั้นจะลดลงเมื่อ แรงผลักดัน (driving force) เพิ่มขึ้น โดยพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ต้องการในการผลิตเอทานอล 99.8% นั้นคำนวณได้ 0.31 ตารางเมตร และเมื่อทำการเพิ่มความดันไอของสารป้อนที่เข้าสู่ระบบขึ้นเป็น 2.0 บาร์ จะส่งผลให้พื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ต้องการ ลดลงร้อยละ 52 สำหรับการประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำออกที่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ต้องการ จะลดลงเพียงร้อยละ 30 เท่านั้น เมื่อความดันไอของสารป้อนเพิ่มขึ้นจาก 3.0 เป็น 4.0 บาร์ ด้วยเหตุนี้ จึงมีเหตุผลที่จะสรุปได้ว่าความดันไอของสารป้อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นคือ 3.0 บาร์ และเป็นที่น่าสังเกตว่าประสิทธิภาพในการแยกน้ำที่ต่ำลงของระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้น จะเกิดขึ้นที่ความดันไอย่อยของน้ำมีค่าต่ำ (ความเข้มข้นของน้ำต่ำ) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ต้องการมีมากกว่าร้อยละ 99.0

## บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง

กระบวนการผลิตไบโอเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น เป็นกระบวนการที่ต้องใช้ต้นทุนสูงและมีข้อจำกัดหลายประการ ทั้งทางด้านการหมักซึ่งเกิดการยับยั้งเชื้อยีสต์จากเอทานอล ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหายใจโดยไม่ใช้อากาศ อีกทั้งความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักเริ่มต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการกลั่นมีไม่เกินร้อยละ 12 ซึ่งถือว่ามีความเจือจาง ต้องใช้พลังงานในการกลั่นสูง อีกทั้งของผสมเอทานอล/น้ำ เกิดเป็นของผสมอะซีโอโทรปที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่สามารถกลั่นเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้สูงขึ้นกว่านี้ จำเป็นที่จะต้องทำการกำจัดน้ำในขั้นสุดท้ายให้เหลือไม่เกินร้อยละ 0.5 เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเอทานอล ในงานวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้ระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสูญญากาศ เพื่อจุดประสงค์หลักในการแยกเอทานอลความบริสุทธิ์สูง (ความเข้มข้นร้อยละ 94) ออกจากระบบในระหว่างที่เชื้อยีสต์กำลังการหมักเอทานอล ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากสามารถเพิ่มผลผลิตเอทานอลได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อกระบวนการหมักเสร็จสิ้นลงแล้ว เชื้อยีสต์มากกว่าร้อยละ 90 ยังคงมีชีวิตอยู่ ทำให้สามารถทำการเติมน้ำตาลเพื่อหมักซ้ำได้อีก 8 ครั้ง โดยระบบที่ได้พัฒนาขึ้นมา มีข้อได้เปรียบหลายประการ คือ 1. สามารถใช้ยีสต์เริ่มต้นที่ความเข้มข้นสูงทำให้ได้ค่าผลผลิตที่สูง ทำให้สามารถลดขนาดของถังหมักลงได้ 2. ลดความเป็นพิษของเอทานอลที่มีต่อเชื้อยีสต์ลง ทำให้สามารถหมักซ้ำได้หลายครั้ง เป็นการลดต้นทุนการผลิต และเป็นการลดปัญหาเรื่องการต้องใช้น้ำเป็นปริมาณที่มากในกระบวนการหมักแต่ละครั้ง และ 3. สามารถลดขั้นตอนของการทำงานลง โดยเฉพาะไม่จำเป็นต้องใช้หอกลั่นลำดับส่วนแบบทั่ว ๆ ไป เช่น bubble cap column ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนด้านการเครื่องจักรลงได้เป็นอย่างมาก ซึ่งระบบที่ได้พัฒนาขึ้นดังกล่าวนี้ สามารถที่จะขยายขนาดกำลังการผลิตให้เป็นขนาดโรงงานต้นแบบได้

สำหรับเทคนิคการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการผลิตเยื่อแผ่นเชิงประกอบเซรามิกแบบแผ่นเรียบ โดยใช้ดินขาวหรือ kaolin มาใช้เป็นชั้นรองรับและทำการเคลือบด้วยซีโอไลต์เพื่อทำเป็นชั้นคัดเลือก โดยได้ทำการศึกษาถึงเวลาที่ใช้ในการเคลือบที่มีผลต่อความหนาของผลึก จากนั้นได้ทำการศึกษาพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พร้อมทั้งทดสอบประสิทธิภาพการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอลด้วยเทคนิคการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น โดยทำการเปรียบเทียบกับเยื่อแผ่นเซรามิกเชิงประกอบทางการค้า ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์โดยรวมและสัมประสิทธิ์การแยกของเยื่อแผ่นเซรามิกเชิงประกอบที่ได้พัฒนาขึ้นภายใน

