

รหัสโครงการ SUT 3-304-53-12-32



รายงานการวิจัย

การพัฒนาท่อใยกลวงเซรามิคเชิงประกอบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

(Application of Near Infrared (NIR) Spectroscopy in Process Control of Bio-Ethanol Production using Vapor Permeation and adsorption Technique)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT 3-304-53-12-32



รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้สเปกโทรสโกปีของรังสีใกล้อินฟราเรดในการควบคุมการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์โดยใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ

(Application of Near Infrared (NIR) Spectroscopy in Process Control of Bio-Ethanol Production using Vapor Permeation and adsorption Technique)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทาวัน

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2555

กิตติกรรมประกาศ

การประยุกต์ใช้สเปกโตรสโกปีของรังสีใกล้อินฟราเรดในการควบคุมการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ โดยใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ ในการศึกษานี้ได้ ทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมกระบวนการทางชีวภาพ อาคารปฏิบัติการ 3 และ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปีงบประมาณ 2553



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทาวัน

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อภาษาไทย

การผลิตเอทานอลไร้น้ำเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเอทานอลสามารถแยกออกจากน้ำหมักได้ด้วยกระบวนการกลั่น แต่อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถกำจัดน้ำออกได้อย่างสมบูรณ์เนื่องมาจากการเกิดของผสมอะซีโอโทรปที่ความเข้มข้นร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบกระบวนการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลคือการใช้ต้นทุนที่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงจากน้ำหมัก ด้วยเทคนิคผสมระหว่างกลั่นแบบบังคับให้เกิดการผสมของไอ การแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ เมื่อไม่นานมานี้ หอกลั่นเอทานอลประสิทธิภาพสูงได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นที่สำเร็จในห้องปฏิบัติการ ซึ่งหอกลั่นที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีข้อได้เปรียบกว่าหอกลั่นที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมคือ การลงทุนด้านเครื่องจักรและการใช้พลังงานในการกลั่นลดลง สำหรับการกลั่นแบบบังคับให้เกิดการผสมของไอน้ำ เบื้องต้นพบว่า สามารถกลั่นเอทานอลได้ความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเร็วรอบของใบพัดที่เหมาะสมที่สุดคือ 1000 รอบต่อนาที ซึ่งของผสมอะซีโอโทรปของเอทานอลนี้จะถูกแยกน้ำออกต่อไป โดยใช้การแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น (VP) และการดูดซับแบบสลับความดัน (PSA) สำหรับระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นนั้น ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอล โดยพบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำที่ไหลผ่านผิวหน้าของเยื่อแผ่นจะขึ้นอยู่กับสถานะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ความดันไอของสารด้านป้อน อุณหภูมิของโมดูลและ อัตราการไหล จากผลการทดลองพบว่าเยื่อแผ่นเชิงประกอบชนิดพอลิไวนิลอัลกอฮอล์/พอลิเอทิลีน ไนไตรด์ PAN/PVA และเยื่อแผ่นเชิงประกอบชนิดโซเดียมเอ ซีโอไลท์ ที่เคลือบบนชั้นรองรับที่ไม่สมมาตร สามารถผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ได้สูงถึงร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการแยกน้ำออกจากเอทานอล จะทำได้ยากขึ้นเมื่อเอทานอลมีความบริสุทธิ์ที่สูงขึ้น จากสมการการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่า จำเป็นต้องใช้พื้นที่ของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอ็ก โปเนนเชียลเมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นของเอทานอลที่เพิ่มขึ้น สำหรับการทดสอบการดูดซับโดยตัวดูดซับชนิด 3 อังสตรอม ได้ศึกษาการดูดซับน้ำและเอทานอลที่ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อน ร้อยละ 95-99 โดยน้ำหนัก และความดันด้านสายป้อน 1-3 บรรยากาศ ผลการทดลองพบว่า การดูดซับของน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันและความเข้มข้นเอทานอลด้านสายป้อน จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของคอลัมน์ 145 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก และความดันทางด้านสายป้อน 3 บาร์ สามารถผลิตเอทานอลความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก

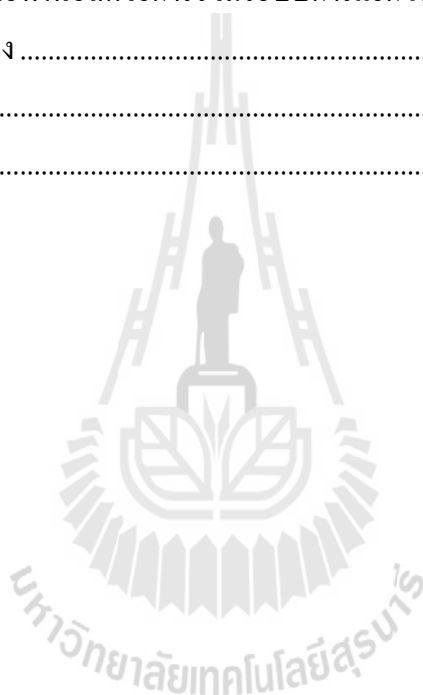
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

The production of anhydrous ethanol is increasing popularly, and ethanol can be recovered from fermentation broth by means of distillation. However, water cannot be completely removed due to the presence of the azeotrope at the concentration of 95.6 wt%, 78 °C, and atmospheric pressure. A major challenge in the design of ethanol dehydration plants is high energy cost. The objective of this work is to improve high purity ethanol production from fermentation broth using forced-mixing distillation, vapor permeation (VP), and pressure swing adsorption (PSA) techniques. Recently, a high efficiency continuous distillation system has been successfully developed in our laboratory. This new type of column has advantages over existing distillation columns in terms of lower construction cost and lower energy input. For forced-mixing distillation, the highest purity ethanol concentration of 95 wt% ethanol could be obtained at the optimum stirrer speed of about 1,000 rpm. The condensed azeotrope was subjected to subsequent dehydration by using VP and PSA techniques. For VP, the dehydration performances of hydrophilic membranes to produce anhydrous ethanol were investigated. Water flux across the selective layer depends on many operating parameters, including partial feed pressure, module temperature, and retentate flow rate. From the experimental results, a composite polyvinyl alcohol (PVA)/ poly-acrylonitrile (PAN) membrane, and 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. For adsorption system, 3-Å type molecular sieve was investigated. The masses of water and ethanol adsorbed were measured for various ethanol concentrations (95-99 wt %), and operating feed partial pressures (1-3 bars). From the experimental results, the adsorbed masses of water increased with increasing feed partial pressure and feed ethanol concentration. At the operating conditions of column temperature at 145 °C, feed ethanol concentration of 99 wt %, and feed pressure at 3 bars, the system obtained the highest purity ethanol concentration of 99.99 wt %.

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ.....	3
สารบัญภาพ	8
บทที่ 1 บทนำ	15
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหางานวิจัย	15
1.2 เอทานอล.....	16
1.3 การกลั่นเอทานอลจากน้ำหมัก	21
1.3.1 หลักการทั่วไป.....	21
1.3.2 การกลายเป็นไอบางส่วนและการควบแน่นบางส่วน	23
1.4 การออกแบบชิ้นส่วนหอกลั่น	26
1.4.1 ภาระวนการแยกน้ำออกจากเอทานอล	29
1.4.1.1 การกลั่นอะซีโอโทรป.....	30
1.4.1.2 การแยกโดยใช้เยื่อแผ่น	31
1.4.1.3 การดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure swing adsorption)	39
1.5 สเปกโตรสโกปีของรังสีใกล้อินฟราเรด (near infrared spectroscopy (NIR)).....	42
1.6 จุดประสงค์ของโครงการวิจัย.....	45
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	46
2.1 การออกแบบชุดการทดลอง.....	46
2.2 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง.....	47
2.2.1 การกลั่น (การกลั่นโดยอาศัยหลักการผสมแบบบังคับ).....	47
2.2.2 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น.....	48
2.2.3 การดูดซับ (Pressure Swing Adsorption)	49
2.4 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น.....	50
2.5 การดูดซับแบบสลับความดัน.....	51
2.6 ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นร่วมกับการดูดซับ.....	53
2.7 NIR spectroscopy	54
2.8 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
2.8.1 การหาปริมาณน้ำที่เจือปนในตัวอย่างโดยการ ใช้ Karl Fischer titration.....	55
2.8.2 การหาประสิทธิภาพของเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น	57
บทที่ 3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์	59
3.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของ NIR และการกลั่นเอทานอลจากน้ำหมัก	59
3.2 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น.....	76

3.2.1 เยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN ชนิดชอบน้ำ	76
3.2.2 เยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอ	83
3.2.3 สมการการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงผลของพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องใช้ในการ แยกน้ำ ต่อความเข้มข้นของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ต้องการ	91
3.3 การดูดซับ	92
3.3.1 ผลของความดันด้านสารป้อนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ	93
3.3.2 ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ	94
3.4 การแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยการรวมระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ.....	95
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	97
บรรณานุกรม	101
ประวัติผู้วิจัย	104



สารบัญภาพ

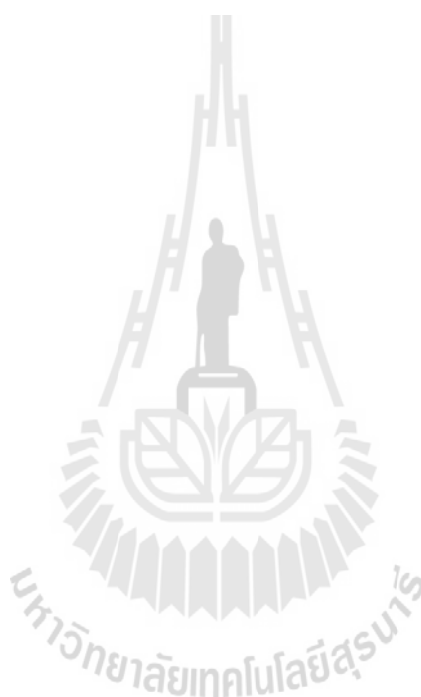
รูปภาพ 1 ระบบการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลัง (Nguyen <i>et al.</i> , 2007).....	18
รูปภาพ 2 วิธี Emben-Meyer (Bailey and Ollis, 1986)	18
รูปภาพ 3 ระบบการกลั่นแบบต่อเนื่อง.....	22
รูปภาพ 4 ภายในของหอกกลั่นในแบบ cap tray	22
รูปภาพ 5 จุดเดือดของสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (Roehr, 2001).....	24
รูปภาพ 6 แผนภาพสมดุลไอ-ของเหลว (VLE) ของระบบเอทานอล/น้ำที่ความดันคงที่ (Warren L. McCabe <i>et al.</i> , 2005).....	25
รูปภาพ 7 ภาพวาดการออกแบบภายในของหอกกลั่นแบบการปั่นผสมไอ	28
รูปภาพ 8 การทดลองระบบการกลั่นเอทานอลบริสุทธิ์แบบต่อเนื่องจากน้ำหมัก (Boontawan A., 2553): 1, มอเตอร์; 2, เครื่องควบแน่น; 3, ทางเข้าหอกกลั่น; 4, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน; 5, เครื่องควบคุมความเร็วรอบของการหมุน; 6, บั๊มดันสายป้อน; 7, สารป้อน; 8, ผลิตภัณฑ์เอทานอล; 9, หม้อต้ม; 10, เครื่องให้ความร้อนสำหรับเอทานอล	29
รูปภาพ 9 แผนผังรูปภาพของระบบ pervaporation (Huang, 1991)	32
รูปภาพ 10 ภาพอย่างง่ายของโมดูลการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นซึ่งอัตราการซึมผ่านของเยื่อแผ่น เป็นแบบ Cross – flow (Pettersen, 1995).....	34
รูปภาพ 11 กระบวนการ PSA สำหรับเอทานอลรอบครึ่ง (345 s) (ขั้นตอน I.–III.); ขั้นตอน IV เป็นการสลับไปมาระหว่างคอลัมน์การดูดซับ (Simo <i>et al.</i> , 2008)	42
รูปภาพ 12 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน.....	43
รูปภาพ 13 ลักษณะของเครื่อง near infrared spectroscopy (NIR)	44
รูปภาพ 14 การจัดการทดลองระบบการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคผสมระหว่างการกลั่นการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ: 1 หอกกลั่น; 2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน; 3 โมดูลการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น; 4 คอลัมน์การดูดซับ; 5 บั๊มป้อนน้ำหมัก; 6 เครื่องควบแน่น; 7 อ่างให้ความร้อน; 8 NIR; 9 เครื่องทำความเย็น	46
รูปภาพ 15 แผนภาพแสดงระบบการกลั่นแบบการปั่นผสมไอ	47
รูปภาพ 16 รูป SEM ของเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN	48
รูปภาพ 17 ภาพถ่ายเยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอแบบหลอดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ..	49
รูปภาพ 18 เยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอแบบหลอด.....	49
รูปภาพ 19 ตัวดูดความชื้น	49
รูปภาพ 20 คอลัมน์การดูดซับ.....	50
รูปภาพ 21 โมดูลเยื่อแผ่นสำหรับใช้ในเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น.....	50

รูปภาพ 22 โมดูลเยื่อแผ่นซีโอไลท์ชนิดโซเดียมเอ (NaA zeolite tubular membrane) สำหรับเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น	51
รูปภาพ 23 การจัดการทดลองระบบการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคการดูดซับ: 1, ป้อนน้ำเย็น; 2, เครื่องให้ความร้อน; 3, ถังป้อน; 4, สาย by pass; 5, คอลัมน์การดูดซับ; 6, วาล์วควบคุมอัตราไหลของผลิตภัณฑ์; 7, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน; 8, อ่างให้ความร้อน; 9, NIR; 10, วาล์วควบคุมการ regenerate; 11, เครื่องควบแน่น; 12, ขวดสำหรับใส่น้ำที่คายซับ; 13, ป้อนสุญญากาศ	52
รูปภาพ 24 การจัดการทดลองระบบการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคผสมระหว่างการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ	54
รูปภาพ 25 วิธีการวัดความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ได้จากกระบวนการแยกน้ำด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของรังสีใกล้อินฟราเรดและลักษณะของหัว probe (ล่าง)	55
รูปภาพ 26 อุปกรณ์สำหรับ Karl Fisher titration (Titro Line plus, Schott, Germany) แบบอัตโนมัติ	56
รูปภาพ 27 สเปกตรัมการดูดซับรังสีใกล้อินฟราเรด NIR ของสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	59
รูปภาพ 28 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR และความเข้มข้นของเอทานอลต่าง ๆ ซึ่งเส้น 45 องศาแสดงถึงค่าในอุดมคติเมื่อมีความแม่นยำ 100 เปอร์เซ็นต์	60
รูปภาพ 29 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของใบพัดที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้ ที่อัตราการป้อนที่แตกต่างกัน โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักที่ป้อนคือเอทานอลร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก.....	61
รูปภาพ 30 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของใบพัดที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักที่ป้อนที่แตกต่างกัน โดยอัตราการป้อนคือ 3.2 มิลลิลิตรต่อนาที	73
รูปภาพ 31 ผลการทดลองของสมดุลไอ-ของเหลวของผสมเอทานอล/น้ำ เมื่อเส้นตรง (-) คือเส้น 45° สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม (□) คือข้อมูลการทดลองของการกลั่นแบบธรรมดาซึ่ง คำนวณจากสมการที่ (1) และสัญลักษณ์วงกลม (○) คือข้อมูลที่ได้จากการทดลองของหอกลั่นในห้องปฏิบัติการ	74
รูปภาพ 32 ความเข้มข้นของเอทานอลด้าน retentate จากการแยกน้ำออกจากเอทานอลที่ความดันด้านสายป้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหล 1.85 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิโมดูล 120 องศาเซลเซียส	78
รูปภาพ 33 ผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ (J) และค่าสัมประสิทธิ์การแยก (α) ที่ความดันสุญญากาศ 6 มิลลิบาร์ ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 95 โดย	

เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิของโมดูล 145 องศาเซลเซียส	88
รูปภาพ 44 ผลของอัตราการไหลด้าน retentates ที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแยกที่ความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิของโมดูล 145 องศาเซลเซียส	89
รูปภาพ 45 ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวมทั้งความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์	90
รูปภาพ 46 การจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงผลของพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องใช้ในการแยกน้ำ ต่อ.. ความเข้มข้นของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ต้องการ ในกระบวนการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น	91
รูปภาพ 47 ผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เจือปนกับผลิตภัณฑ์เอทานอลหลังการดูดซับกับปริมาตรของผลิตภัณฑ์เอทานอลหลังการดูดซับที่ความบริสุทธิ์ของเอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิของคอลัมน์ 145 องศาเซลเซียส	93
รูปภาพ 48 ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เจือปนกับผลิตภัณฑ์เอทานอลหลังการดูดซับกับปริมาตรของผลิตภัณฑ์เอทานอลหลังการดูดซับ ที่ความความดันแก๊สด้านสายป้อน 3 บาร์และอุณหภูมิของคอลัมน์ 145 องศาเซลเซียส	94
รูปภาพ 49 ผลของอัตราการไหลที่มีต่อปริมาณน้ำที่เหลือปนอยู่กับผลิตภัณฑ์เอทานอลตลอดกระบวนการการกำจัดน้ำด้วยระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับร่วมกันที่ความดันด้านสายป้อน 3 บาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของโมดูลและคอลัมน์ 145 องศาเซลเซียส	96

สารบัญตาราง

ตาราง 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอลบริสุทธิ์	19
ตาราง 2 มาตรฐานสหภาพยุโรปของเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง (ASTM International 2004)	20
ตาราง 3 ความเข้มข้นของเอทานอลในส่วนกลั่น (y) เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของเอทานอล ในสารละลาย (x) และค่า relative volatility (α).....	75

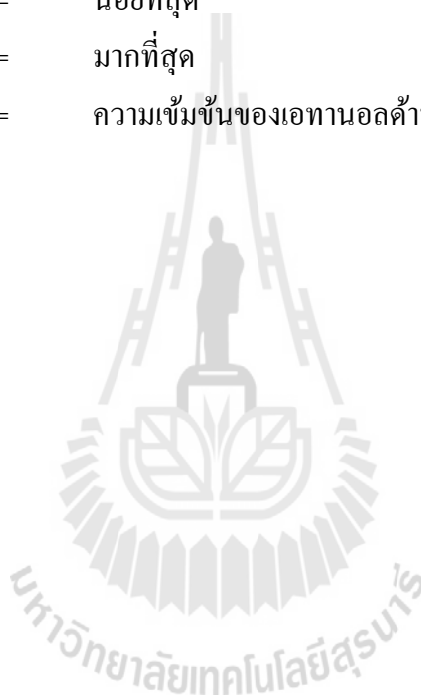


คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
K	=	องศาเคลวิน
%	=	เปอร์เซ็นต์
min	=	นาที
mL	=	มิลลิลิตร
cm	=	เซนติเมตร
nm	=	นาโนเมตร
μm	=	ไมโครเมตร
\AA	=	อังสตรอม
g	=	กรัม
s	=	วินาที
h	=	ชั่วโมง
g/mL	=	กรัมต่อมิลลิลิตร
kJ/g	=	กิโลจูลต่อกรัม
% wt	=	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
mg/L	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/kg	=	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
<i>et.al.</i> ,	=	และคนอื่นๆ
PVA	=	โพลีไวนิลแอลกอฮอล์
PAN	=	โพลีเอคริโลไนไตรล์
P	=	ความดัน
T	=	อุณหภูมิ
N_2	=	ไนโตรเจนเหลว
<i>J</i>	=	เพอมีเอทฟลักซ์
α	=	สัมประสิทธิ์การแยก
kPa	=	กิโลปาสคาล
psia	=	ปอนด์ต่อตารางนิ้วสัมบูรณ์
rpm	=	รอบต่อนาที

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

SUT	=	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
VLE	=	สมดุลไอ-ของเหลว
ppm	=	หนึ่งในล้าน Vapor
VP	=	การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น
PSA	=	การดูดซับความดันสลับ
Min.	=	น้อยที่สุด
Max.	=	มากที่สุด
$[\text{Feed ethanol}]_{\text{LM}}$	=	ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนเฉลี่ย