ห้องปฏิบัติการ มีค่าฟลักซ์โดยรวมที่ต่ำกว่าเยื่อแผ่นเซรามิกที่ได้จากทางการค้าค่อนข้างมาก แต่ค่าสัมประสิทธิ์การแยกไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าฟลักซ์โดยรวมของเยื่อแผ่นเซรามิกเชิงประกอบในห้องปฏิบัติการต่ำมากนั้น พบว่าขนาดของรูพรุนที่อยู่บนชั้นรองรับนั้นมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้สารละลายของซีโอไลท์แทรกซึมเข้าไปได้ลึก เกิดชั้นผลึกที่หนา ซึ่งส่งผลกระทบต่อเวลาที่โมเลกุลของน้ำใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านชั้นดังกล่าว ส่วนชั้นผลึกของเยื่อแผ่นเซรามิกที่ได้จากทางการค้านั้น พบว่ามีความบางมาก ซึ่งส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเททสูงกว่ามาก นอกจากนี้แล้ว ผู้วิจัยยังได้ทำการพัฒนาระบบให้เป็นระดับโรงงานต้นแบบ โดยทำโมดูลให้มีขนาดพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นมากกว่า 3,500 ตารางเซนติเมตร โดยใช้ท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบทางการค้าชนิดโซเดียมเอ (NaA) และได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นดังกล่าวในการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอล ณ สภาวะต่าง ๆ เช่น ความดันไอของสารป้อน อุณหภูมิของไอ อัตราการไหลด้าน retentate และความเข้มข้นของน้ำในไอของสารป้อน เป็นต้น พบว่าสามารถผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ได้สูงถึงร้อยละ 99.3 โดยน้ำหนัก เมื่ออุณหภูมิไอของสารป้อน 145 องศาเซลเซียส อัตราการไหลด้าน retentate 0.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความดันด้านสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ และความดันไอของด้านสารป้อน 1.6 บาร์ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแยกนั้น จะสูงกว่า 1000 โดยมีความเข้มข้นของน้ำในด้านของเพอร์มิเททสูงจากร้อยละ 91 นอกจากนี้เยื่อแผ่นเชิงประกอบชนิดเซรามิก จะมีคุณสมบัติที่ดีมากทั้งด้านทางเคมีและทางกายภาพ โดยสามารถทนอุณหภูมิและความดันได้สูง ซึ่งถือได้ว่าเป็นเยื่อแผ่นที่มีประสิทธิภาพที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเยื่อแผ่นที่ผลิตขึ้นจากพอลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากเอทานอล จะต่ำลงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนมีมากขึ้น (ความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนมีน้อยลง) ซึ่งจากสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชี้ให้เห็นว่าหากต้องการความเข้มข้นของเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง ๆ จำเป็นที่จะต้องเพิ่มพื้นที่ของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อต้องการเอทานอลความบริสุทธิ์สูงจากร้อยละ 95 เป็นร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก พบว่าจำเป็นต้องใช้พื้นที่ของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำเพิ่มสูงขึ้นเกือบหกเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการทำความบริสุทธิ์ของเอทานอลจากร้อยละ 95 เป็นร้อยละ 99.0 โดยน้ำหนัก

## บรรณานุกรม

- Chen, C., Tang, X., Xiao, Z., Zhou, Y., Jiang, Y., Fu, S., 2012. Ethanol fermentation kinetics in a continuous and closed-circulating system with a pervaporation membrane bioreactor, *Bioresource Technol*, 114, 707-710.
- Chovau, S., Gaykawad, G., Straathof, A.J.J., Van der Bruggen, B., 2011. Influence of fermentation by-products on the purification of ethanol from water using pervaporation, *Bioresource Technol*. 102, 1669-1674.
- Cordana, C.A., Sánchez, Ò, J., 2007. Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technol*. 98, 2415-2457.
- Gryta, M., Morawski, A.W., Tomaszewska, M., 2000. Ethanol production in membrane distillation bioreactor. *Catal. Today*. 56, 159-165.
- Lewandowicz, G., Bialas, W., Marczewski, B., Szymanowska, D., 2011. Application of membrane distillation for ethanol recovery during fuel ethanol production. *J. Membr. Sci.* 375, 212-219.
- Lin, S.K.C., Du, C., Koutinas, A., Wang, R., Webb, C., 2008. Substrate and product inhibition kinetics in succinic acid production by *Actinobacillus succinogenes*, *Biochem. Eng. J.* 41, 128-135.
- Lin, J.Q., Lee, S.M., Koo, Y.M., 2004. Modeling and simulation of lactic acid fermentation with inhibition effects of lactic acid and glucose, *Biotechnol. Bioprocess Eng.* 9, 52-58.
- Lye, G.J., Woodley, J.M., 1999. Application of *in situ* product removal techniques to biocatalytic processes, *Trend Biotechnol.* 17, 395-402.