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาทางวิจัย

จากสภาวะวิกฤตการณ์ด้านน้ำมันเมื่อหลายปีที่ผ่านมา ซึ่งส่งผลกระทบต่อประเทศต่างๆ ในโลก อีกทั้งได้มีปริมาณลดน้อยลง เนื่องจากมีการอุปโภคใช้น้ำมันดิบเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและศึกษาพลังงานทดแทนน้ำมันนี้ โดยนำวัตถุดิบเหลือใช้ที่มีราคาถูก โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตรนำมาเป็นพลังงาน “ไบโอดีเซล” ซึ่งจากการคิดค้นมาแล้ว นั้นพบว่าไบโอดีเซลสามารถนำมาใช้ได้จริงในเครื่องยนต์ความเร็วรอบต่ำ ดังเช่น รถไถนาและรถแทรกเตอร์ เป็นต้น ซึ่งนับว่าเป็นผลดีต่อการลดต้นทุนการผลิตและส่งเสริมเกษตรกรในการทำการเกษตรต่อไป และพลังงานทดแทนอีกอย่างหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก นั่นคือ “แก๊สโซฮอลล์” ทั้งภาครัฐและเอกชนถือเป็นวาระแห่งชาติที่สำคัญมาก โดยมีความต้องการในปริมาณสูง เพื่อลดภาระค่าใช้จ่ายในการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ทั้งยังลดต้นทุนอีกทั้งเป็นการลดการเสียดุลทางเศรษฐกิจของชาติอีกด้วย ในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งถือเป็นจังหวัดศูนย์กลางของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในประเทศไทย ถือเป็นผู้ผลิตและส่งออกน้ำมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของประเทศไทย อีกทั้งมีสภาวะเหมาะสมและมีพื้นที่ในการปลูกมันสำปะหลังมากที่สุดของประเทศ และได้มีรายงานวิชาการ ได้มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีของมันสำปะหลัง ถือเป็นหลักฐานยืนยันว่า มันสำปะหลังนั้นสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ โดยเป็นส่วนประกอบสำคัญของพลังงานทดแทนน้ำมัน ทั้งไบโอดีเซลและแก๊สโซฮอลล์ สำหรับในการผลิตเอทานอลโดยปกติแล้ว หลังจากผ่านกระบวนการหมักโดยเชื้อจุลินทรีย์จะได้เอทานอลปริมาณ ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และจะต้องทำการกลั่นเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่สูงขึ้นเป็น 95 เปอร์เซ็นต์ และจะไม่สามารถทำให้ความเข้มข้นสูงขึ้นไปได้อีก นอกเหนือจากจะต้องมีการใช้เทคนิคและต้นทุนที่สูงขึ้นอย่างมาก และยังเป็นต้นทุนปริมาณสูงเทียบกับทั้งระบบกระบวนการผลิต จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยในการศึกษากระบวนการทำให้เอทานอล บริสุทธิ์เพิ่มขึ้น โดยที่มีการใช้ระบบเยื่อแผ่นในการเลือกเอทานอลผ่าน เทคนิคเยื่อแผ่น ตัวอย่างเช่น เทคนิคเพอร์เมอเรชันและเทคนิคเวเปอร์เพอร์มิเอชัน ที่เป็นกระบวนการใช้พลังงานน้อยเพื่อแยกน้ำอีก 4 เปอร์เซ็นต์ออกจากสารผสมน้ำกับเอทานอลและทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น โดยที่งานวิจัยนี้จะมีการศึกษาวิจัยการทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ด้วยเทคนิคเวเปอร์เพอร์มิเอชันหรือการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น โดยที่มีการศึกษาจากกระบวนการหมักและการกลั่นแบบธรรมดา จากนั้นเข้าสู่กระบวนการแยกเอทานอล โดยที่กระบวนการจะมีสารป้อนที่อยู่ในรูปของไอผสม จนสิ้นสุดกระบวนการ จะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่พบปัญหาในการเก็บตัวอย่างซึ่งเกิดความล่าช้าและเสียเวลา ทั้งนี้จะต้องมีการวิเคราะห์ทางคุณภาพของเอทานอลที่รวดเร็วและแม่นยำ การประยุกต์ใช้สเปกโตรสโคปีของรังสี

ใกล้คลื่นใต้แดง (Near-infrared (NIR) spectroscopy) ในการควบคุมการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์มีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดความรวดเร็ว แม่นยำและเป็นที่ยอมรับได้โดยหลักสากล และจากการประยุกต์ใช้เทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่างเอทานอลดังกล่าว นั้น ได้มีการศึกษาเบื้องต้นแล้วว่า ได้รับความสำเร็จและผลเป็นที่น่าพอใจสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของเอทานอลในเครื่องต้มแอลกอฮอล์ จากการวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยจะมีความรู้กระบวนการแยกเอทานอลที่มีการใช้เทคนิคการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น ร่วมกับการวิเคราะห์ผลด้วย infrared (NIR) spectroscopy เพื่อให้ได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์และนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน เกิดผลประโยชน์อย่างมากต่อประเทศต่อไป

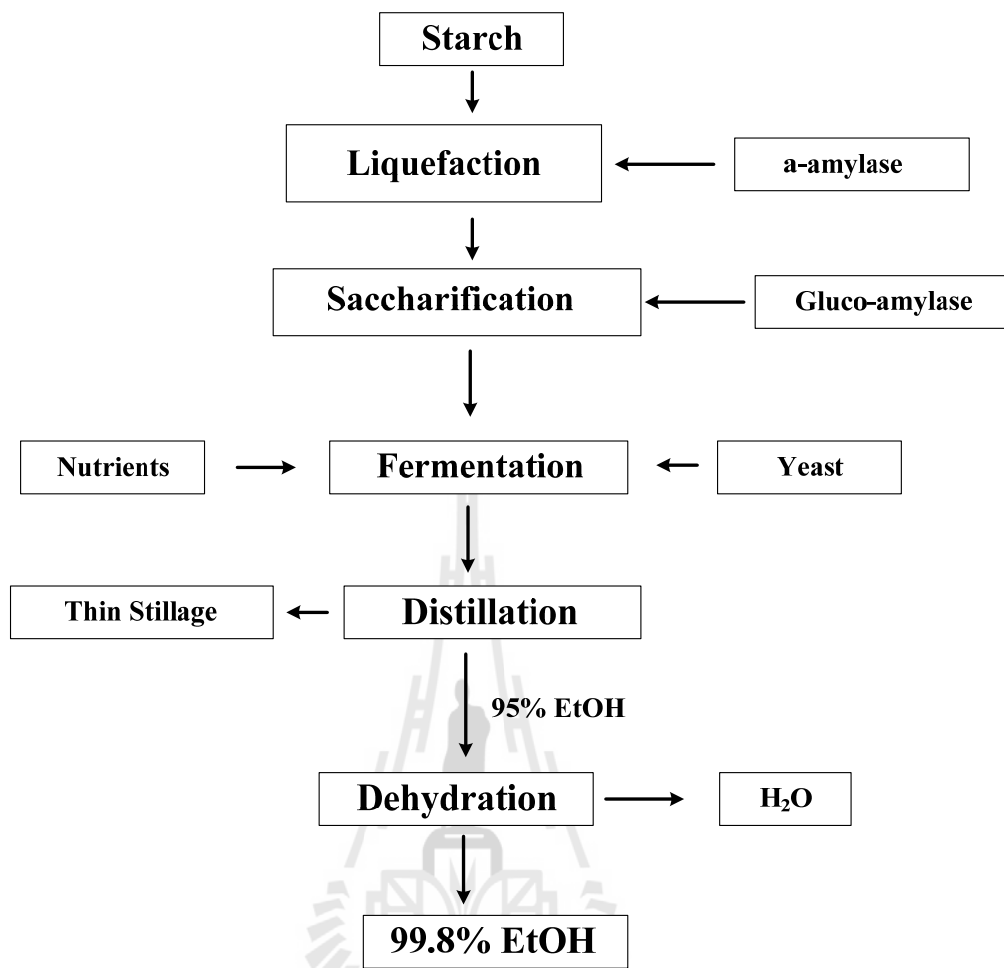
1.2 เอทานอล

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

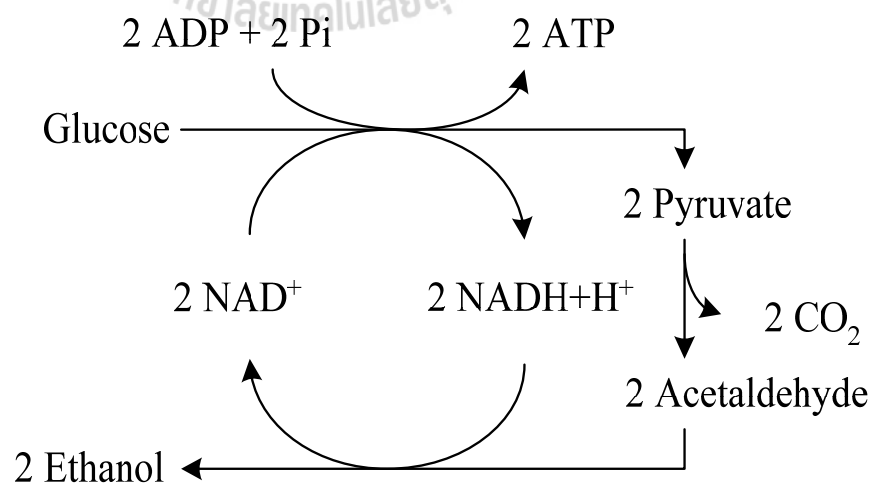
สำหรับบทความที่กล่าวถึงต่อไปนี้เป็นการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลัง (CFE) ขอบเขตของระบบการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลังถูกจัดทำขึ้นเพื่อให้เห็นความสำคัญการแลกเปลี่ยนของระบบกับสภาพแวดล้อมในแง่ของพลังงานที่ใช้และพลังงานที่ได้รับจากระบบแสดงดังในรูปภาพ 1 สำหรับระบบการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลังสามารถแบ่งงานออกเป็นส่วนงานหลักที่เกี่ยวข้องคือ (1) การเตรียมการเพาะปลูก/การดำเนินการ (2) การเปลี่ยนแปลงให้เกิดผลิตภัณฑ์เอทานอลและ (3) การขนส่ง

ในการเริ่มกระบวนการหมักจะทำการย่อยหัวมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ α -อะไมเลส่วมกับการเติมน้ำ ที่มีส่วนช่วยให้กระบวนการย่อยมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อให้โมเลกุลต่างๆในหัวมันสำปะหลังถูกย่อยเป็นน้ำตาลสายสั้นๆก่อนบางส่วน เพื่อที่จะให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถใช้วัตถุดิบได้ง่ายขึ้นและยังประหยัดเวลาในระบบได้อีกด้วย เริ่มกระบวนการย่อยโดยทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างให้เป็น 6.0 ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และให้ความร้อนแก่สารละลายผสมที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ร่วมกับการเติมเอนไซม์ลงไป เอนไซม์นี้จะทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพในการย่อย โดยที่มีการเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (liquefaction process) จากนั้นทำการทำสารละลายผสมเย็นลงอยู่ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และปรับค่าความเป็นกรดต่างให้ได้ 4.0 อีกครั้งด้วยสารละลายเข้มข้น ในกระบวนการย่อยดังกล่าวยังไม่ถือว่าเสร็จสมบูรณ์เนื่องจากยังมีโมเลกุลใหญ่บางส่วนไม่สามารถย่อยได้ จะต้องมีการย่อยด้วยเอนไซม์กลูโคสอะไมเลสอีกครั้ง (saccharification) และทำการกรองเอาส่วนที่เป็นของเหลือหรือส่วนที่ไม่ต้องการออกไป จึงถือว่าเสร็จสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น และสำหรับแหล่งไนโตรเจนซึ่งเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อเชื้อยีสต์นั้นจะมีการใช้เพปโตนและสารสกัดยีสต์เพื่อส่งเสริมการเจริญและการสร้างผลิตภัณฑ์ของเชื้อยีสต์ โดยที่เชื้อยีสต์นั้นจะมีการเลี้ยงในอาหารที่เหมาะสมให้สามารถปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อมได้ จากนั้นจะมีการถ่ายเชื้อลงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อดำเนินกระบวนการหมัก โดยมีการให้อากาศสำหรับเชื้อยีสต์ขึ้นต้นเพื่อการเจริญจากนั้นจะดำเนินกระบวนการหมักโดยสภาวะไม่ใช้อากาศเพื่อให้เชื้อยีสต์มีกระบวนการเมตาบอลิซึมเปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นเอทานอลที่เป็นผลผลิตสุดท้ายต่อไป เอทานอลที่มีอยู่ในน้ำหมักจะถูกนำไปกลั่นแบบลำดับส่วนเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลอยู่ที่ประมาณร้อยละ 95 โดยน้ำหนักก่อนที่จะนำไปแยกน้ำส่วนที่เหลือ

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)

การหมักเอทานอล

ขั้นตอนการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์จะเริ่มขึ้นหลังจากที่กระบวนการหมักยุติลงโดยความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลในน้ำหมักจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 5 – 10 โดยน้ำหนัก น้ำหมักดังกล่าวจะถูกกลั่นโดยการให้ความร้อนจนได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนักและไม่สามารถทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้นไปอีกแล้วด้วยวิธีการกลั่นแบบธรรมดา โดยที่ของผสมเอทานอล/น้ำ ที่ความเข้มข้นนี้จะถูกเรียกว่าของผสมอะซีโอโทรป หรือ azeotropic solution การผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะต้องใช้ขั้นตอนพิเศษที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดของผสมอะซีโอโทรป ซึ่งไม่สามารถจะแยกน้ำออกได้อีกจากการกลั่นแบบธรรมดา โดยทั่วไปแล้วการกำจัดน้ำออกจากของผสมนี้สามารถทำได้ 3 วิธีใหญ่ ๆ คือ การกลั่นอะซีโอโทรป ส่วนระบบที่สองคือการใช้เยื่อแผ่นชนิดที่ชอบน้ำซึ่งอาจจะเป็น 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°C	0.7893 กรัม.ซม ³
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 ในทางตรงกันข้ามจะลดปริมาณสารที่ก่อให้เกิดมลพิษต่างๆ เช่น สารประเภทไฮโดรคาร์บอน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากออกซิเจนในเอทานอลที่ผสมอยู่ในแก๊สโซฮอล์นั้น จะช่วยให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์สมบูรณ์ขึ้น และส่งผลทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์จากท่อไอเสียลดลงได้นอกจากนี้ น้ำมันที่ผสมแอลกอฮอล์สามารถสันดาปได้เร็ว ทำให้คาร์บอนหรือควันดำจากการเผา

ไหม้ลดลงได้ 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

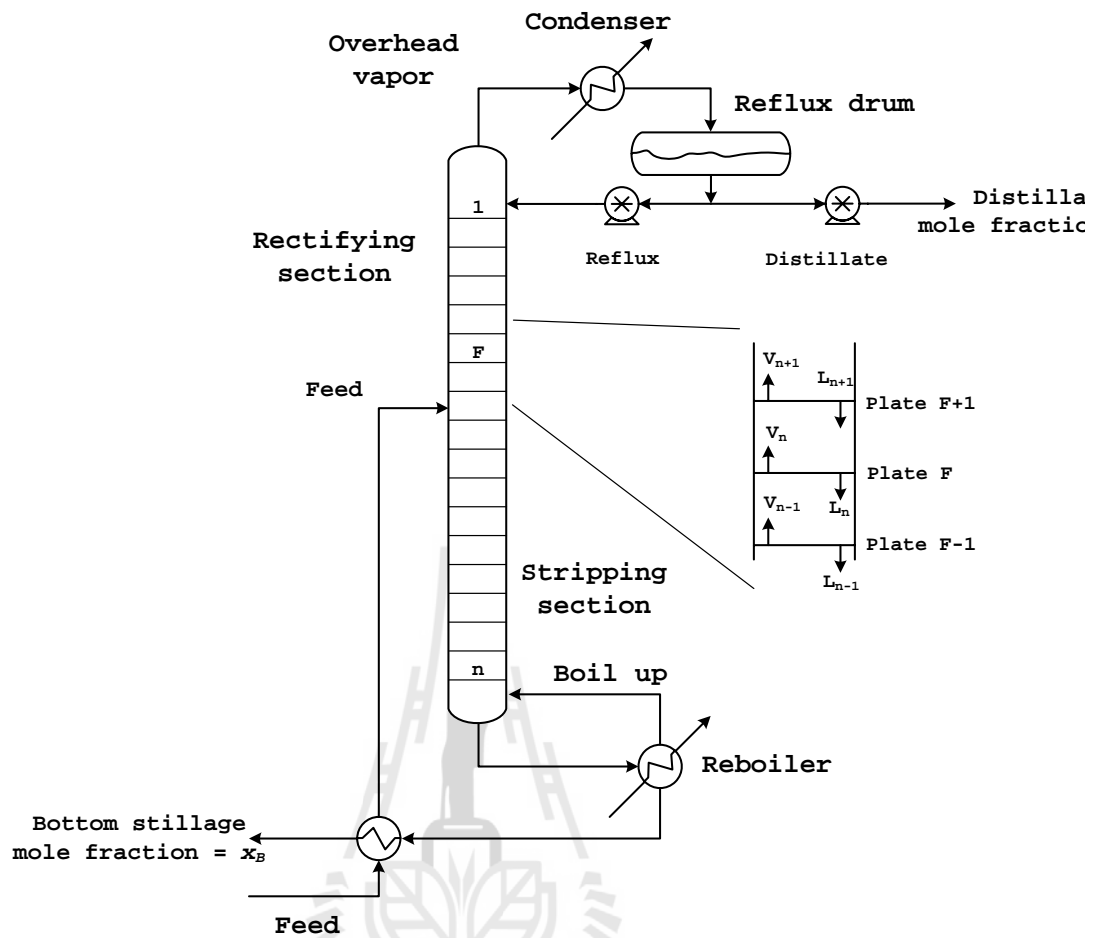
เอทานอลบริสุทธิ์สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้โดยการเติมผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วนเอทานอลที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่นเอทานอล 1 ส่วนต่อน้ำมัน 9 ส่วน เพื่อปรับเพิ่มค่าออกเทน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ซโซฮอล์ E10 เป็นการลดปริมาณการใช้ น้ำมันเบนซินลง สามารถลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้ เอทานอลผสมน้ำมันเชื้อเพลิงมีขายกันอย่างแพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกา ที่พบมากที่สุดคือน้ำมันร้อยละ 10 ผสมเอทานอล ร้อยละ 90 (E10) ยานพาหนะต้องมีการปรับเปลี่ยนเครื่องยนต์ให้ทำงานได้เมื่อเติมน้ำมัน E10 และเฉพาะยานพาหนะที่สามารถปรับเปลี่ยนมีความยืดหยุ่น (flexible fuel vehicles) ที่สามารถใช้ งานกับเชื้อเพลิง E85 นอกจากนี้เอทานอลบริสุทธิ์สูงมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม

ต่างๆเช่น อุตสาหกรรมสี ยา เครื่องสำอาง น้ำหอม ฯลฯ เมื่อเร็ว ๆ นี้เอทานอลความบริสุทธิ์สูงหรือเอทานอลปราศจากน้ำได้ดึงดูดความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมพลาสติกย่อยสลายได้ (biodegradables) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในเทคนิค esterification สำหรับการทำให้กรดแลคติกบริสุทธิ์เพื่อนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตกรด Polylactic (PLA)

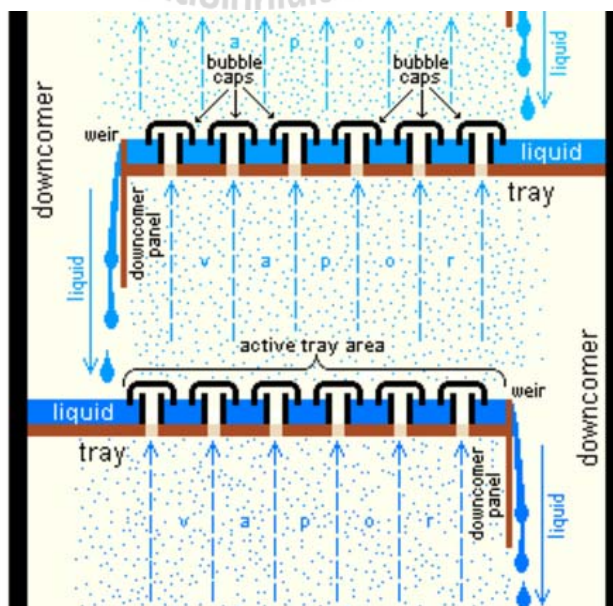
1.3 การกลั่นเอทานอลจากน้ำหมัก

1.3.1 หลักการทั่วไป

การกลั่นลำดับส่วน (fractional distillation) เป็นวิธีการแยกของเหลวที่สามารถระเหยได้ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มีหลักการเพื่อต้องการแยกองค์ประกอบในสารละลายให้ออกจากกันโดยเฉพาะสารที่มีความแตกต่างของจุดเดือดไม่มากนัก เช่นการแยกเอทานอลกับน้ำ เป็นต้น โดยกระบวนการกลั่นลำดับส่วนจะเป็นการนำ ไอของแต่ละส่วนไปควบแน่น กลั่นซ้ำและควบแน่นไอรื้อย ๆ โดยภายในคอลัมน์ของการกลั่นลำดับส่วนจะมีลักษณะเป็นชั้นซ้อนกันหลายชั้น แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยช่องนำไอขึ้นข้างบนและช่องสำหรับนำส่วนควบแน่นลงด้านล่าง (downcomers) นอกจากนี้แต่ละชั้นยังมีแผ่นกั้นเล็ก ๆ เพื่อทำหน้าที่ในการกักกันของเหลวบางส่วนไว้บนชั้นไอร้อนที่ขึ้นมาจากชั้นที่ต่ำกว่าจะทำให้ของเหลวบนชั้นนี้เดือด และจะพา เอาสารที่มีจุดเดือดต่ำกว่าลอยขึ้นไปยังชั้นด้านบนถัดไป โดยที่ไอร้อนบางส่วนจะควบแน่นกลายเป็น ของเหลวเรียกว่า partial condensation and evaporation ก่อนที่จะตกลงบนชั้นและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะไหลล้นตกลงสู่ชั้นด้านล่างถัดไปทางช่อง downcomers (ดูรูปภาพ 4 ประกอบ) แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในการพัฒนาการกลั่นคือจำนวนของชั้นที่ต้องการเพื่อทำให้ได้ความเข้มข้นของสารตามต้องการ ยกตัวอย่างเช่นเพื่อที่จะให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 95 นั้น จะต้องใช้จำนวนชั้นมากกว่า 70 ชั้น ทำให้จำเป็นต้องสร้างหอกลั่นที่มีความสูงมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและดูแลรักษาลำบาก



รูปภาพ 3 ระบบการกลั่นแบบต่อเนื่อง



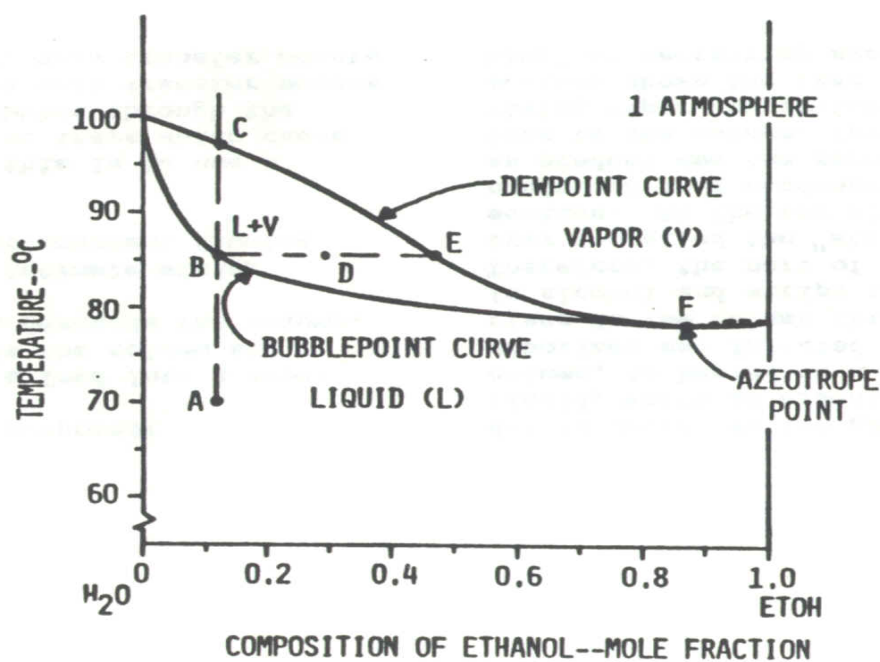
รูปภาพ 4 ภายในของหอกลั่นในแบบ cap tray

รูปภาพ 3 และ รูปภาพ 4 แสดงระบบการกลั่นแบบต่อเนื่อง โดยน้ำหมักจะถูกปั๊มเข้าสู่หอกลั่น ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของหอกลั่น ซึ่งภายในมีลักษณะเป็นชั้น ๆ เพื่อทำหน้าที่กลั่นลำดับส่วน ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในข้างต้น โดยหอกลั่นจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเรียกว่า stripping section ซึ่งเป็นส่วนด้านล่างของจุดที่สารป้อนเข้าหอกลั่น ในขณะที่ส่วน rectifying นั้นจะหมายถึงส่วนของหอกลั่นที่อยู่เหนือจากจุดป้อนขึ้นไป เมื่อสารป้อนถูกป้อนเข้าสู่หอกลั่น เอทานอลจะแยกตัวออกจากน้ำหมักกลายเป็นไอลอยขึ้นสู่ด้านบนของหอกลั่น โดยความเข้มข้นของเอทานอลนั้น จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในชั้นที่อยู่เหนือขึ้นไป ส่วนน้ำหมักที่เจือจางลงแล้ว จะตกลงสู่ด้านล่างของหอกลั่นสู่ส่วนให้ความร้อนหลักของระบบ (reboiler) ซึ่งจะทำให้น้ำกากสาเหือด (boil up) ทำให้ เอทานอลระเหยออกจากน้ำหมักจนหมดและจะไหลออกจากหอกลั่นไป โดยน้ำกากสาเหือดที่ร้อนนั้นจะเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทำหน้าที่อุ่นสารป้อนที่จะเข้าหอกลั่น ทำให้สารป้อนนั้นมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการกลั่น ส่งผลให้ลดต้นทุนการผลิตลงได้เป็นอย่างมาก ส่วนไอของเอทานอลที่ออกจากด้านบนของหอกลั่นนั้น (overhead vapor) จะถูกทำให้เกิดการควบแน่นโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (condenser) และจะเข้าสู่ถังรีฟลักซ์ (reflux drum) และจะมีการแบ่งบางส่วนของเอทานอลนี้ให้เข้าสู่หอกลั่น (reflux) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของส่วนควบแน่น (distillate) ให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ

1.3.2 การกลายเป็นไอบางส่วนและการควบแน่นบางส่วน

รูปภาพ 5 แสดงแผนภาพสมดุลของเอทานอล / น้ำ และองค์ประกอบทั้งหมดแสดงเป็นเศษส่วนโมลของเอทานอลในเฟสของเหลว เส้นโค้งเส้นที่ต่ำแสดงองค์ประกอบของเอทานอล / น้ำที่จุดเดือด (bubble point) และเส้นโค้งด้านบนเป็นจุดควบแน่น (dewpoint) ความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของสารละลายที่ความเข้มข้นของเอทานอลต่างๆ แสดงในรูปภาพ ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าจุดเดือดของน้ำและ เอทานอลที่ความดัน 1 บรรยากาศจะอยู่ที่ 100 และ 78.32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่นน้ำหมักที่จุด A มีความเข้มข้นของเอทานอลประมาณร้อยละ 12 ถูกทำให้ร้อนจากอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสให้ไปถึงจุด B ซึ่งเป็นจุดเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 86 องศาเซลเซียส โดย ณ อุณหภูมินี้จะทำให้เอทานอลกลายเป็นไอ และเมื่อทำการควบแน่นไอดังกล่าวที่จุดควบแน่น จะได้ของเหลวที่มีความเข้มข้นเอทานอลประมาณร้อยละ 45 (จุด E) และหากทำการให้ความร้อนเพิ่มจนถึงจุด C จะทำให้ของเหลวทั้งหมดกลายเป็นไอ ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิของไอเอทานอลที่ออกจากหอกลั่นให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม ก็จะเป็นการควบคุมความเข้มข้นของเอทานอลได้ตามต้องการ โดยจำเป็นที่จะต้องทำการปั่นไอเอทานอลที่ลอยขึ้นมาให้เกิดการควบแน่นบางส่วน เหลือแต่ส่วนของเอทานอลบริสุทธิ์ที่จะลอยออกจากด้านบนของหอกลั่นออกไป และที่จุดวิกฤต (F) องค์ประกอบของสารใน

เฟสไอมีค่าเท่ากับเฟสของเหลว ดังนั้นองค์ประกอบของสารจะไม่เปลี่ยนแปลงถึงแม้จะมีการต้มให้ความร้อนอีกก็ตามจึงไม่สามารถเพิ่มความเข้มข้นได้อีก เรียกของผสมนี้ว่า อะซีโอโทรป (azeotropic mixture) เอทานอลและน้ำจะเกิดของผสมอะซีโอโทรปที่ความเข้มข้นร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก หรือที่ร้อยละ 89.5 โดยโมล ที่ 78.2 องศาเซลเซียส

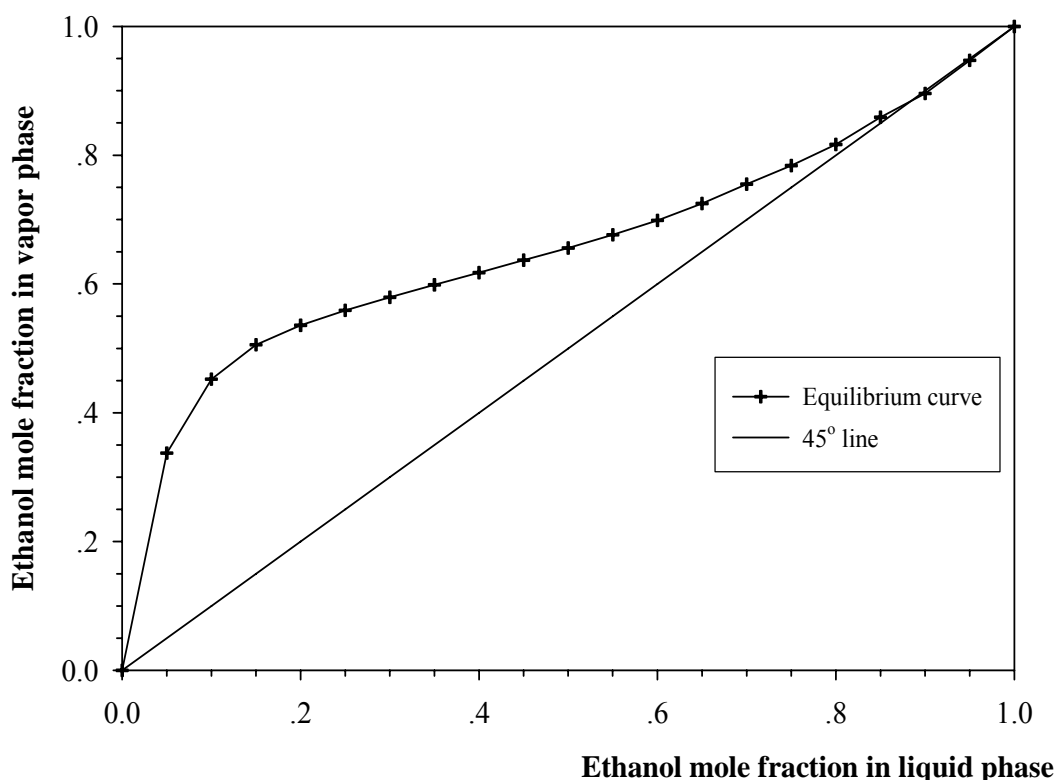


รูปภาพ 5 จุดเดือดของสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (Roehr, 2001)

การกลั่นเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดที่จะแยกส่วนผสมของสารบนพื้นฐานของความแตกต่างของความสามารถในการระเหยได้ ในกระบวนการกลั่น ไอร้อนที่ขึ้นมาจากชั้นที่ต่ำกว่าจะทำให้ของเหลวบนชั้นนี้เดือด และจะพาเอาสารที่มีจุดเดือดต่ำกว่าลอยขึ้นไปยังชั้นด้านบนถัดไป ไอจะลอยขึ้นสู่ด้านบนของหอกลั่น โดยความเข้มข้นของเอทานอลนั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในชั้นที่อยู่เหนือขึ้นไป และไอร้อนบางส่วนจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวก่อนที่จะตกลงบนชั้นและเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะไหลล้นตกลงสู่ชั้นด้านล่างถัดไป ความรู้เกี่ยวกับข้อมูลสมดุลของไอ-ของเหลว (VLE) มีความสำคัญมากในการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพการกลั่น การประมาณค่าของเศษส่วนโมลเฟสของไอ (y_i) สามารถหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ (Ohe, S., 1989)

$$y_i P = x_i \gamma_i P_i^{sat} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

เมื่อ P คือความดัน x_i คือเศษส่วนโมลของสาร i ในเฟสของเหลว y_i คือสัมประสิทธิ์ของแอกติวิตีของสาร i ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของ UNIQUAC และ P_i^{sat} คือความดันไออิ่มตัวของสาร i ซึ่งสามารถหาได้โดยสมการของ Antoine (Fáunde, C.A. et al., 2006)



รูปภาพ 6 แผนภาพสมดุลไอ-ของเหลว (VLE) ของระบบเอทานอล/น้ำที่ความดันคงที่ (Warren L. McCabe *et al.*, 2005)

แม้ว่าเอทานอลเป็นสารที่ระเหยง่าย แต่การแยกก็สามารถทำได้ยากมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่ออัตราส่วนร้อยละของน้ำในเฟสไอลดลง การกลั่นโดยปกติจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการแยกในขั้นพื้นฐาน แต่น้ำจะไม่สามารถแยกออกได้อีกเมื่อถึงจุดอะซีโอโทรปของสารผสม ระบบการกลั่นที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปเป็นการกลั่นแบบลำดับส่วนแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะต้องใช้จำนวนชั้นในการกลั่นที่มีความสูงมาก (Seader, J.D. and E.J. Henley, 2005) ปัญหาที่เกิดขึ้นในการพัฒนาการกลั่นคือจำนวนของชั้นที่ต้องการเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารตามต้องการ ยกตัวอย่างเช่นเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 95 นั้น จะต้องใช้จำนวนชั้นมากกว่า 70 ชั้น ทำให้จำเป็นต้องสร้างหอกลั่นที่มีความสูงมาก สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและดูแลรักษาลำบาก และหน่วยการกลั่นขนาดเล็กก็สามารถทำได้ยาก หน่วยวิจัยชีวมวลจากชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้สร้างหน่วยการกลั่นแบบต่อเนื่องขึ้นตั้งแต่ปี 2009 โดยหนึ่งใน

วัตถุประสงค์หลักในการดำเนินการวิจัยคือการแยกน้ำออกจากของผสมเอทานอล การพัฒนาที่สำคัญที่สุดของหน่วยงานวิจัยคือการสร้างหน่วยการกลั่นแบบต่อเนื่องขนาดเล็ก (lab scale) ดังแสดงในรูปภาพ

1. การออกแบบชิ้นส่วนหอกลั่น

ชิ้นส่วนทั้งหมดได้ถูกออกแบบขึ้นภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมดในการจัดสร้าง (stainless steel) โดยมีการออกแบบระบบการกลั่นใหม่ ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของสารละลายที่ความเข้มข้นของเอทานอลต่าง ๆ ดังแสดงในรูปภาพ 5 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าจุดเดือด (bubble point) ของน้ำและเอทานอลที่ความดัน 1 บรรยากาศจะอยู่ที่ 100 และ 78.32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่นน้ำหมักที่จุด A มีความเข้มข้นของเอทานอลประมาณร้อยละ 12 ถูกทำให้ร้อนจากอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสให้ไปถึงจุด B ซึ่งเป็นจุดเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 86 องศาเซลเซียส โดย ณ อุณหภูมินี้จะทำให้เอทานอลกลายเป็นไอและเมื่อทำการควบแน่นไอดังกล่าวที่จุดควบแน่น (dewpoint) จะได้ของเหลวที่มีความเข้มข้นเอทานอลประมาณร้อยละ 45 (จุด E) และหากทำการให้ความร้อนเพิ่มจนถึงจุด C จะทำให้ของเหลวทั้งหมดกลายเป็นไอ ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิของไอเอทานอลที่ออกจากหอกลั่นให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม ก็จะเป็นการควบคุมความเข้มข้นของเอทานอลได้ตามต้องการ โดยจำเป็นที่จะต้องทำการปั่นไอเอทานอลที่ลอยขึ้นมาให้เกิดการควบแน่นบางส่วน เหลือแต่ส่วนของเอทานอลบริสุทธิ์ที่จะลอยออกจากด้านบนของหอกลั่นออกไป

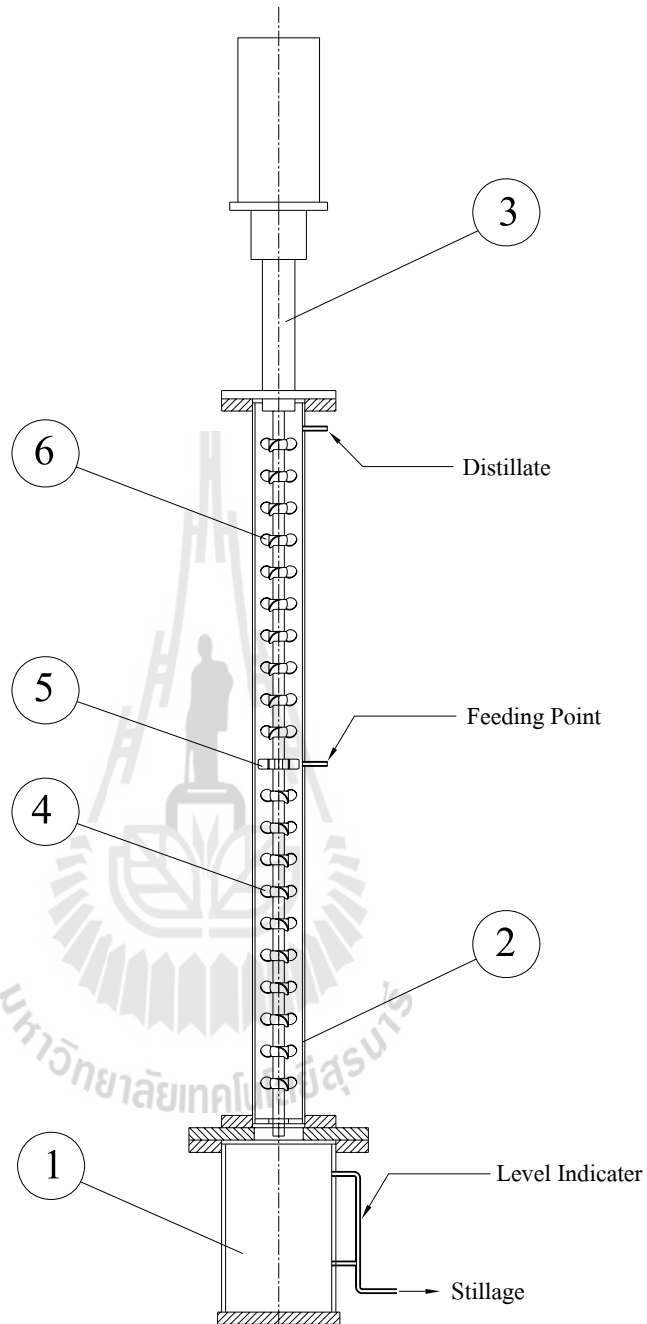
หอกลั่นเอทานอลแบบต่อเนื่องที่ได้ทำการออกแบบใหม่นี้ ประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ ออกเป็น 6 ส่วน ดังแสดงในรูปภาพ 7 คือ

- 1) หม้อต้ม (boiler) – ทำหน้าที่ในการให้ความร้อนหลักกับระบบ โดยผลิตจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ด้านล่างถูกปิดด้วยแผ่นสแตนเลสขนาด 15×15 เซนติเมตร เพื่อใช้สำหรับวางลงบนแผ่นให้ความร้อน (hot plate) ด้านบนเชื่อมกับหน้าแปลนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 เซนติเมตร ด้านข้างหม้อต้มเชื่อมด้วยท่อใส เพื่อให้สามารถมองเห็นระดับของของเหลวภายในหม้อต้มได้ (level indicator) ด้านล่างมีรูระบายของเหลวออก เพื่อใช้ในกรณีที่ทำกรกลั่นแบบต่อเนื่อง นอกจากนี้ฝาด้านบนของหน้าแปลนยังได้ทำเป็นช่อง สำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดอื่น ๆ เช่น มาตรวัดความดัน และ อุณหภูมิ เป็นต้น
- 2) คอลัมน์ (column) – ผลิตขึ้นจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.4 เซนติเมตร ยาว 89 เซนติเมตร ด้านบนเชื่อมด้วยหน้าแปลนขนาด 14 เซนติเมตร เพื่อต่อเข้ากับมอเตอร์ และแกนหมุน ส่วนด้านท้ายเชื่อมด้วยหน้าแปลนขนาด 14 เซนติเมตร เพื่อต่อเข้ากับหน้า

แปลนของหม้อต้ม ตรงกลางของคอลัมน์มีท่อต่อเข้าสำหรับสารป้อน (feeding point) ส่วนด้านบนของคอลัมน์ต่อเข้ากับช่องนำไอออก (distillate)

- 3) แกนหมุน (drive shaft) - เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดสำหรับการประดิษฐ์นี้ ด้านบนสุดทำเป็นสลัก เพื่อต่อเข้ากับมอเตอร์กระแสตรงขนาด 120 วัตต์ ที่ปรับความเร็วการหมุนได้ โดยแกนหมุนมีขนาด 1.4 เซนติเมตร ยาว 88.5 เซนติเมตร ด้านบนเชื่อมต่อกับหน้าแปลนขนาด 14 เซนติเมตร และมีประเก็นกันรั่ว (mechanical seal) โดยมีการออกแบบให้สามารถรับแรงอัดได้สูงถึงความดัน 6 บรรยากาศ แกนหมุนนี้เมื่อประกอบเข้ากับคอลัมน์แล้ว จะอยู่ ณ จุดกึ่งกลางของคอลัมน์พอดี และจะทำหน้าที่ในการยึดใบพัด
- 4) ใบพัดในส่วนของ stripping section จะเป็นใบพัดที่มีทิศทางพัดให้ไอลอยขึ้นด้านบน (upward direction) ประกอบด้วยใบพัดเฉียง 45 องศา จำนวน 3 ใบ หนา 1.5 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับปลอกแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.42 เซนติเมตร หนา 8 มิลลิเมตร ด้านข้างเจาะรู สำหรับใช้เกลียวยึดใบพัดกับแกนหมุนให้แน่น โดยมีจำนวนใบพัดทั้งหมด 10 อัน และมีระยะห่างระหว่างตัวใบพัดที่เท่า ๆ กัน
- 5) ใบพัดสำหรับกระจายน้ำหมัก เพื่อให้การแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใบพัดจะทำหน้าที่กระจายน้ำหมักที่ถูกฉีดเข้ามาจากจุดป้อนให้มีลักษณะเป็นละอองเล็ก ๆ กระจายไปทั่วด้านในของหอกกลั่น โดยเป็นแบบ 6-bladed disc turbine
- 6) ใบพัดในส่วนของ rectifying section จะมีลักษณะเดียวกันกับส่วนประกอบในข้อ 4 แต่จะมีมุมเอียง 135 องศา ทำหน้าที่ในการพัดไอให้มีทิศทางลง (downward direction) และเข้าหาผนังด้านในของคอลัมน์ ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างส่วนควบแน่นและระเหยที่ดีที่สุด