Pattersen, T., Lien, K.M., 1995. Design of hybrid distillation and vapor permeation processes, *J. Membr. Sci.* 99, 21-30

Nguyen, V.D., Auresenia, J., Kosuge, H., Tan, R.R., Brondial, Y., 2011. Vacuum fermentation integrated with separation process for ethanol production. *Biochem. Eng. J.* 55, 208-214.

O'Brien, D.J., Senske, G., Kurantz, M.J., Craig Jr., J.C., 2004. Ethanol recovery from corn fiber hydrolysate fermentations by pervaporation. *Bioresource Technol.* 92, 15-19.

Pimkaew, S., Boontawan, A., 2011. Process optimization for motor fuel grade ethanol production using hybrid vapor permeation and pressure swing adsorption technique. *Eur. J. Sci. Res.* 64, 644-657.

Sato, K., Sugimoto, K., Nakane, T., 2008. Preparation of higher flux NaA zeolite membrane on asymmetric porous support and permeation behavior at higher temperatures up to 145 °C. *J. Membr. Sci.* 307, 181-195

Taylor, F., Marquez, M.A., Johnston, D.B., Goldberg, N.M., Hicks, K.B., 2010. Continuous high-solids corn liquefaction and fermentation with stripping of ethanol. *Bioresource Technol.* 101, 4403-4408.

Thongsukmak, A., Sirkar, K.K., 2009. Extractive pervaporation to separate ethanol from its dilute aqueous solutions characteristic of ethanol-producing fermentation processes. *J. Membr. Sci.* 329, 119-129



## ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ : นาย อภิชาติ บุญทาวน
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ
3. ที่อยู่ : สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี  
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000  
โทรศัพท์: (044)-224578  
โทรสาร: (044)-224154  
อีเมลล์ : [apichat@sut.ac.th](mailto:apichat@sut.ac.th)
4. ประวัติการศึกษา

ปี	ระดับ	สาขา	สถานศึกษา	ประเทศ
2548	ป. เอก	วิศวกรรมเคมี	Imperial college London	อังกฤษ
2543	ป. โท	วิศวกรรมชีวเคมี	The University of Birmingham	อังกฤษ
2537	ป. ตรี	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร (เกียรตินิยม)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ไทย
2534	มัธยมศึกษาตอนปลาย	-	โรงเรียนปริญธรอชล์วิทยาลัย เชียงใหม่	ไทย

## 5. ประสบการณ์การทำงาน

- งานวิจัยหลังปริญญาเอก ASEA-UNINET Post-doc, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเวียนนา, ประเทศออสเตรีย (พ.ศ. 2550- เม.ย. 2551)
- อาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ม.ศ. 2548 - ปัจจุบัน)

## 6. สถานะภาพงานวิจัย

### หัวหน้าโครงการ

- การศึกษาการพัฒนาการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องจากกากน้ำตาลอ้อยโดยใช้เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในถังหมักแบบใช้เยื่อแผ่น  
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 100,000. บาท  
สถานะภาพ เสร็จสิ้นโครงการ (ก.ย. 2548- ส.ค. 2549)
- การเก็บเกี่ยวกรด L-แล็คติกจากน้ำหมักด้วยระบบอิเล็กโตรดิออนไลน์เซชัน  
แหล่งเงินทุน: มทส สัญญาเลขที่ SUT -3-304-51-12-09  
240,000. บาท (ธ.ค. 2550- พ.ย. 2551) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การสังเคราะห์เมทานอลแบบต่อเนื่องด้วยเชื้อ *Methylosinus trichosporium* OB3b ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบหมุน โดยใช้เทคนิคเฟอร์แวกเพอร์เรชัน  
แหล่งเงินทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
305,000.- บาท (ต.ค. 2549- พ.ย. 2551) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดไขมันจากสบู่ดำ ในสภาวะไร้ออกซิเจน  
แหล่งเงินทุน: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ  
200,000. บาท (ก.ย. 2549- ส.ค. 2550) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การพัฒนาท่อใยกลวงเชิงประกอบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตอะซีโตน-บิวทานอล-เอทานอลจากมันสำปะหลัง

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

351,000. บาท (ช.ค. 2552- พ.ย. 2553) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

- การประยุกต์ใช้สเปกโตรสโกปีของรังสีแกมมาในการควบคุมการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์โดยใช้ระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

301,000. บาท (ช.ค. 2552- พ.ย. 2553) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

- การประยุกต์ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์อินทรีย์เซชันในการแยกโปรตีนเอ็นเทอโรโคเนสจากน้ำหมัก

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

271,000. บาท (ช.ค. 2552- พ.ย. 2553) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

- Process optimization for motor fuel grade ethanol production using hybrid vapor permeation and pressure swing adsorption technique

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

200,000. บาท (30 พ.ย. 2551- 29 พ.ย. 2552) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

- การวิเคราะห์สมดุลมวลและพลังงานของการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์จากน้ำหมักในระดับโรงงาน ต้นแบบด้วยเทคนิคผสมระหว่างการกลั่น การแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น และการดูดซับ

แหล่งเงินทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

2,500,000. บาท (ส.ค. 2552- ส.ค. 2555) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

- การสร้างโรงงานต้นแบบการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงจากมันสำปะหลัง โดยใช้เทคนิคผสมระหว่างการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2,143,000. บาท (มี.ค. 2553- มี.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

- การทำบริสุทธิ์กรดซัลฟอนิกจากน้ำหมักด้วยวิธีตกตะกอน เอสเทอร์รีฟิเคชันและการกลั่น  
แหล่งเงินทุน: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ  
537,200. บาท งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การทำบริสุทธิ์กรด D- และ L-แล็กติกด้วยวิธีเอสเทอร์รีฟิเคชันและการกลั่นจากน้ำหมัก  
แหล่งเงินทุน: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (B10-52)  
3,272,440. บาท (ช.ค. 2552- พ.ย. 2553) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การออกแบบถังปฏิกรณ์แบบท่อไหลสำหรับการทำบริสุทธิ์กรด D-แล็กติก  
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
683,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- การพัฒนาท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น  
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
385,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอล  
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
350,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

### ผู้ร่วมโครงการ

- การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการทำบริสุทธิ์กรดดีแล็กติกโดยอิงเทคโนโลยีการกลั่นพร้อมการทำเอสเทอร์รีฟิเคชัน (สัญญา สนช-มก-มทส เลขที่ B10-52) จากน้ำหมักของบริษัท มิตรผลวิจัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด

แหล่งเงินทุน: บริษัท มิตรผลวิชัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด

หัวหน้าโครงการ: ผศ.ดร. วีระศักดิ์ เลิศศิริโยชิน

1,187,220. บาท (1 พ.ย 2553- เม.ย 2554) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

- การพัฒนาเยื่อแผ่นเชิงประกอบจากยางธรรมชาติสำหรับการแยกเอทิลแล็กเตดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีไฟเคชันด้วยระบบเพอร์เมอรัปพอเรชั่น

แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

หัวหน้าโครงการ: อ.ดร. วิรัช ทวีปรีดา

665,000. บาท (23 ต.ค 2553- 22 ต.ค 2554) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

#### 7. งานวิจัยตีพิมพ์:

- 1 **Boontawan, A.**, Stuckey D.C. (2005), Mass Transfer of Terpenes through a Silicone Rubber Membrane in a Liquid-Liquid Contacting System, *Biotechnol Prog*, 21:1680-1687.
- 2 **Boontawan, A.**, Stuckey D.C. (2005), A Membrane Bioreactor for the Biotransformation of  $\alpha$ -Pinene Oxide to Isonovalal by Resting Cells of *Pseudomonas fluorescens* NCIMB 11671, *Appl Microbiol biotechnol*, 69:643-649.
- 3 **Boontawan, A.**, Schausberger, P., Bösch, P., and Friedl, A. (2008) Dehydration of Ethanol/Water Mixture using Pervaporation and Vapor Permeation Technique, *J Appl Membr Sci Technol*, 5:1-7
- 4 Boontawan, P., Kanchanatawee, S., and **Boontawan A.** (2011) Extractive Fermentation of L-(+)-lactic acid by *Pediococcus pentosaceus* using Electrodeionization (EDI) Technique, *Biochem Eng J*, 54: 192-199
- 5 Boontawan, P., and **Boontawan A.** (2011) Isolation and characterization of Jatropha oil-degrading *Enterococcus faecalis* and *Burkholderia cenocepacia* W-1 under anaerobic condition, *Afr J Biotechnol*, 10(63): 13841-13851