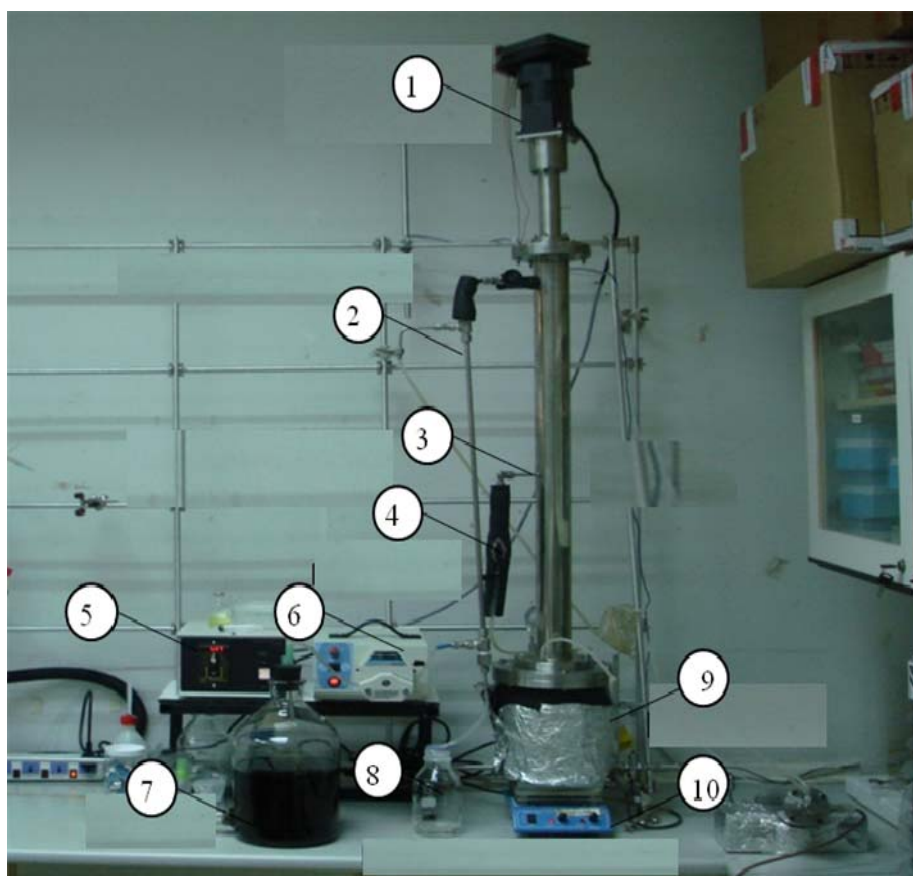
ในการออกแบบชิ้นส่วนของหอกกลั่นประสิทธิภาพสูงนี้ ได้มีการออกแบบระบบการกลั่นให้มีประสิทธิภาพในการแยกสารที่สูงมาก ซึ่งภายในหอกกลั่นจะมีลักษณะเป็นท่อกลาง และมีการเพิ่มระบบการปั่นผสมไอและของเหลวควบแน่นด้วยใบพัดที่อยู่ภายในหอกกลั่น ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วรอบในการหมุนได้ น้ำหมักจะถูกป้อนเข้า ณ จุดกึ่งกลางของท่อ ก่อนที่เอทานอลจะแยกตัวลอยขึ้น ด้านบน โดยไอร้อนที่ลอยขึ้นมาจะถูกใบพัด พัดให้เข้ากับผนังด้านในของท่อหอกกลั่น ทำให้เกิดการควบแน่นบางส่วน ในขณะที่ไอร้อนที่ถูกพัดตามมาจากด้านล่างจะทำให้เกิดการระเหยของของเหลวเพิ่มขึ้น และเกิดการผสมกันระหว่างไอและของเหลว ทำให้เกิดสมดุลระหว่างการควบแน่นและการกลายเป็นไอรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการแยกที่สมบูรณ์ภายในหอกกลั่น ซึ่งหากเทียบประสิทธิภาพที่เท่ากันแล้ว ความสูงของหอกกลั่นที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ จะสั้นกว่าหอกกลั่นแบบชั้นเป็นอย่างมาก ทำให้ประหยัดพลังงานในการกลั่นลงได้มาก และเนื่องจากเป็นการออกแบบที่ไม่มีชิ้นภายในหอกกลั่น จึงเป็นการกำจัดปัญหาในการที่มีของเหลวตกค้างอยู่ภายในชั้นของหอกกลั่น ได้อีกด้วย



6	Downflow Impeller		Stainless steel	10
5	Turbine		Stainless steel	1
4	Upflow Impeller		Stainless steel	10
3	Drive Shaft		Stainless steel	1
2	Column		Stainless steel	1
1	Boiler		Stainless steel	1
No.	Part Name	Dimension	Material	Quantity
Drawing By Ophat			Scale:	
Part Name ชิ้นส่วนหอกลั่นเอทานอลประสิทธิภาพสูงระดับโรงงานต้นแบบ			Drawing No.	



รูปภาพ 7 ภาพวาดการออกแบบภายนอกของหอกลั่นแบบการปั่นผสมไอ



รูปภาพ 8 การทดลองระบบการกลั่นเอทานอลบริสุทธิ์แบบต่อเนื่องจากน้ำหมัก (Boontawan A., 2553): 1, มอเตอร์; 2, เครื่องควบแน่น; 3, ทางเข้าหอกลั่น; 4, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน; 5, เครื่องควบคุมความเร็วรอบของการหมุน; 6, บั๊มด้านสายป้อน; 7, สารป้อน; 8, ผลิตภัณฑ์เอทานอล; 9, หม้อต้ม; 10, เครื่องให้ความร้อนสำหรับเอทานอล

1.4 กระบวนการแยกน้ำออกจากเอทานอล

จากการที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นจะต้องใช้ขั้นตอนพิเศษที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดของผสมอะซีโอโทรป ซึ่งไม่สามารถจะแยกน้ำออกได้อีกจากการกลั่นโดยปกติ ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปแล้วการกำจัดน้ำออกจากของผสมนี้ในระดับอุตสาหกรรมสามารถทำได้ 3 วิธีใหญ่ ๆ คือ การกลั่นอะซีโอโทรป (Azeotrop distillation) ซึ่งจะมีการเติมสารเคมีพวก Benzene หรือ Cyclohexane เพื่อทำให้ความดันไอของระบบลดลง ก่อนที่จะใช้ความร้อนในการกลั่นอีกครั้งหนึ่ง ในปัจจุบันระบบนี้จะใช้ต้นทุนการผลิตสูงทำให้ไม่คุ้มค่ากับการลงทุนเนื่องจากต้องทำการกลั่นถึงสองครั้ง นอกจากนี้แล้วสารเคมีที่เติมไปนั้น เป็นสารก่อมะเร็ง จึงมีปัญหารื่องความกังวลต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานเป็นอย่างมาก ส่วนระบบที่สองคือการใช้เยื่อแผ่นชนิดที่ชอบน้ำซึ่งอาจจะเป็น pervaporation หรือ vapor permeation ก็ได้ โดยเชื่อ

แผ่นชนิดนี้จะยอมให้น้ำผ่านได้ดีกว่าเอทานอล แต่ข้อเสียของระบบนี้คือจะต้องใช้พื้นที่ของเยื่อแผ่นมากและประสิทธิภาพของการแยกจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำลดลงตามไปด้วย ยิ่งความเข้มข้นของน้ำมีน้อยเท่าใด การแยกก็จะยากขึ้น ส่วนระบบที่สาม คือ การใช้ molecular sieve ซึ่งทำจากสารพวกซิลิกา มาบีบอัดและให้ความร้อนจะเกิดเป็นรูพรุนข้างในมีขนาดเล็กประมาณ 3 อังสตรอมซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่าโมเลกุลของน้ำ แต่มีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของเอทานอล ทำให้น้ำสามารถเข้าไปอยู่ในรูเหล่านี้ได้ ในขณะที่เอทานอลจะมีขนาดใหญ่กว่าและจะออกจากระบบไป เนื่องจากว่าปริมาณของรูที่สามารถกักกันนี้ได้นี้มีจำกัด ดังนั้นถ้าความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนมีมากเกินไป ก็จะทำให้เกิดจุดอิ่มตัวเร็ว ต้องทำการ regenerate บ่อยครั้ง ประสิทธิภาพการทำงานก็จะลดลง

1.4.1 การกลั่นอะซีโอโทรป

การกลั่นอะซีโอโทรป เป็นหนึ่งในเทคนิคที่ใช้ในการสลาย azeotrope ในการกลั่น ในงานด้านวิศวกรรมเคมี การกลั่นอะซีโอโทรป มักจะหมายถึงเทคนิคเฉพาะของการเพิ่มองค์ประกอบอื่นเพื่อทำให้จุดเดือดของสารที่แตกต่างกันต่ำลง (เช่น การผลิตของเหลวสองวัฏภาคที่ไม่ละลายเข้าด้วยกัน) ตัวอย่างของสารเคมีที่ใช้เติมลงไปเพื่อทำให้จุดเดือดต่ำลงเช่น เบนซีน ซึ่งสารเคมีดังกล่าวมีความเป็นพิษสูง ในความเป็นจริงที่เกิดขึ้นการเพิ่ม entrainer ซึ่งทำให้รูปแบบเฟสการแยกมีความเป็นเฉพาะแบบย่อยๆสำหรับวิธีการกลั่นอะซีโอโทรป หรือการรวมกันนั้น กระบวนการกลั่นอะซีโอโทรปเป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานสูงถึง 10,376 kJ/kg เอทานอล (Matsuura, 1994) และเมื่อพิจารณาแล้วเป็นกระบวนการที่ไม่น่าสนใจทางเศรษฐกิจ การกลั่นอะซีโอโทรปของสารต่างชนิดกันเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการแยกสารผสมอะซีโอโทรปแบบสององค์ประกอบ เพื่อให้ได้สารองค์ประกอบที่บริสุทธิ์ ยกตัวอย่างเช่น การใช้เบนซีนในการแยกน้ำออกจากเอทานอล ในปี 1902 Young ได้เตรียมแอลกอฮอล์ปราศจากน้ำจากส่วนผสมของเอทานอลและน้ำโดยการใช้เบนซีน สารที่ใช้เป็น entrainer เพื่อทำให้เกิดการแยกมีหลายชนิดเช่น เบนซีน ไซโคล เฮกเซน อะซีโตนและเพนเทน ในจำนวนนี้มีเบนซีนและ ไซโคลเฮกเซน มีการใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด

ปัจจุบัน ได้ยกเลิกการใช้เบนซีนเป็นตัว entrainer เนื่องจากสารดังกล่าวเป็นสารก่อมะเร็ง แต่ก็ยังมีบางประเทศที่ยังใช้สารดังกล่าวอยู่ กระบวนการเชิงพาณิชย์ทุกกระบวนการสำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอลพยายามทำเพื่อให้ได้รับเอทานอลบริสุทธิ์ กระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูง เพราะมันเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อรักษาและ recirculate ปริมาณสูงของ entrainer ตลอดตลอดมันเพื่อให้บรรลุผล azeotropic ที่ต้องการ นอกจากนี้แอลกอฮอล์บริสุทธิ์ต้องถูกเก็บไว้อย่างดีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการดูดซึมน้ำจากบรรยากาศ

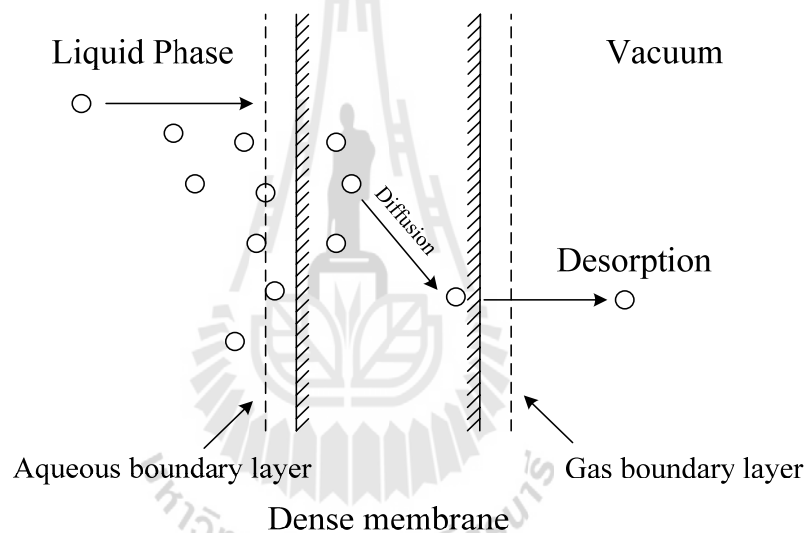
1.4.2 การแยกโดยใช้เยื่อแผ่น

กระบวนการทางเยื่อแผ่นกลายเป็นสิ่งที่สำคัญมากกว่าในยุคของค่าใช้จ่ายพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างนี้ เนื่องจากระบบนี้มักจะต้องใช้พลังงานน้อยกว่าวิธีการแยกแบบอื่น เช่นการกลั่น การซึมผ่านของแก๊สโดยใช้เยื่อแผ่นมีการใช้อย่างแพร่หลายในการแยกสารผสม เช่น ออกซิเจน/ไนโตรเจน ไฮโดรเจน/คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน/ไนโตรเจนและอื่น ๆ ระบบการทำงานของเยื่อแผ่นสำหรับการแยกแก๊สเหล่านี้เป็นแบบอุณหภูมิคงที่ (isothermal) เพราะจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงสถานะเกิดขึ้น และมีหลายประเภทที่เป็นระบบเยื่อแผ่นของเหลว (Luyben, , 2009)

Pervaporation (PV) และ vapor permeation (VP) คือกระบวนการเยื่อแผ่นที่เหมาะสม สำหรับการแยกสารผสมอินทรีย์หลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแยกสารออกจากจุดอะซีโอโทรปที่ไม่สามารถใช้เทคนิคการแยกแบบเดิม กระบวนการเยื่อแผ่นทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด แตกต่างกันเพียงสายป้อนของระบบแรกอยู่ในเฟสของเหลว และระบบหลังสารสายป้อนต้องอยู่ในรูปเฟสไอตามลำดับ ในขณะที่อัตราการซึมผ่านในทั้งสองระบบเป็นไอ แรงขับเคลื่อนทางอุณหพลศาสตร์สำหรับการขนส่งวัสดุที่ผ่านเยื่อแผ่นแบบไม่มีรูพรุนจะได้รับโดย ความแตกต่างด้านศักย์ทางเคมี (chemical potential) ของส่วนประกอบการซึมผ่านระหว่างด้าน ป้อนและด้านเพอมีเอท ซึ่งการแยกมักจะประสบความสำเร็จที่ความดันด้านเพอมีเอทต่ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบ pervaporation และระบบ vapor permeation พบว่าระบบ vapor permeation มีความได้เปรียบกว่าที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้นระหว่างด้านสายป้อนและ ด้านเพอมีเอท ปัญหาในเรื่องของการเพิ่มพลังงานเพื่อทำให้สารเกิดการระเหยก็ถูกหลีกเลี่ยงไป สำหรับสภาพการทำงานที่เหมือนกัน ของผสมด้านสายป้อนในระบบ pervaporation และสมดุล ของไอด้านสายป้อนในระบบ vapor permeation มีความสอดคล้องกันของลักษณะการซึมผ่าน คือ การซึมผ่านได้ของสารทั้งสองระบบสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีความแตกต่างของศักย์เคมี ระหว่างทั้งสองด้านของเยื่อแผ่น (Schehlmann *et al.*, 1995)

ในปัจจุบัน ระบบ pervaporation ได้มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็น กระบวนการแยกที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและถูกเลือกใช้อย่างมากสำหรับการแยก ผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้และการแยกน้ำจากสารเคมีอินทรีย์ นอกจากนี้การผลิตและอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเกิดเป็นคู่กับ PV เช่นเครื่องปฏิกรณ์ PV Pervaporation เกี่ยวกับการใช้สายป้อนที่เป็นของเหลวในการผลิตไอเพอมีเอท และของเหลว retentate การแยกของสารองค์ประกอบสองสารหรือมากกว่าในเยื่อแผ่นในกระบวนการ pervaporation จะเกิดขึ้นโดยความแตกต่างของอัตราการแพร่ผ่านพอลิเมอร์บาง ๆ และการ เปลี่ยนเฟสระเหยเทียบได้กับขั้นตอนแฟลชแบบง่าย สารสามารถซึมผ่านเยื่อแผ่นได้เนื่องจาก ความเข้มข้นและความดันไอที่แตกต่าง ความดันสูญญากาศถูกนำไปใช้ในด้านเพอมีเอทควบคู่ กับการควบแน่นของไอเพอมีเอท (Wasewar *et al.*, 2009)

กลไกพื้นฐานของกระบวนการ pervaporation คือ การถ่ายเทองค์ประกอบหนึ่งๆผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุน (non-porous) สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่-การละลาย ดังแสดงในรูปภาพ 9 ซึ่งประกอบด้วยสามขั้นตอนหลักดังนี้ ขั้นตอนแรกเกี่ยวข้องกับการละลายหรือการดูดซับของสารเข้าสู่เยื่อแผ่น ขั้นตอนที่สองคือการแพร่กระจายของสารผ่านเยื่อแผ่นเนื่องจากความแตกต่างของความดัน หรือความแตกต่างของความเข้มข้น ขั้นตอนสุดท้ายคือขั้นตอนการคายออก (desorption) หรือการระเหยของสารในรูปของไอทางด้านเพอมีเอท ซึ่งสามารถที่จะเป็นไอลงภายใต้สุญญากาศหรือก๊าซเฉื่อยก่อนที่จะถูกจัดเก็บอยู่ใน cold trap การแยกสารของเหลวผสมสามารถทำได้ประสบความสำเร็จขึ้นอยู่กับทางเลือกของเยื่อแผ่นทั้งอัตราการซึมผ่านที่สูงและการเลือกผ่านที่ดี (Delgado *et al.*, 2008)



รูปภาพ 9 แผนผังรูปภาพของระบบ pervaporation (Huang, 1991)

ในระบบ PV ด้านสายป้อนอยู่ในรูปแบบของของเหลว ในขณะที่สายป้อนถูกนำไปใช้เป็นเฟสไอสำหรับระบบ VP ในระบบ VP เพียงแค่มีการซึมผ่านเยื่อแผ่นก็สามารถแยกส่วนประกอบของสารได้ ดังนั้นปัญหาของการจัดหาความร้อนของการกลายเป็นไอก็สามารถหลีกเลี่ยงได้ นอกจากนี้ระบบน่าจะเหมาะสมสำหรับการแยกน้ำต่อจากกระบวนการกลั่นแบบลำดับส่วนที่ด้านบนของคอลัมน์การกลั่น ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไอด้านสายป้อนสามารถส่งไปยังโมดูลเยื่อแผ่นได้โดยตรง (Yeom *et al.*, 1997)

ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำออกจากไอผสมนั้นสามารถแสดงได้ 2 อย่างคือ ค่า ฟลักซ์ (J) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

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

โดยที่ W หมายถึงน้ำหนักของเพอมีเอทที่ได้ (กิโลกรัม), t เป็นเวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง) และ A หมายถึงพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ใช้ (ตารางเมตร) ดังนั้นหน่วยของฟลักซ์ก็คือ กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรนั่นเอง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแยก (separation factor, α) 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 ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$)

Δp_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 ในส่วนของสารป้อน

γ_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).