- 6 Khunnonkwao, P., Boontawan, P., Haltrich, D., Maischberger, T., and **Boontawan, A.** (2012) Purification of L-(+)-Lactic Acid from Pre-treated Fermentation Broth using Vapor Permeation-Assisted Esterification, *Process Biochem*, 47(12): 1948-1956
- 7 Pimkaew, S., and **Boontawan, A.** (2011) Process Optimization for Motor Fuel Grade Ethanol Production using Hybrid Vapor Permeation and Pressure Swing Adsorption Technique, *Euro J of Sci Res*, 64(4): 644-657

8. งานนำเสนอในงานประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ:

1. **Boontawan, A.**, Schausberger, P., Bösch, P., Brinkmann, T., and Friedl, A. Dehydration of Ethanol/Water Mixture using Pervaporation and Vapor Permeation Technique. *The 6<sup>th</sup> Regional Symposium on Membrane Science and Technology 2008*, 13<sup>rd</sup>-15<sup>th</sup> August 2008, Phuket, Thailand (นำเสนอด้วยวาจา)
2. **Boontawan, A.**, Schausberger, P., Bösch P., Brinkmann, T., and Friedl, A. Dehydration of Ethanol/Water Mixture using Vapor Permeation Technique. *2008 International Congress on Membranes and Membrane Processes*, 12<sup>nd</sup>-18<sup>th</sup> July 2008, Hawaii, United State of America. (นำเสนอแบบโปสเตอร์)
3. Bösch, P., Schausberger, P., **Boontawan, A.**, and Friedl, A. Modelling and Process Integration of Membranes for Ethanol Dehydration. *2008 International Congress on Membranes and Membrane Processes*, 12<sup>nd</sup>-18<sup>th</sup> July 2008, Hawaii, United State of America. (นำเสนอด้วยวาจา)
4. Panvichit, P., **Boontawan, A.**, and Kanchanatawee, S. Selection of Lactic Acid Bacteria for L-Lactic Acid Fermentation from Cassava Starch. *The 3<sup>rd</sup> International Conference on Renewable Resources and Biorefineries 2007*, 4<sup>th</sup>-6<sup>th</sup> June 2007, Ghent University, Belgium. (นำเสนอแบบโปสเตอร์)
5. Panvichit, P., Kanchanatawee, S. and **Boontawan, A.** Mass transfer characteristic of ethanol from diluted aqueous solution through silicone membranes in a liquid-liquid contacting system. *Membrane Science & Technology 2006*, 26<sup>th</sup>-29<sup>th</sup> April 2006, Nanyang Technological University, Singapore. (นำเสนอแบบโปสเตอร์)

6. **Boontawan, A.** and Stuckey, D.C. A Membrane Bioreactor for Biotransformation of Monoterpene. *3<sup>rd</sup> Regional Symposium on Membrane Science & Technology 2005*, 27<sup>th</sup>-28<sup>th</sup> April 2005, Institut Teknologi Bandung, Indonesia. (นำเสนอด้วยวาจา)
7. **Boontawan, A.** Molecular Diffusion in PVA Membrane for Separation Dehydration of EtOH/H<sub>2</sub>O Mixtures using Vapor Permeation Technique. *Nanotech Insight Conference 2009*, 29<sup>th</sup> March-2<sup>nd</sup> April 2009, Barcelona, Spain. (นำเสนอแบบโปสเตอร์)
8. **Boontawan, A.** and Pimkaew, S. Anhydrous ethanol production from fermentation broth using distillation, vapor permeation, and pressure swing adsorption technique. *The 8<sup>th</sup> International Conference on Membrane Science and Technology 2010*, 29<sup>th</sup> November-2<sup>nd</sup> December 2010, Institute Teknologi Bandung, Indonesia. (นำเสนอด้วยวาจา)
9. Molina, S., Lertsiriyothin, W., and **Boontawan, A.** Production and Purification of D-(-)-Lactic Acid from Concentrated Fermentation Broth using Esterification, Distillation and Hydrolysis Technique. *The 4<sup>th</sup> International Conference on Fermentation Technology for Value Added Agricultural Products (FerVAAP) Conference*, 29<sup>th</sup> -31<sup>st</sup> August 2011, Khon Kaen, Thailand. (นำเสนอด้วยวาจา)
10. Samnaknit, W., Kongkaew, A., and **Boontawan, A.**, Extractive Fermentation of Bio-Ethanol from Concentrated Sweet Sorghum Juice using Vacuum Fractionation Technique, ISSCT co-product workshop: successful utilization of co-product in the sugar industry, 19<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> March 2012, Bangkok, Thailand