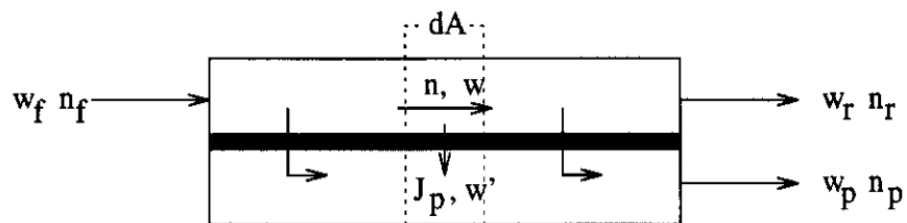
สำหรับระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น Δp_i ในสมการที่ (5) คือความแตกต่างของความดันไอย่อยของสาร i ระหว่างด้านสายป้อน ($p_{i,f} = x_{i,f} P_f$) และด้านเพอมีเอท ($p_{i,p} = x_{i,p} P_p$) โดยที่ P_f คือความดันรวมด้านสายป้อน ในการแยกน้ำออกจากของผสมเอทานอล/น้ำ สามารถแยกได้สำเร็จทั้งในระบบ VP และ PV และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ PV และ VP ผลการ

ทดลองชี้ให้เห็นว่าระบบ VP มีข้อได้เปรียบที่ดีกว่าในเทอมของประสิทธิภาพการแยก (Boontawan *et al.*, 2007)

1.4.2.1 สมการการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงผลของพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องใช้ในการแยกน้ำ ต่อความเข้มข้นของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ต้องการ

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

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



รูปภาพ 10 ภาพอย่างง่ายของโมดูลการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นซึ่งอัตราการซึมผ่านของเยื่อแผ่น เป็นแบบ Cross - flow (Pettersen, 1995)

รูปภาพ 8 แสดงให้เห็นภาพอย่างง่ายของโมดูลการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นสำหรับการแยกของผสมระบบไบนารี การเปลี่ยนแปลงในอัตราการไหลของมวล (n) ทางด้านสายป้อนของพื้นที่เยื่อแผ่น (A) มีการแสดงออกโดยการไหลซึมผ่านรวม (J_p)

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

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางด้านสายป้อนของเยื่อแผ่นอาจจะได้รับจากสมมูลมวลที่เกี่ยวข้องกับการซึมผ่านของส่วนประกอบที่เร็วที่สุด

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

ด้วยการไหลข้าม (cross-flow) ทางด้านเพอมีเอทของเยื่อแผ่น องค์ประกอบของสารด้านเพอมีเอทจึงไม่ได้รับผลกระทบจากรูปแบบการไหล (ตัวอย่างเช่น การไหลร่วม (co-current flow) หรือการไหลสวนทาง (counter-current flow)) และองค์ประกอบของการซึมผ่านไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นอาจจะกำหนดไว้ในเทอมของการเลือกผ่านเยื่อแผ่น (α)

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

ถ้าโมเดลสามารถใช้ได้สำหรับการคำนวณ α และ J_p ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับส่วนประกอบของสารด้านสายป้อน สมการ (6)-(8) อาจมีการแก้ปัญหาค่าได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์แก้ปัญหาค่าจะได้รับโดยมีเงื่อนไขว่าสมมติฐานนั้นจะต้องมีความเหมาะสมเกี่ยวกับคุณสมบัติการขนส่งของ α และ J_p

การศึกษาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์

การกระจายของส่วนประกอบของทั้งสองสายผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะประเมินประสิทธิภาพของการแยกในระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น โดยเป็นการรวมสองสมการสมมูลมวลความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของสารด้านสายป้อนที่มีอยู่เดิมและองค์ประกอบสารด้านป้อนที่ได้มา

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

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) เป็นเทอมเล็กๆ และสามารถนิยามเป็น module cut rate (θ) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลด้านเพอมีอิตและอัตราการไหลด้านสายป้อน แสดงดังสมการที่ (11)

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

ส่วนด้านขวามือของสมการ (11) ยังอยู่ในรูปแบบของอินทิกรัล และเพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการวิเคราะห์ การตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับการเลือกผ่านเยื่อแผ่นซึ่งเป็นฟังก์ชันกับส่วนประกอบของสารด้านสายป้อนที่มีอยู่เดิมก็มีความจำเป็น พฤติกรรม monotonic นี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบอาจจะมีภาระบุ โดยค่าคงที่เฉลี่ยของการเลือกผ่านเยื่อแผ่น $\bar{\alpha}$

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

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

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

ความเข้มข้นของสารด้านสายเพอมีอิตสามารถหาได้จากสมมูลมวลรวมรอบๆ โมดูลเยื่อแผ่นดังนี้

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

นี่คาดว่าเป็นเพราะการถ่ายโอนมวลผ่านพื้นผิวของเยื่อแผ่นคล้ายกับการถ่ายโอนมวลจากเฟสของเหลวไปยังเฟสไอในกระบวนการกลั่นที่แตกต่างกัน จากสมมติฐานที่ว่าค่าการเลือกผ่านเยื่อ

แผ่นงที่ตามพื้นผิวของเยื่อแผ่นและค่าความสามารถในการระเหยได้ (relative volatility) คงที่ในขั้นตอนการกลั่น ถ้าเราพิจารณาสาย retentate θ อาจจะแสดงในรูปของ recovery ของ retentate และความบริสุทธิ์ของ retentate ดังนี้:

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

จากการแก้สมการที่ (14) และแทนค่าการเลือกผ่านเยื่อแผ่นเฉลี่ยลงในสมการที่ (16) เราจะได้

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

การแสดงผลที่คล้ายกันอาจจะมาจากที่เกี่ยวกับความบริสุทธิ์และ recovery ในสายเพอมีเอท ในกรณีนี้ สามารถแสดงในเทอม ของ recovery ในสายเพอมีเอท (r_p) และความบริสุทธิ์ของสารในด้านเพอมีเอท (w_p) ได้ดังนี้

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

ความสัมพันธ์ของค่าการเลือกผ่านเยื่อแผ่นเฉลี่ยที่จำเป็นกับค่า recovery ในสายเพอมีเอท (r_p) และความบริสุทธิ์ของสารในด้านเพอมีเอท (w_p) ในระบบเยื่อแผ่นขั้นตอนเดียวแสดงดังสมการที่ (19)

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

พื้นที่เยื่อแผ่นซึ่งจะต้องใช้ในขั้นตอนของกระบวนการแยกสารเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดจะมีผลกระทบที่สำคัญเกี่ยวกับค่าใช้จ่าย อาจจะสังเกตได้จากสมคูลมวรวมในสมการที่ (6) พื้นที่เยื่อแผ่นที่ต้องการมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับฟังก์ชันการซึมผ่านรวม โดยการจัดเรียงสมการที่ (6) พื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องการแสดงออกดังนี้

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

ดังนั้นเราจึงเสนอให้ใช้ฟลักซ์การซึมผ่านรวมเฉลี่ย (\bar{J}_p) กำหนดเป็นค่าเฉลี่ยลอการิทึมระหว่างค่าของ J_p ที่ทางเข้าของสายป้อนของโมดูลและค่าของ 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

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

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

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

รายชื่อสัญลักษณ์

A คือพื้นที่ของเยื่อแผ่นmembrane area (m^2)

w สัดส่วนมวลที่ซึมเข้าไปได้มากที่สุด

w' สัดส่วนมวลของสารส่วนที่ซึมเข้าไปได้มากที่สุดในด้านเพอมีเอท

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

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

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

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

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

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

α' การเลือกผ่านเยื่อแผ่นเฉลี่ย

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

1.4.3 การดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure swing adsorption)

การดูดซับแบบสลับความดัน (PSA) เป็นเทคโนโลยีที่หลากหลายสำหรับการแยกสารและการทำให้ก๊าซของผสมบริสุทธิ์ บางอุตสาหกรรมใช้เทคนิคนี้สำหรับการทำให้ก๊าซแห้ง การแยกไอจากตัวทำละลาย การแยกอากาศ การผลิตไฮโดรเจนจากไอน้ำและมีเทน (SMR) การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนจากหลุมฝังกลบ การแยกคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน การแยกไอโซพาราฟิน การแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์ การประยุกต์ใช้ระบบ PSA มีหลายแสนหน่วยสำหรับการดำเนินงานทั่วโลก (Sircar, 2002)

กระบวนการ PSA เป็นที่น่าสนใจสำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอลในขั้นตอนสุดท้าย เนื่องจากระบบนี้ต้องการพลังงานน้อยและสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีบริสุทธิ์สูงมาก นอกจากนี้การคายซับของตัวดูดซับในระบบ PSA ยังง่ายและรวดเร็ว แค่เพียงขั้นตอนการ depressurization เท่านั้น (Jianyu Guan and Xijun Hub, 2003) กระบวนการ PSA สามารถใช้ในการแยกก๊าซผสมในก๊าซที่แตกต่างกันเพราะมีแนวโน้มที่จะดึงดูดกับพื้นผิวที่เป็นของแข็งที่แตกต่างกันมากหรือน้อยอย่างมาก นอกเหนือจากความสามารถในการแยกแยะระหว่างตัวดูดซับก๊าซที่แตกต่างกันแล้ว สำหรับระบบ PSA โดยปกติวัสดุที่นำมาเป็นตัวดูดซับจะมีลักษณะเป็นรูพรุนอย่างมากเพื่อที่จะทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้น ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซิลิกา เจล อลูมินา และซีโอไลต์ กระบวนการ PSA ได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อเทียบกับกระบวนการแบบดั้งเดิม และปัจจุบันกระบวนการนี้ใช้สำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอลในเชิงพาณิชย์

รูปแบบของวัฏจักรของกระบวนการ PSA ประกอบด้วยขั้นตอนการผลิต โดยที่ไอของสารไหลมาจากด้านบนด้วยความดันสูง น้ำจะถูกดูดซับในขณะที่ไอเอทานอลผ่านคอลัมน์ และมีการเก็บเป็นผลิตภัณฑ์ความดันสูงที่ด้านล่างของคอลัมน์ หลังจากขั้นตอนการผลิตแล้ว จะต้องทำการ regenerate เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการดูดซับรอบถัดไปของคอลัมน์ ขั้นแรกความดันในคอลัมน์จะลดลงในขณะที่น้ำบางส่วนจะคายซับและหลุดออก ขั้นตอนนี้เรียกว่าขั้นตอน depressurization ขั้นตอนที่ไปของการ regenerate น้ำจะหลุดออกจากคอลัมน์ภายใต้สูญญากาศ เมื่อใกล้สิ้นสุดขั้นตอน regeneration ส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ (เอทานอล 99.5%) จะถูกใช้ในการไล่น้ำ (purge) ที่ได้รับการดูดซับระหว่างขั้นตอนการผลิต จากนั้นคอลัมน์จะมีแรงดันอีกครั้งเพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการปฏิบัติการดูดซับไอเอทานอลต่อไป หลังจากกระบวนการ regenerate เสร็จสิ้นสมบูรณ์ ตัวดูดซับก็พร้อมที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตในรอบใหม่

คอลัมน์ตัวดูดซับของวัฏจักร PSA จำนวนมากได้ถูกออกแบบให้ใช้อย่างน้อยสองคอลัมน์หรือมากกว่า ซึ่งขั้นตอนการทำงานทั้งหมดได้อธิบายไว้ข้างต้น

การออกแบบที่แม่นยำของหน่วย PSA เป็นงานที่ยากเพราะลักษณะการดำเนินงานของกระบวนการนี้มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการต้องใช้เวลาและ มีผลเชิงทางเศรษฐกิจ เหตุผลเหล่านี้ได้นำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการประเมินขั้นตอนการทำงานของกระบวนการ PSA แบบจำลองที่เชื่อถือได้ช่วยให้เราสามารถลักษณะการดำเนินงานขั้นพื้นฐาน ขนาดระบบ และประเมินสถานการณ์ที่แตกต่างของการดำเนินงานได้ (Simo *et al.*, 2008)

ตัวอย่างลำดับขั้นตอนและปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอลัมน์ของกระบวนการ PSA รอบครั้งสำหรับเอทานอลแสดงดังรูปภาพที่ 10 รอบหรือวัฏจักรของระบบ PSA สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่อไปนี้

(1) ขั้นตอนการดูดซับหรือขั้นตอนการผลิต : ไอของน้ำและเอทานอลถูกป้อนเข้าสู่คอลัมน์การดูดซับจากข้างบนที่ ความดัน 379.2 กิโลปาสกาล (55 Psia) และอุณหภูมิ 440K ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีแรงดันสูงมีการเก็บที่ด้านล่างของคอลัมน์ (เอทานอลแห่งที่ต้องการ) ผลิตภัณฑ์บางส่วนจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการเพิ่มความดันและทำการ purge ในระหว่างขั้นตอนการคายซับ ขั้นตอนการดูดซับใช้เวลาประมาณ 345 วินาที

(2) ขั้นตอนการคายซับ ขั้นตอนนี้จะทำตามหลังเมื่อขั้นตอนการผลิตเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งคอลัมน์การดูดซับจะต้องผ่านขั้นตอนการ depressurized regenerated และ repressurized เพื่อเพิ่มความดันสำหรับการดูดซับ

2.1) ขั้นตอนแรกของการ depressurization เริ่มแรกความดันในคอลัมน์การดูดซับเท่ากับ 379.2 กิโลปาสกาลและลดลงเหลืออยู่ที่ 137.9 กิโลปาสกาล (20 Psia) ในเวลา 60 วินาที หรือน้อยกว่า การไหลผ่านวาล์วมีความสำคัญและความดันลดลงแบบเชิงเส้น ในรูปแบบจำลองของเรา อัตราการ depressurization จะเป็นไปตามภาคตัดขวาง (cross section) ของบอลวาล์ว 1 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ด้านบนของคอลัมน์ (depressurization แบบไหลย้อนทิศทาง) สูญญากาศที่ใช้ในระหว่างขั้นตอนนี้เป็น 37.9 กิโลปาสกาล (5.5 Psia) สำหรับบางกระบวนการ สูญญากาศที่ใช้ในขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองจะเหมือนกัน

2.2) ขั้นตอนที่สองของการ depressurization ความดันด้านสายออก (ด้านบนของคอลัมน์) เป็น 137.9 กิโลปาสกาลและกึ่งลดลงถึง 13.8 กิโลปาสกาล (2 Psia) ในเวลาประมาณ 150 วินาที อัตราการ depressurization ครั้งที่สองจะเป็นไปตามภาคตัดขวางของบอลวาล์ว 2 ตั้งอยู่ที่ด้านบนของคอลัมน์ (depressurization แบบไหลย้อนทิศทาง)

2.3) ขั้นตอนการ Regenerate คอลัมน์ถูก purged โดยผลิตภัณฑ์เอทานอลบางส่วน ที่ความดัน 13.8 กิโลปาสกาลจากด้านล่างของคอลัมน์ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้ระยะเวลาสั้น ซึ่งใช้เวลาเพียง 15 วินาทีเท่านั้น

2.4) ขั้นตอนการเพิ่มความดัน (Pressurization) ความดันของคอลัมน์ภายใต้สูญญากาศในตอนแรกคือ 13.8 กิโลปาสกาล และแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากด้านล่างของคอลัมน์ ความดันของสายผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 379.2 กิโลปาสกาลในเวลาประมาณ 120 วินาที

คอลัมน์การดูดซับบรรจุเต็มไปด้วยตัวดูดซับความชื้น (molecular sieve) มีขนาดของรูพรุนโดยเฉลี่ยประมาณ 3 อังสตรอม (3×10^{-10} เมตร) ขนาดของรูพรุนดังกล่าวนี้จะมีผลต่อการดูดซับของน้ำเป็นอย่างมากเนื่องจากว่าโมเลกุลของน้ำนั้นมีขนาดประมาณ 2.8 อังสตรอม ในขณะที่เอทานอลจะมีขนาดโมเลกุลประมาณ 4.4 อังสตรอม เมื่อไอผสมของน้ำและเอทานอลเคลื่อนที่ผ่าน molecular sieve ภายใต้ความดัน จะทำให้โมเลกุลของน้ำถูก กักกันไว้ ส่วนเอทานอลซึ่งมีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ผ่านโดยไม่ถูกดูดซับแต่อย่างใด (Hartline, 1979 and Ruthven *et al.*, 1986) ข้อมูลการทดลองสำหรับการทดลองอุณหภูมิและความเข้มข้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ของแลงเมียร์ไอโซเทอม (Carmo *et al.*, 1997) ดังที่กำหนดไว้ในสมการที่ (23)

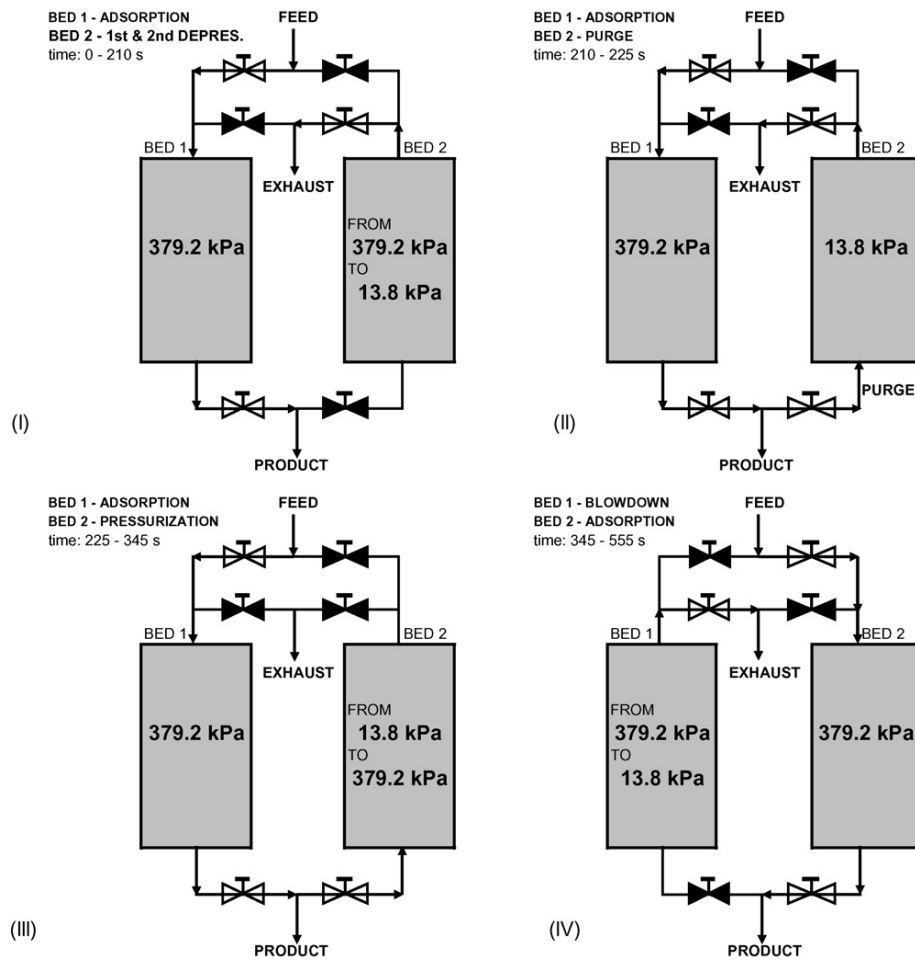
$$q^* = \frac{Q \cdot K \cdot c^*}{(1 + K \cdot c^*)} \quad (23)$$

เมื่อ c^* คือความเข้มข้นของเฟสของเหลวที่สถานะสมดุล (weight % water)

K คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ ($\text{g}_{\text{sol}}/\text{g}_{\text{water}}$)

q^* คือความเข้มข้นของเฟสที่ดูดซับได้ที่สถานะสมดุล ($\text{g}/\text{g}_{\text{ads}}$)

Q คือความสามารถในการดูดซับของ monolayer ($\text{g}/\text{g}_{\text{ads}}$)

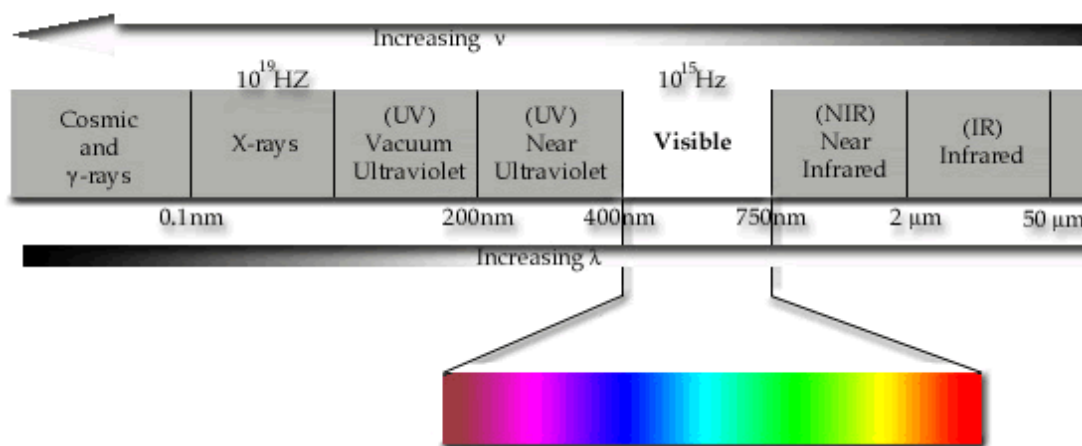


รูปภาพ 11 กระบวนการ PSA สำหรับเอทานอลรอบครึ่ง (345 s) (ขั้นตอน I.–III.); ขั้นตอน IV เป็นการสลับไปมาระหว่างคอลัมน์การดูดซับ (Simo *et al.*, 2008)

1.5 สเปกโตรสโกปีของรังสีใกล้อินฟราเรด (near infrared spectroscopy (NIR))

NIR Spectroscopy เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลาย ตัวอย่าง โดยอาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืน โดยตัวอย่าง เป็นวิธีการที่ให้ผลที่ดีและรวดเร็ว ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ NIR (Near-infrared) Spectroscopy ได้ถูกนำมาใช้งานในช่วงปลายของทศวรรษ 1970 เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกตัวอย่างดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1000-2500 นาโนเมตรของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (รูปภาพ 12) ซึ่ง NIR Spectroscopy มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายๆ ด้าน โดยเฉพาะด้านอาหารและยา ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการจำแนกองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้เป็นอย่างดี โดยมีหลักการทำงานคือเมื่อฉายแสงในช่วงความยาวคลื่น NIR ลงไปบนตัวอย่าง

แสงที่มีพลังงานเพียงพอจะถูกดูดกลืนและกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโมเลกุลใน functional groups ต่างๆ 2 ลักษณะ คือ การยืดหด (stretching) และการเปลี่ยนมุม (bending) ของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H และ N-H ซึ่งเป็น โมเลกุลหลักของสารอินทรีย์ ถ้าโครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ตรวจวัดมีความซับซ้อนสเปกตรัมที่ได้จะยังมีการซ้อนทับกันมากขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์สเปกตรัมเหล่านี้จึงต้องทำการแยกแยะและแสดงลักษณะเฉพาะโดยนำวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติมาใช้ในการหาค่าเฉลี่ย



รูปภาพ 12 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน

ส่วนประกอบหลักของเครื่องมือ

ส่วนประกอบหลักและการออกแบบเครื่องมือ Spectrometer แต่ละประเภทจะมีความคล้ายคลึงกัน โดย NIR นั้นจะประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสง ตัวเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง เครื่องตรวจวัดและบันทึกผล โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. แหล่งกำเนิดรังสีในช่วง NIR นั้นโดยส่วนใหญ่จะใช้หลอดทั้งสแตนเพราะราคาถูกและใช้งานได้ทันที แล้วใช้ตัวฟิลเตอร์ ช่วยกรองแสงในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการออกเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างร้อนจนเกินไป หรือใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดโดยค่าความยาวคลื่นที่ได้จะขึ้นกับสารที่ใช้ทำตัว LED อย่างไรก็ตาม LED ไม่สามารถให้ความยาวคลื่นในช่วง 1700-2500 นาโนเมตรได้ ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมนำไปใช้งาน แต่ก็เหมาะสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพราะต้องการกำลังไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและพลังงานของผลึกพีซีที่ได้ก็ไม่เพิ่มสูงขึ้นแม้จะมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิด

2. โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ช่วยในการกระจายแสงโดยอาศัยเกรตติง และควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการด้วยช่องผ่านแสงเข้า (Entrance Slit) และช่องผ่าน

แสงออก (Exit Slit) ตัวอย่างจะมีการดูดกลืน หรือยินยอมให้รังสีทะลุผ่านหรือสะท้อนกลับนั้น ขึ้นกับรูปแบบและองค์ประกอบของตัวอย่าง เช่น ของแข็ง ของเหลว อิมัลชัน สารแขวนลอย เป็นต้น

3. ตำแหน่งที่วางตัวอย่างจะต้องได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการวิเคราะห์และปริมาณของอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ เช่น ถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่างจะเหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่เป็นตะกอนแห้งหรือในกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณมากถ้วยเหล่านี้จะมีการหมุน เป็นต้น เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่างเหล่านี้จะต้องทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงในช่วง NIR สามารถทะลุผ่านได้ เช่น ควอตซ์ หรือแก้ว และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง

4. อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด (Detector) ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการทาง Photoconductive Effect การเลือกเครื่องตรวจวัดนั้นขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นและการออกแบบตัวแปรต่างๆ ของ Spectrometer ซึ่งซิลิกอนจะเหมาะสมสำหรับแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และ NIR ช่วงความยาวคลื่นสั้น (400-1100 นาโนเมตร)



รูปภาพ 13 ลักษณะของเครื่อง near infrared spectroscopy (NIR)

การวิเคราะห์โดยใช้สเปกโตรสโกปีของรังสีใกล้อินฟราเรด (near infrared (NIR) spectroscopy) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่รวดเร็วกว่าวิธีอื่น คือใช้เวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างประมาณ 0.5 วินาทีเท่านั้น และสามารถทำการวิเคราะห์แบบออนไลน์ได้อีกด้วย ทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มข้นของตัวอย่าง ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ทั้งยังตัวอย่างที่จะ

นำไปวิเคราะห์ไม่สูญเสียเนื่องจากจะมีการใช้แสงดังกล่าวเข้าไปจับกับโมเลกุลของสารตัวอย่าง และอ่านเป็นค่าออกมาเท่านั้น ต่างกับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC ซึ่งจะต้องมีการฉีดตัวอย่างเข้าไป และมีการสูญเสียตัวอย่างอีกด้วย

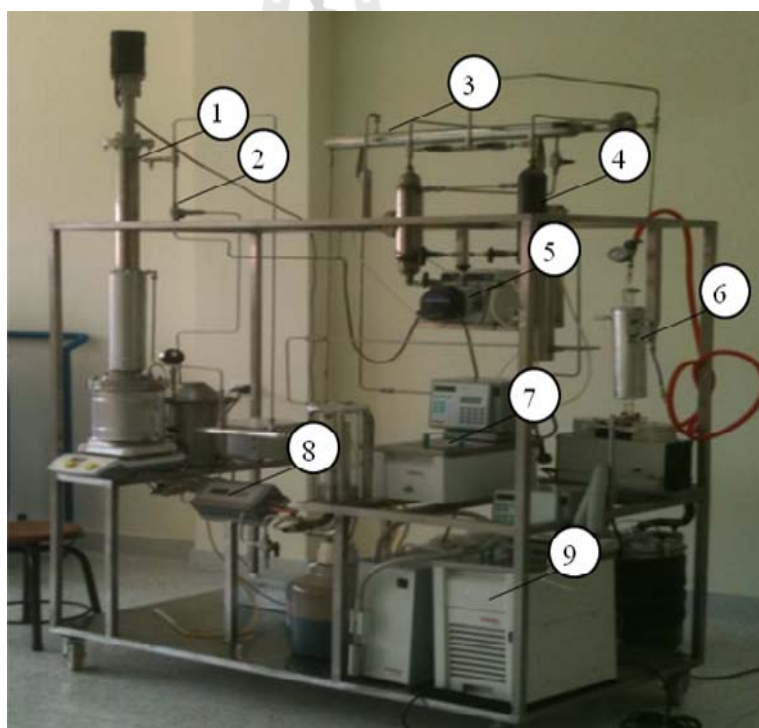
1.6 จุดประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการแยกเอทานอลให้ได้ความเข้มข้นหรือความบริสุทธิ์ประมาณ 99.7 เปอร์เซ็นต์ โดยเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับร่วมกับการประยุกต์ใช้ประยุกต์ใช้สเปกโตรสโกปีของรังสีใกล้อินฟราเรด (near infrared (NIR) spectroscopy) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้านของสารป้อน, retentate, และ permeate stream.
2. ศึกษาวิเคราะห์การแปรผันค่าความเข้มข้นของเอทานอลใน vapor phase และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองหรือข้อมูล ที่ได้จากการประยุกต์ใช้สเปกโตรสโกปีของรังสีใกล้อินฟราเรด โดยสร้างกราฟมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นเอทานอลที่แน่นอน เทียบกับค่าความเข้มข้นของตัวอย่าง
3. ศึกษาและสรุปผลการทดลองเพื่อที่จะนำไปสู่การเผยแพร่ผลงานวิจัยโดยผ่านการตีพิมพ์ ในวารสารนานาชาติและใช้การวิเคราะห์ดังกล่าวเพื่อเป็นค่ามาตรฐานในการควบคุมระบบการผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง นำไปสู่การควบคุมการผลิตไบโอเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบชุดการทดลอง

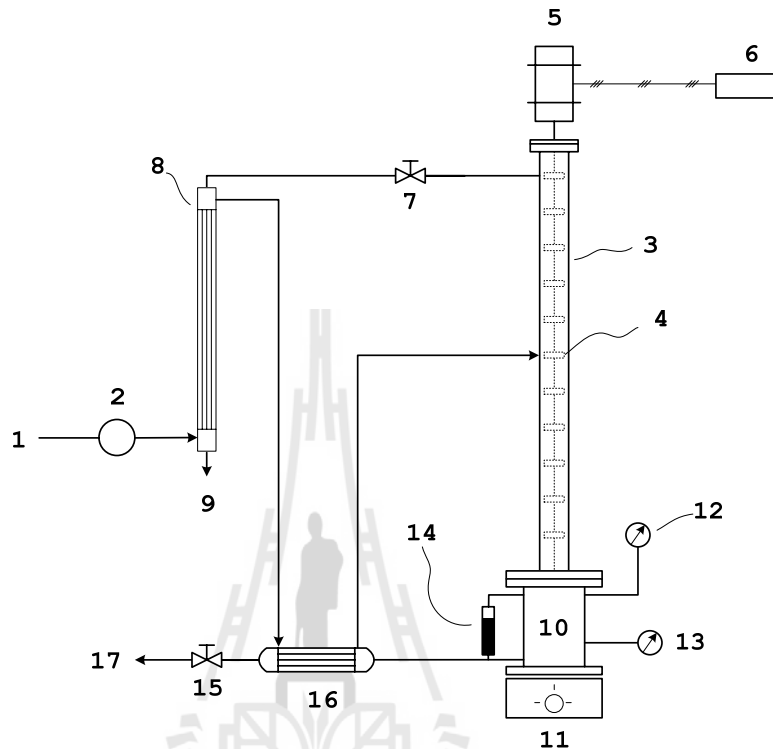
ในการออกแบบการผลิตเอทานอลความบริสุทธิ์สูงได้แบ่งขั้นตอนออกเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 ทำการกลั่นเอทานอลจากน้ำหมักจนได้ความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการแยกน้ำออกจากเอทานอลจนได้ความเข้มข้นประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขั้นตอนสุดท้ายทำการแยกน้ำส่วนที่เหลือต่อไปด้วยเทคนิคการดูดซับจนได้เอทานอลความบริสุทธิ์สูงประมาณ 99.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งการจัดการทดลองระบบการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์ โดยใช้เทคนิคผสมระหว่างการกลั่นการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับแสดงดังรูปภาพ 14



รูปภาพ 14 การจัดการทดลองระบบการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคผสมระหว่างการกลั่นการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ: 1 หอกกลั่น; 2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน; 3 โมดูลการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น; 4 คอลัมน์การดูดซับ; 5 บั้มป้อนน้ำหมัก; 6 เครื่องควบคุม; 7 อ่างให้ความร้อน; 8 NIR; 9 เครื่องทำความเย็น

2.2 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

2.2.1 การกลั่น (การกลั่นโดยอาศัยหลักการผสมแบบบังคับ)



รูปภาพ 15 แผนภาพแสดงระบบการกลั่นแบบการปั่นผสมไอ

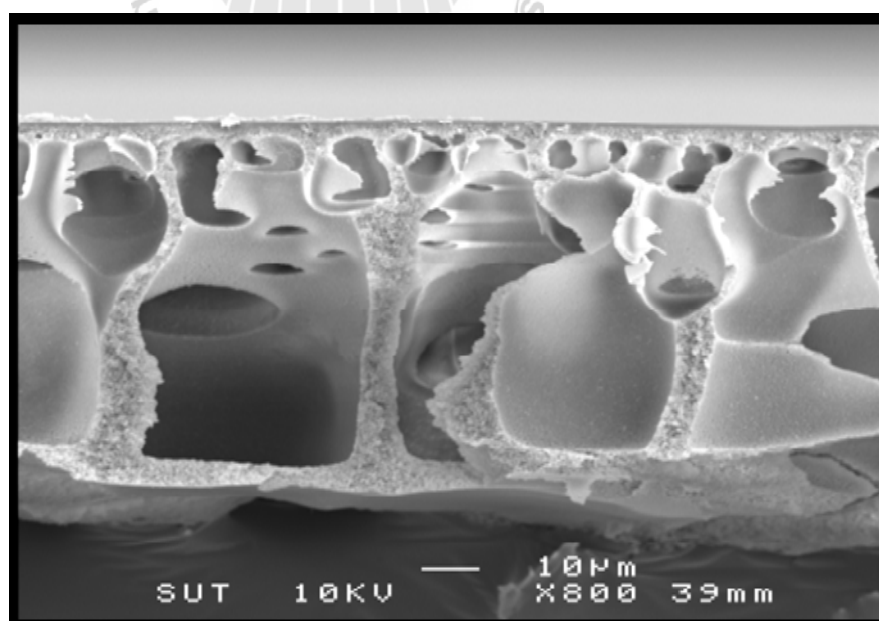
ในการที่จะทำการกลั่นเอทานอลแบบต่อเนื่องนั้น จะต้องมีการติดตั้งชิ้นส่วนอื่น ๆ ร่วมในระบบด้วยดังแสดงในรูปภาพ 15 ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามลำดับดังนี้ สารป้อน (1) ซึ่งเป็นน้ำหมักจะถูกคูดจ่ายโดยปั๊ม (2) เข้าหอกลั่นโดยผ่านช่องนำเข้าซึ่งอยู่ตรงกลางของหอกลั่น (3) โดยผ่านวาล์วที่ช่องนำเข้า ซึ่งภายในหอกลั่นจะประกอบไปด้วยใบพัด (4) ที่เชื่อมติดกับแกนเหล็กกล้าไร้สนิมยาวเท่ากับความสูงของหอกลั่น ปลายด้านบนจะยึดติดกับมอเตอร์ (5) ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของการหมุนได้จากเครื่องควบคุม (6) ในระหว่างการกลั่น ไอของเอทานอลจะถูกพัดให้เข้าสู่ผนังด้านในของคอลัมน์ ทำให้เกิดการควบแน่นบางส่วน ในขณะเดียวกันไอร้อนที่ลอยมาจากด้านล่าง ก็จะทำให้เกิดการเดือดกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดสมดุลของระบบของเหลวและไอที่รวดเร็ว ส่งผลให้สารสามารถแยกออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ไอของเอทานอลบริสุทธิ์จะถูกแยกออกโดยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล (7) ก่อนที่จะผ่านเครื่องควบแน่น (8) กลายเป็นผลิตภัณฑ์เอทานอลที่เป็นของเหลว (9) ในขณะเดียวกันสารป้อนที่เข้าสู่หอกลั่น จะมีส่วนที่มีจุดเดือดสูงกว่า ที่ไม่กลายสภาพเป็นไอ แต่จะไหลลงตามผนังด้านในของหอกลั่นตกลงสู่ หม้อต้ม (10) ซึ่งจะเป็นส่วนที่ให้ความร้อนหลักของระบบ ด้วยการใช้แผ่นให้ความร้อน (11) ซึ่งภายในหม้อต้มจะมีการใช้มาตรวัดต่าง ๆ คือมาตรวัด

ความดัน (12) มาตรการอุณหภูมิ (13) และมาตรการระดับของของเหลวภายในหม้อต้ม (14) โดยที่ในระบบกลั่นนี้เป็นระบบต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการถ่ายของเหลวหนักออกไปจากระบบโดยผ่านทางวาล์วควบคุมการไหล (15) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (16) ก่อนที่ของเหลวหนัก (17) จะไหลออกจากระบบไป นอกเหนือจากการออกแบบให้มีการกลั่นอย่างต่อเนื่องแล้ว ยังมีการออกแบบให้มีการประหยัดพลังงานในการกลั่นและการควบแน่นอีกด้วย โดยทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกันระหว่างสารป้อน (1) กับ ไอที่ควบแน่นเป็นของเหลว (9) และของเหลวหนัก (17) ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ จะมีอุณหภูมิที่ต่ำลง ส่วน สารป้อน (1) ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำจะถูกให้ความร้อนเพิ่มขึ้นโดยผ่าน เครื่องควบแน่น (8) และ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (16) ตามลำดับ โดยในระบบนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ระบบทำความเย็นแต่อย่างใด ทำให้สามารถประหยัดพลังงานในการกลั่นลงได้เป็นอย่างมาก

2.2.2 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

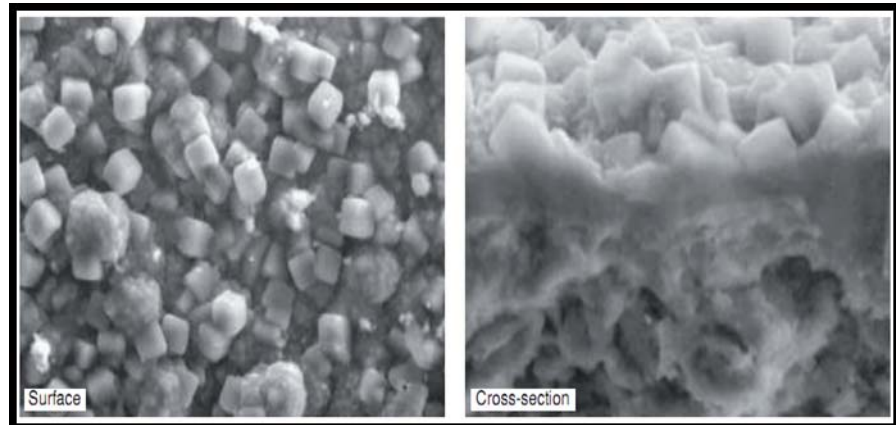
2.2.2.1 วัสดุเยื่อแผ่น

เยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN ชนิดที่ชอบน้ำ ซึ่งมีพื้นที่ผิว 0.0288 ตารางเมตร (0.16 เมตร \times 0.18 เมตร) หนา 2 ไมโครเมตร จากบริษัท Sulzer Chemtech ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์ แสดงดังรูปภาพ 16



รูปภาพ 16 รูป SEM ของเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN

เยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอแบบหลอด (NaA zeolite tubular membrane) ซึ่งมีพื้นที่ผิว 0.0352 ตารางเมตร จาก Mitsui Engineering & shipbuilding ประเทศญี่ปุ่น แสดงดังรูปภาพ 17



รูปภาพ 17 ภาพถ่ายเยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอแบบหลอดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



รูปภาพ 18 เยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอแบบหลอด

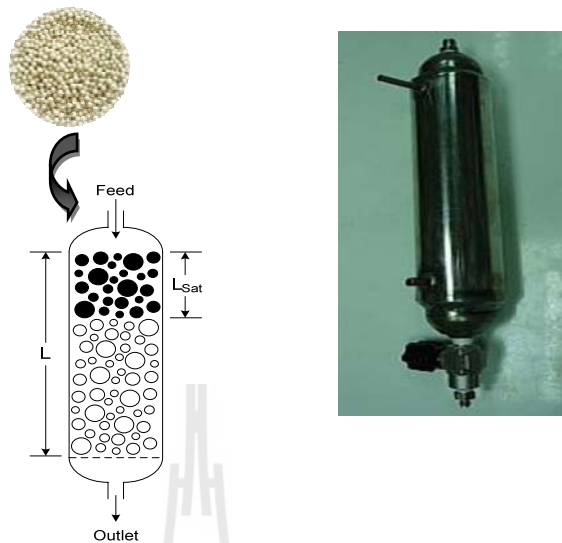
2.2.3 การดูดซับ (Pressure Swing Adsorption)

2.2.3.1 ตัวดูดความชื้น (molecular sieves) ขนาด 3-Å



รูปภาพ 19 ตัวดูดความชื้น

2.2.3.2 คอลัมน์การดูดซับเพื่อใช้ในการบรรจุเม็ดตัวดูดความชื้น มีปริมาตร 500 มิลลิลิตร



รูปภาพ 20 คอลัมน์การดูดซับ

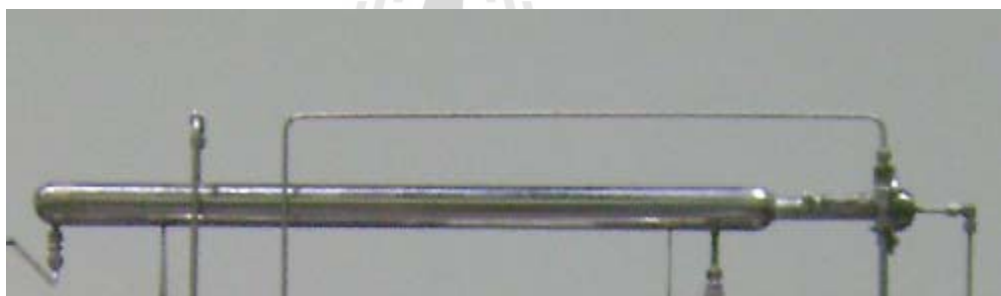
2.4 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น



รูปภาพ 21 โมดูลเยื่อแผ่นสำหรับใช้ในเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

การจัดอุปกรณ์การทดลองสำหรับเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นแสดงดังรูปภาพ 21 เยื่อแผ่นที่ใช้ในการทดลองเป็นเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN จากบริษัท Sulzer Chemtech, Switzerland ซึ่งมีพื้นที่ 0.0288 ตารางเมตร (0.16 เมตร × 0.18 เมตร) ทำการบรรจุเยื่อแผ่นลงในโมดูลเยื่อแผ่นโดยมีน้ำมันร้อนเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิอยู่รอบๆ โมดูล สารป้อนที่ใช้คือเอทานอล

ความเข้มข้นประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งถูกทำให้ร้อนในถังป้อนแบบอัดความดัน ก่อนที่ไอที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่าน โมดูลเยื่อแผ่น เมื่อไอผสมน้ำและเอทานอลเคลื่อนที่เข้าไปใน โมดูลเยื่อแผ่น จะถูกแยกออกเป็นสองสายคือ permeate ซึ่งเป็นด้านที่มีการใช้ปั๊มสุญญากาศดูด น้ำออกจากเยื่อแผ่น โดยที่ด้านของ permeate นี้จะมีน้ำอยู่เป็นปริมาณมากและมีเอทานอลปนมา ด้วย จึงจำเป็นต้องทำการจับไอของสารดังกล่าวด้วยการใช้ cold traps จุ่มในไนโตรเจนเหลว ส่วนสายที่สองจะเป็น retentate เคลื่อนที่ออกจากโมดูลเยื่อแผ่น ก่อนที่จะเข้าไปยังขวดเก็บ ตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างของ permeate ถูกเก็บทุกๆช่วงเวลาเพื่อนำไปคำนวณหาค่าฟลักซ์และ ความเข้มข้นของเอทานอล สำหรับการหาความเข้มข้นของน้ำที่เจือปนอยู่ในเอทานอลทั้งใน ด้าน สายป้อน สายretentate และสาย permeate หาโดยการให้ Karl Fischer's titration และเครื่องวัด ความหนาแน่น หลังจากทดลองเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN เสร็จ จึงทำการเปลี่ยนมา ทดลองเยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ (NaA zeolite tubular membrane) จาก Mitsui Engineering & shipbuilding ประเทศญี่ปุ่น

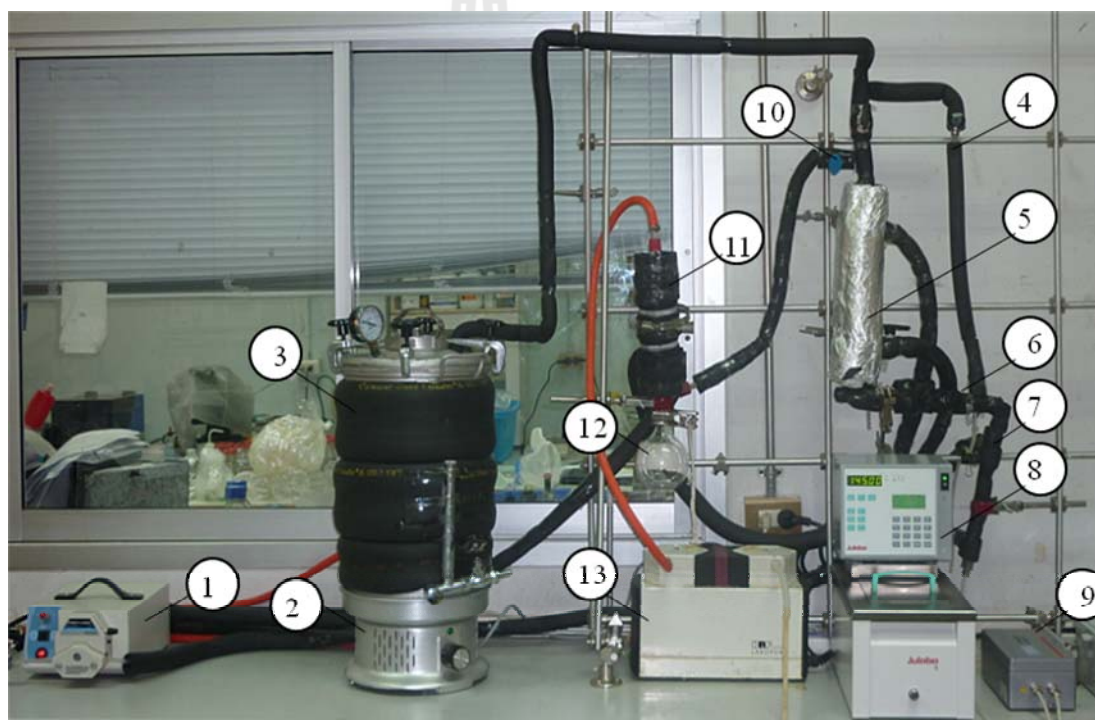


รูปภาพ 22 โมดูลเยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ (NaA zeolite tubular membrane) สำหรับ เทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

2.5 การดูดซับแบบสลับความดัน

ชุดการทดลองระบบการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิคการดูดซับแสดงดัง รูปภาพ 23 คอลัมน์การดูดซับทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมสูง 30 เซนติเมตรสองชั้น โดยชั้นนอก เป็นชั้นเพื่อบรรจุน้ำมันร้อนในการควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ ส่วนชั้นในเป็นชั้นที่บรรจุเม็ด โมเลกุลาร์ซีฟที่มีปริมาตร 500 มิลลิลิตร และสามารถบรรจุโมเลกุลาร์ซีฟได้ประมาณ 386.24 กรัม โดยที่โมเลกุลาร์ซีฟที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 3 อังสตรอม ของผสมน้ำและเอทานอลถูกเก็บไว้ ในถังแบบอัดความดัน และมีเครื่องให้ความร้อนที่ถังป้อนเป็นตัวควบคุมความดันไอของสารใน คอลัมน์ ส่วนอุณหภูมิของคอลัมน์ถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 145 องศาเซลเซียสด้วยน้ำมันซิลิโคน ที่ ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ค่าสูงๆเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการควบแน่นของสารผสมน้ำและเอทานอล

เมื่อของผสมน้ำและเอทานอลร้อน จากนั้นไอผสมจะเคลื่อนที่ไปที่คอลัมน์การดูดซับโดยตรง เนื่องจากขนาดของรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟมีขนาด 3 อังสตรอม ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่าโมเลกุลของน้ำ (2.8 อังสตรอม) แต่มีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของเอทานอล (4.4 อังสตรอม) ทำให้น้ำสามารถเข้าไปอยู่ในรูเหล่านี้ได้ จึงมีผลต่อการดูดซับของน้ำเป็นอย่างมาก ส่วนเอทานอลซึ่งมีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ผ่านโดยไม่ถูกดูด หลังจากนั้นเอทานอลจะเคลื่อนที่ผ่านเครื่องควบแน่นเป็นของเหลว และเข้าสู่ขวดเก็บตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างถูกเก็บทุกๆ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเอทานอล เมื่อคอลัมน์การดูดซับเกิดการอิ่มตัว จะต้องทำการ regenerate คอลัมน์ดังกล่าวโดยการทำให้เกิดสุญญากาศและมีการใช้ condenser เพื่อทำการควบแน่นไอของเอทานอลและน้ำที่คายออกมาจากตัวดูดซับ

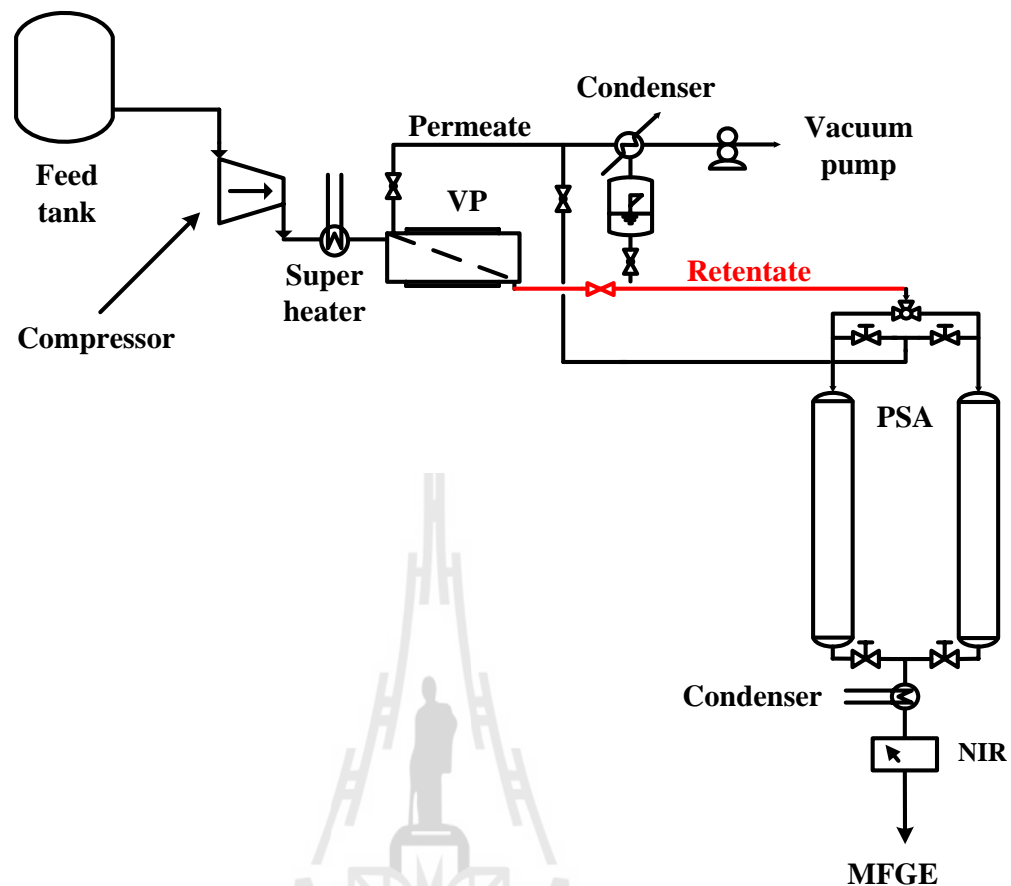


รูปภาพ 23 การจัดการทดลองระบบการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคการดูดซับ: 1, ป้อนน้ำเย็น; 2, เครื่องให้ความร้อน; 3, ถังป้อน; 4, สาย by pass; 5, คอลัมน์การดูดซับ; 6, วาล์วควบคุมอัตราไหลของผลิตภัณฑ์; 7, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน; 8, อ่างให้ความร้อน; 9, NIR; 10, วาล์วควบคุมการ regenerate; 11, เครื่องควบแน่น; 12, ขวดสำหรับใส่น้ำที่คายซับ; 13, ปั๊มสุญญากาศ

2.6 ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นร่วมกับการดูดซับ

การใช้เยื่อแผ่นชนิดที่ชอบน้ำสำหรับกระบวนการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้น เยื่อแผ่นชนิดนี้จะยอมให้น้ำผ่านได้ดีกว่าเอทานอล แต่ข้อเสียของระบบนี้คือจะต้องใช้พื้นที่ของเยื่อแผ่นมาก และประสิทธิภาพของการแยกจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำลดลงตามไปด้วย ยิ่งความเข้มข้นของน้ำมีน้อยเท่าใด การแยกก็จะยากขึ้น ส่วนระบบที่สาม คือ การใช้ตัวดูดความชื้น (molecular sieve) ซึ่งทำจากสารพวกซิลิกา มาบีบอัดและให้ความร้อนจะเกิดเป็นรูพรุนข้างใน มีขนาดเล็กประมาณ 3 อังสตรอมซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่าโมเลกุลของน้ำ (2.8 อังสตรอม) แต่มีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของเอทานอล (4.4 อังสตรอม) ทำให้น้ำสามารถเข้าไปอยู่ในรูเหล่านี้ได้ ในขณะที่เอทานอลจะมีขนาดใหญ่กว่า และจะออกจากระบบไป เนื่องจากว่าปริมาณของรูที่สามารถกักกันนี้ได้ นี้มีจำกัดดังนี้ ถ้าความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนมีมากเกินไป ก็จะทำให้เกิดจุดอิ่มตัวเร็ว ต้องทำการ regenerate บ่อยครั้ง ประสิทธิภาพการทำงานก็จะลดลง รูปภาพ 24 เป็นแผนผังกระบวนการ ซึ่งเป็นการรวมเอาข้อดีของทั้งสองระบบมารวมไว้เข้าด้วยกัน โดยการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นจะแยกน้ำส่วนใหญ่ออกมาในขั้นแรกก่อนที่น้ำส่วนที่เหลือจะถูกแยกออกโดยใช้การดูดซับต่อไป

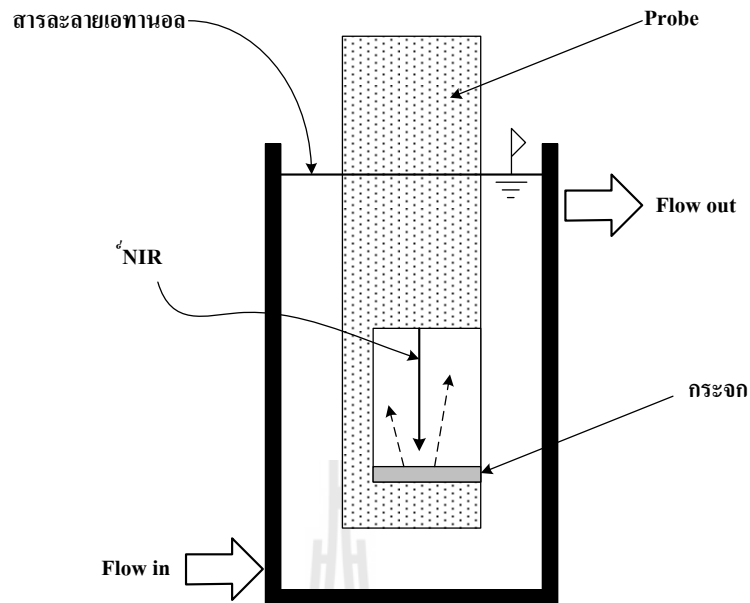
เยื่อแผ่นที่ใช้ในการทดลองเป็นเยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ (NaA zeolite tubular membrane) จาก Mitsui Engineering & shipbuilding ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีพื้นที่ 352 ตารางเซนติเมตร ทำการบรรจุเยื่อแผ่นลงใน โมดูลเยื่อแผ่น โดยมีน้ำมันร้อนเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิอยู่รอบๆ โมดูล สารป้อนที่ใช้คือเอทานอลความเข้มข้นประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งถูกทำให้ร้อนโดยใช้ปั๊มความดันสูงและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ก่อนที่ไอที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านโมดูลเยื่อแผ่น เมื่อไอผสมน้ำและเอทานอลเคลื่อนที่เข้าไปใน โมดูลเยื่อแผ่น จะถูกแยกออกเป็นสองสายคือ permeate ซึ่งเป็นด้านที่มีการใช้ปั๊มสุญญากาศดูดน้ำออกจากเยื่อแผ่น โดยที่ด้านของ permeate นี้จะมีน้ำอยู่เป็นปริมาณมากและมีเอทานอลปนมาด้วย จึงจำเป็นต้องทำการจับไอของสารดังกล่าวด้วยการทำให้เกิดสุญญากาศและมีการใช้เครื่องควบแน่น (condenser) ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ร่วมกัน ส่วนสายที่สองจะเป็น retentate (เส้นสีแดง) ซึ่งจะเคลื่อนที่ออกจากโมดูลเยื่อแผ่นไปที่คอลัมน์การดูดซับโดยตรง ในระบบการดูดซับที่ได้ทำขึ้นนี้ ได้ออกแบบให้มีคอลัมน์ 2 ตัว ทำงานแบบต่อเนื่อง กล่าวคือจะมีการเปลี่ยนทิศทางของสารป้อนไปยังอีกคอลัมน์หนึ่ง เมื่อคอลัมน์แรกเกิดการอิ่มตัว จากนั้นจะทำการ regenerate คอลัมน์ดังกล่าว โดยการทำให้เกิดสุญญากาศและมีการใช้ condenser ร่วมกันกับระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น ซึ่งเทคนิคนี้ได้มีการใช้อยู่แล้วในโรงงานขนาดใหญ่ เรียกว่า pressure swing adsorption (PSA) นั่นเอง



รูปภาพ 24 การจัดการทดลองระบบการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคผสมระหว่างการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ

2.7 NIR spectroscopy

รูปภาพ 25 แสดงการประกอบเครื่องมือ NIR spectroscopy (Brimrose Luminar 5030 NIR, USA) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผ่านกระบวนการแยกน้ำด้วยระบบผสมระหว่างการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ โดยในขั้นตอนแรก เป็นการประดิษฐ์ช่องสำหรับให้ตัวอย่างไหลผ่าน (flow cuvette cell) โดยจะต่อเข้ากับท่อของเครื่องควมแน่นในส่วนของเชื้อเพลิงเอทานอล (MFGE) ของรูปภาพ 24 โดยใช้หลอดไฟทั้งสแตน-ฮาโลเจนเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดสเปกตรัมของรังสีใกล้อินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1100-2300 นาโนเมตร ซึ่งจะบรรจุในท่อสแตนเลสที่มีลักษณะเป็นแท่ง (probe) จุ่มลงไปในช่วงสำหรับให้ตัวอย่างไหลผ่าน ตัวอย่างของสารละลายเอทานอลจะเข้าทางช่องด้านล่างของตัวเซลล์ (Flow in) และไหลออกจากช่องทางด้านบน (Flow out) ซึ่งในระหว่างที่ตัวอย่างไหลอยู่ภายในเซลล์นั้น หลอดไฟทั้งสแตน-ฮาโลเจนจะกำเนิดสเปกตรัมของรังสีใกล้อินฟราเรด (NIR) และจะสะท้อนแผ่นกระจกกลับไปที่อยู่รับสัญญาณ (detector) ก่อนที่จะมีการใช้ software สำหรับประมวลผลต่อไป



รูปภาพ 25 วิธีการวัดความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ได้จากกระบวนการแยกน้ำด้วย เครื่องสเปกโตรสโกปีของรังสีใกล้อินฟราเรดและลักษณะของหัว probe (ล่าง)

2.8 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

2.8.1 การหาปริมาณน้ำที่เจือปนในตัวอย่างโดยการใช้ Karl Fischer titration

การหาปริมาณน้ำที่เจือปนในตัวอย่างสามารถหาโดยใช้ชุดการวิเคราะห์ HYDRANAL® - Moisture Test Kit (Sigma-Aldrich) สำหรับหลักการของ Karl Fischer's titration (Schott, Germany) คือเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยสารละลายไอโอดีน (Hydranal[®]) ทำปฏิกิริยากับน้ำที่ปนเปื้อนในตัวอย่าง ซึ่งมีความเหมาะสมในการที่จะวัดปริมาณ

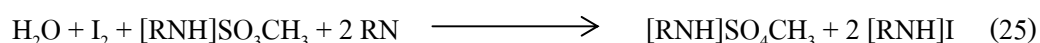
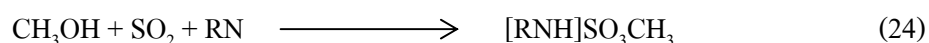
น้ำปนเปื้อนในตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ โดยเครื่องดังกล่าวจะใช้เป็นการอ้างอิง สำหรับการ ใช้ software ในการสร้างกราฟมาตรฐาน



รูปภาพ 26 อุปกรณ์สำหรับ Karl Fisher titration (Titro Line plus, Schott, Germany) แบบอัตโนมัติ

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 ก่อน โดยค่านี้หาได้จากสาร HYDRANAL®-Standard ซึ่งในสารดังกล่าวจะมีปริมาณน้ำเจือปนอยู่ 5 มิลลิกรัมน้ำต่อมิลลิลิตร 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

2.8.2 การหาประสิทธิภาพของเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำออกจากไอผสมนั้นสามารถแสดงได้ 2 อย่าง คือค่าฟลักซ์ (J) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$J = \frac{W}{At} \quad (26)$$

โดยที่ W หมายถึงน้ำหนักของเพอมีเอทที่ได้ (กิโลกรัม), t เป็นเวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง) และ A หมายถึงพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ใช้ (ตารางเมตร)

$$J_{water} = J_{total} * W_{p,water} = Q_{water} * (p_{water}^{feed} - p_{permeate}^{water}) \quad (27)$$

$$J_{\text{ethanol}} = J_{\text{total}} \cdot W_{\text{ethanol}} = Q_{\text{ethanol}} \times (p_{\text{ethanol}}^{\text{feed}} - p_{\text{ethanol}}^{\text{permeate}}) \quad (28)$$

โดยที่ Q หมายถึง permeance (โมลต่อตารางเมตร วินาที ปาสกาล)

$$\alpha = \frac{w_{\text{p,water}}/w_{\text{f,water}}}{w_{\text{p,ethanol}}/w_{\text{f,ethanol}}} \quad (29)$$

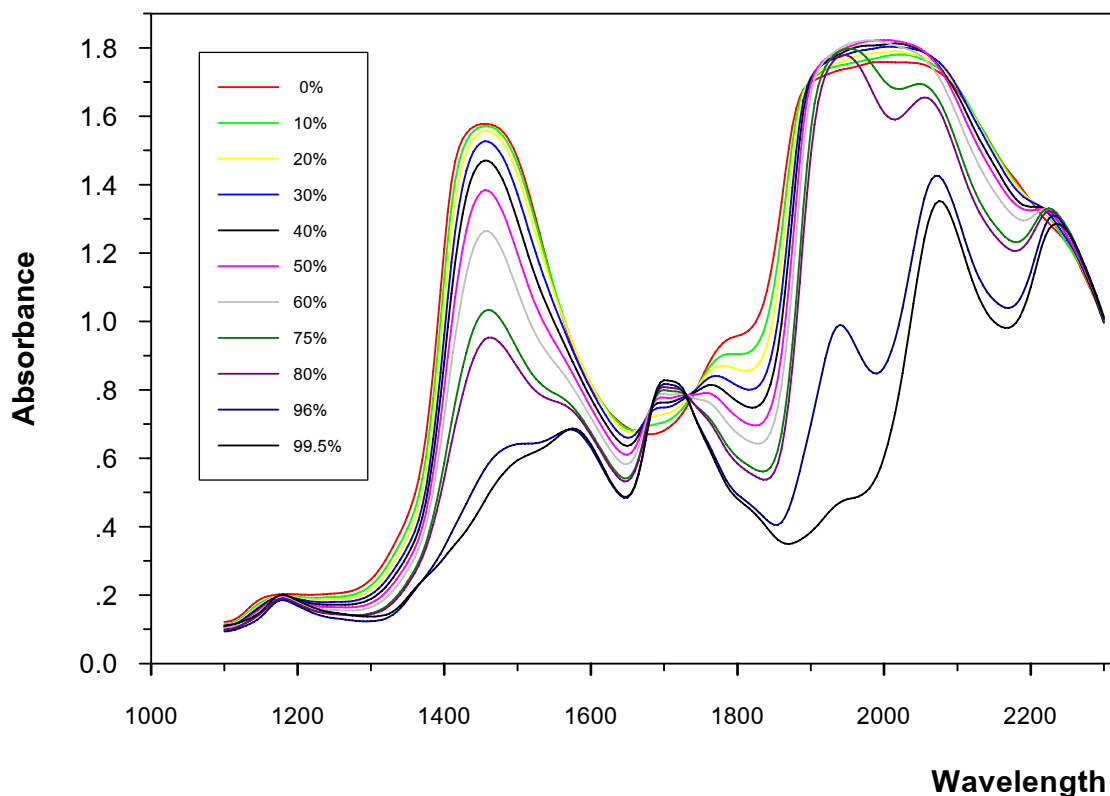
โดยที่ w_f และ w_p หมายถึงสัดส่วนน้ำหนักของน้ำและเอทานอลในส่วนของสารป้อน (f) และเพอมีเอทตามลำดับ (p) ตามลำดับ



บทที่ 3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์

3.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของ NIR และการกลั่นเอทานอลจากน้ำหมัก

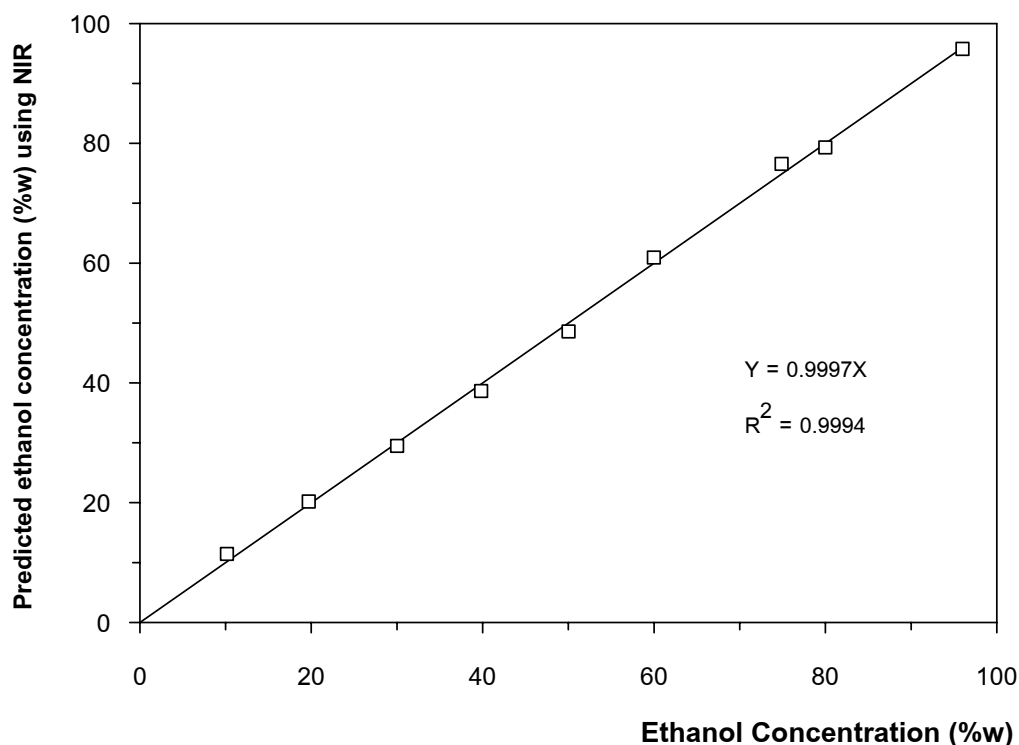
รูปภาพ 27 แสดงสเปกตรัมการดูดซับรังสีใกล้อินฟราเรด (NIR) ของสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ระหว่างร้อยละ 0-99.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการสแกนคลื่นในช่วงความถี่เริ่มต้นที่ 1100-2300 นาโนเมตร และมีช่วงของการทำการสแกนเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 นาโนเมตร เมื่อทำการทดสอบสแกนตัวอย่าง 3 ครั้ง ค่าเฉลี่ยของการดูดซับ (Absorbance) จะถูกบันทึกไว้โดยใช้ซอฟต์แวร์ที่มีชื่อว่า “The Unscrambler” ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ชัดว่าลักษณะของสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของสารละลายเอทานอลในช่วงคลื่นแสงดังกล่าวมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยจะมีค่าการดูดซับแตกต่างกัน 2 ช่วงคลื่นคือช่วง 1400-1500 นาโนเมตร และอีกช่วงหนึ่งคือช่วง 1900-2000 นาโนเมตรตามลำดับ สำหรับในช่วงคลื่นแรกนั้น ค่าการดูดซับจะลดลงตามลำดับ โดยน้ำบริสุทธิ์จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 1.60 ก่อนที่จะลดลงตามความเข้มข้นของเอทานอลที่เพิ่มขึ้น โดยเอทานอลไร้น้ำ (ความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก) จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำที่สุด คือประมาณ 0.52



รูปภาพ 27 สเปกตรัมการดูดซับรังสีใกล้อินฟราเรด (NIR) ของสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

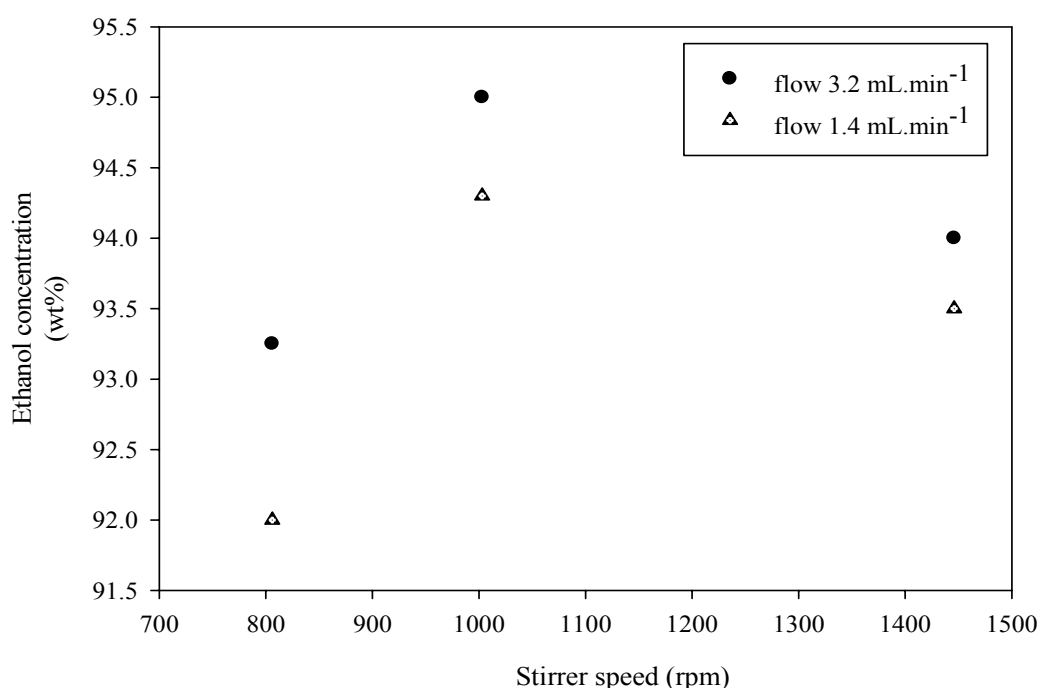
สำหรับช่วงคลื่นที่ 1900-2000 นาโนเมตรนั้น ค่าการดูดกลืนแสงจะไม่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของเอทานอลที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันสำหรับความเข้มข้นของเอทานอลที่ร้อยละ 0-80 โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 1.7-1.8 แต่ค่าการดูดกลืนแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้น โดยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 96 โดยน้ำหนักจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ 1.0 และจะมีค่าลดลงเหลือประมาณ 0.5 เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้ สเปกตรัมของการดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ โดยใช้ผลการทดสอบทางสถิติโดยการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นหรือที่เรียกว่า Partial Least Squares Regression (PLS) เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการมาตรฐาน (Calibration) และการทดสอบประสิทธิภาพของสมการ (full cross-validation) ให้ผลทางสถิติดังรูปภาพ 28 โดยทำการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างการใช้โปรแกรมทำนายความเข้มข้นของเอทานอลด้วยเครื่อง NIR (แกน y) และความเข้มข้นที่แท้จริงของเอทานอล (แกน x) ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่า ค่าการทำนายโดยใช้สมการถดถอยเชิงเส้นและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก โดยมีค่า standard deviation (R^2) สูงถึง 0.9994 และจากข้อมูลเหล่านี้ ทำให้สามารถสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้อย่างมากในการที่จะใช้ระบบ NIR ในการวัดและควบคุมคุณภาพของเอทานอลไร้น้ำที่ผลิตได้

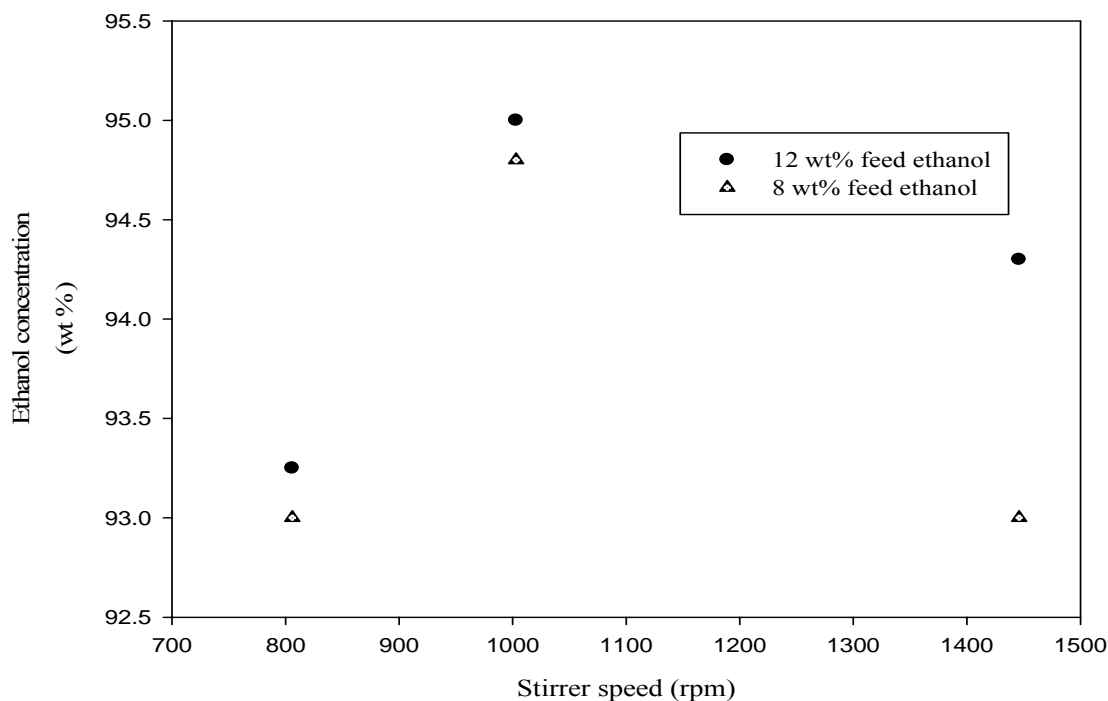


รูปภาพ 28 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR และความเข้มข้นของเอทานอลต่าง ๆ ซึ่งเส้น 45 องศาแสดงถึงค่าในอุดมคติเมื่อมีความแม่นยำ 100 เปอร์เซ็นต์

การทดลองถัดมาคือ การกลั่นเอทานอลออกจากสารละลายน้ำหมัก โดยมีการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ผลิตได้ ซึ่งปัจจัยแรกที่ทำการศึกษาคือผลของความเร็วยรอบของใบพัด (impeller speed) ที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้ โดยทำการทดสอบที่อัตราการป้อนน้ำหมักที่แตกต่างกัน 2 ค่าคือ 3.2 และ 1.4 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักที่ป้อนคือเอทานอลร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก รูปภาพ 29 แสดงผลการทดลองการกลั่นเอทานอลแบบต่อเนื่อง โดยจากการทดสอบประสิทธิภาพการกลั่นที่สภาวะต่าง ๆ ในเบื้องต้นพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อความเข้มข้นของเอทานอลในส่วนกลั่น (distillate) คือความเร็วยรอบของใบพัดและอัตราการป้อนน้ำหมัก ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 1000 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนน้ำหมักที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกลั่นดีขึ้นตามไปด้วย โดยความเข้มข้นสูงสุดของเอทานอลที่กลั่นได้จากการทดลองพบว่าสามารถกลั่นเอทานอลได้ความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าของความบริสุทธิ์สูงสุดที่สามารถกลั่นได้ ทั้งนี้เนื่องจากเอทานอลจะเกิดของผสมอะซีโอโทรป (azeotrope) กับน้ำที่ความเข้มข้นร้อยละ 95 นั้นเอง

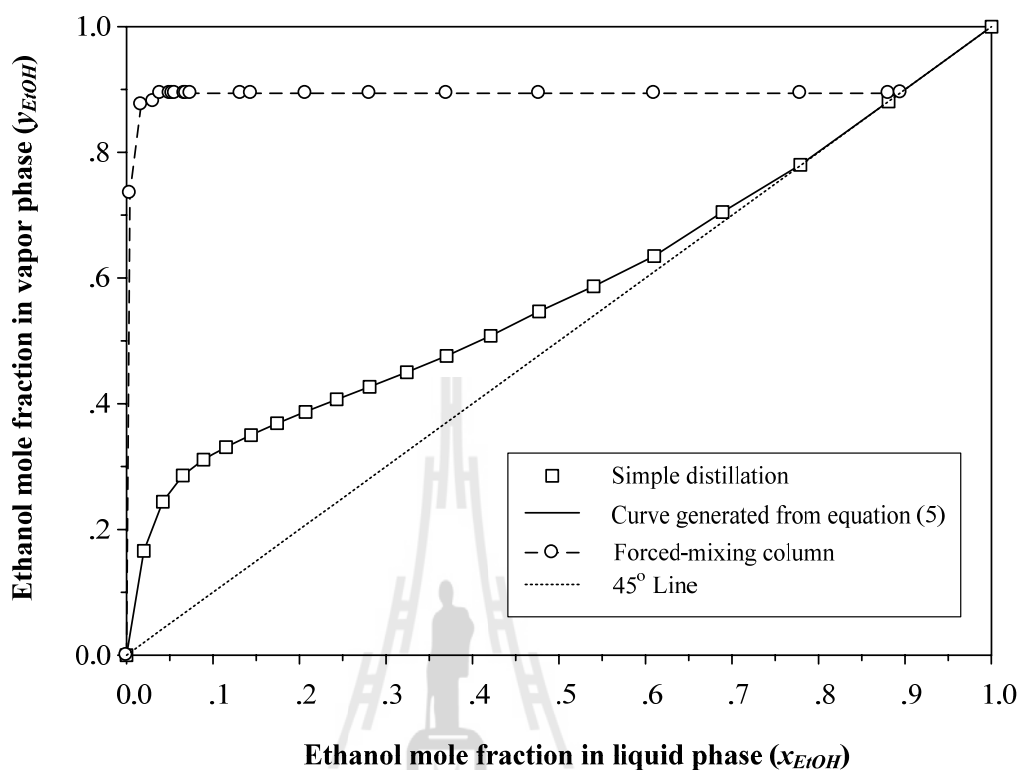


รูปภาพ 29 ความสัมพันธ์ของความเร็วยรอบของใบพัดที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้ ที่อัตราการป้อนที่แตกต่างกัน โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักที่ป้อนคือเอทานอลร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก



รูปภาพ 30 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของใบพัดที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักที่ป้อนที่แตกต่างกัน โดยอัตราการป้อนคือ 3.2 มิลลิลิตรต่อนาที

รูปภาพ 30 แสดงผลของความเร็วรอบของใบพัดที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้ ซึ่งทำการทดสอบที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักที่แตกต่างกัน โดยป้อนสารที่ความเร็ว 3.2 มิลลิลิตรต่อนาที จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าความเข้มข้นของเอทานอลในสายผลิตภัณฑ์ที่กลั่นได้ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของใบพัดและความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักที่ป้อน ซึ่งจากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้มีค่าความบริสุทธิ์สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักที่ป้อนจาก 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักไปเป็น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความเร็วรอบของใบพัดที่เหมาะสมที่สุดยังคงเป็น 1000 รอบต่อนาที ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถกลั่นเอทานอลได้ความบริสุทธิ์สูงสุดถึง 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปภาพทั้งสองปรากฏชัดว่าที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที สามารถผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด ดังนั้นจึงทำการทดลองสำหรับส่วนที่เหลือของการทดสอบที่ความเร็วรอบค่านี้



รูปภาพ 31 ผลการทดลองของสมดุลไอ-ของเหลวของผสมเอทานอล/น้ำ เมื่อเส้นตรง (-) คือเส้น 45° สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม (\square) คือข้อมูลการทดลองของการกลั่นแบบธรรมดาซึ่งคำนวณจากสมการที่ (1) และสัญลักษณ์วงกลม (\circ) คือข้อมูลที่ได้จากการทดลองของหอกลั่นในห้องปฏิบัติการ

นอกจากนี้ข้อมูล VLE ของเอทานอลและน้ำที่ทำการทดลองมีการแสดงเป็นแผนภาพ x - y ในรูปภาพ 31 โดยทั้งสองการทดลองได้ทำการกลั่นที่แตกต่างโดยใช้การกลั่นแบบง่ายและระบบการกลั่นแบบอาศัยหลักการผสมแบบบังคับ วัตถุประสงค์หลักในการตรวจสอบ VLE ของระบบอย่างแรก เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติของเครื่องกลั่นลำดับส่วนที่หัวหน้าโครงการวิจัยได้ประดิษฐ์ขึ้น โดยใช้แนวคิดแบบใหม่คืออาศัยหลักการการผสมแบบบังคับในการกลั่น และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกลั่นของทั้งสองระบบ ซึ่งผลการทดลองสำหรับการกลั่นอย่างง่ายเป็นไปตามสมการของ UNIQUAC และความสัมพันธ์ของ Antoine ในการเปรียบเทียบกับเครื่องกลั่นที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น พบว่าความเข้มข้นโดยโมลของเอทานอลในส่วนกลั่นเป็นความเข้มข้นของอะซิโโทโรปเมื่อทำการกลั่นที่ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักต่าง ๆ กัน

โดยสัดส่วนโมลของเอทานอลในเฟสของเหลว ($x_{ethanol}$) ที่ต่ำสุดที่สามารถกลั่นได้ของผสมอะซีโ
โทรปคือที่ 0.039 แม้ที่ $x_{ethanol}$ เท่ากับ 0.004 เศษส่วนโมลของเอทานอลในเฟสไอ ($y_{ethanol}$) ยังมีค่า
สูงถึง 0.735 ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 ความเข้มข้นของเอทานอลในส่วนกลั่น (y) เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของเอทานอล
ในสารละลาย (x) และค่า relative volatility (α).

อุณหภูมิของเหลว (°C)	x_{EtOH}	x_{water}	y_{EtOH}	y_{water}	α
100.0	0	1	0	1	-
99.0	0.004	0.996	0.735	0.265	690.62
98.3	0.017	0.983	0.876	0.124	408.50
97.5	0.031	0.969	0.881	0.119	231.41
95.3	0.039	0.961	0.894	0.106	207.82
94.6	0.05	0.95	0.894	0.106	160.25
94.0	0.053	0.947	0.894	0.106	150.70
93.2	0.056	0.944	0.894	0.106	142.17
91.6	0.067	0.933	0.894	0.106	117.45
90.1	0.069	0.931	0.894	0.106	113.80
88.4	0.074	0.926	0.894	0.106	105.54
85.3	0.132	0.868	0.894	0.106	55.46
84.8	0.144	0.856	0.894	0.106	50.14
83.7	0.207	0.793	0.894	0.106	32.31
82.7	0.281	0.719	0.894	0.106	21.58
81.0	0.37	0.63	0.894	0.106	14.36
80.2	0.477	0.523	0.894	0.106	9.25
79.1	0.61	0.39	0.894	0.106	5.39
78.1	0.779	0.221	0.894	0.106	2.39
78.1	0.881	0.119	0.894	0.106	1.14

โดยสรุปแล้ว ผลการทดลองที่ดีของระบบการกลั่นแบบนี้ (จากรูปภาพ 15) สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแนวความคิดของการกลั่นแบบใหม่เพื่อนำมาแทนที่การกลั่นแบบ fractionating ที่มีอยู่ในระดับอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งคอลัมน์ที่ใช้จะมีมากกว่า 70 ชั้นสำหรับการกลั่นเอทานอลจากน้ำหมักให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการลงทุนสูงและพลังงานที่ใช้สำหรับการกลั่นก็สูงเช่นกัน ซึ่งเป็นความจริงที่การกลั่นเอทานอลแบบนี้ทำได้เพียงในระดับอุตสาหกรรมใหญ่เท่านั้น การผลิตเอทานอลเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระดับขนาดกลางและเล็กทำได้ยากมาก การเปลี่ยนแปลงของ VLE สำหรับการกลั่นโดยอาศัยหลักการผสมแบบบังคับส่งผลให้วัฏจักรการกลายเป็นไอและการควบแน่นของผสมมีมากขึ้น (vaporization-condensation cycle) ผลกระทบนี้ยังส่งผลทำให้การเกิดเป็นไอเพิ่มขึ้นภายในคอลัมน์ ระบบการกลั่นนี้ยังได้รับการออกแบบสำหรับกลั่นแบบต่อเนื่อง ความต้องการของพลังงานที่ใช้คาดว่าจะต่ำสุดเพราะสารด้านป้อนถูกใช้เป็นสารหล่อเย็นสำหรับ stillage และด้านผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ได้จากการกลั่น (distillate) นอกจากนี้ของผสมด้านสายป้อนยังถูกอุ่นก่อนเกือบจะถึงจุดเดือดของมันก่อนที่จะเข้าคอลัมน์ ดังนั้นความร้อนที่ต้องใช้ในระบบจึงลดลงอย่างมาก ซึ่งเอทานอลที่กลั่นได้นี้ จะถูกนำไปทดสอบการแยกน้ำด้วยระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับต่อไป

จากผลการทดลองการกลั่นสามารถบ่งบอกได้ว่า ประสิทธิภาพการกลั่นแบบใหม่นี้จะให้ความเข้มข้นของเอทานอลในส่วนกลั่นที่สูงมาก และสามารถกลั่นเอทานอลออกจากน้ำหมักได้ทั้งหมด ซึ่งระบบการกลั่นแบบนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การผลิตเอทานอล โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเข้มข้นสุดท้ายของเอทานอลในน้ำหมักมีค่าค่อนข้างต่ำ ยกตัวอย่างเช่นการหมักเอทานอลจากวัตถุดิบที่เป็นเซลลูโลส เป็นต้น ซึ่งความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักมักจะต่ำกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.2 การแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น

3.2.1 เยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN ชนิดขอบน้ำ

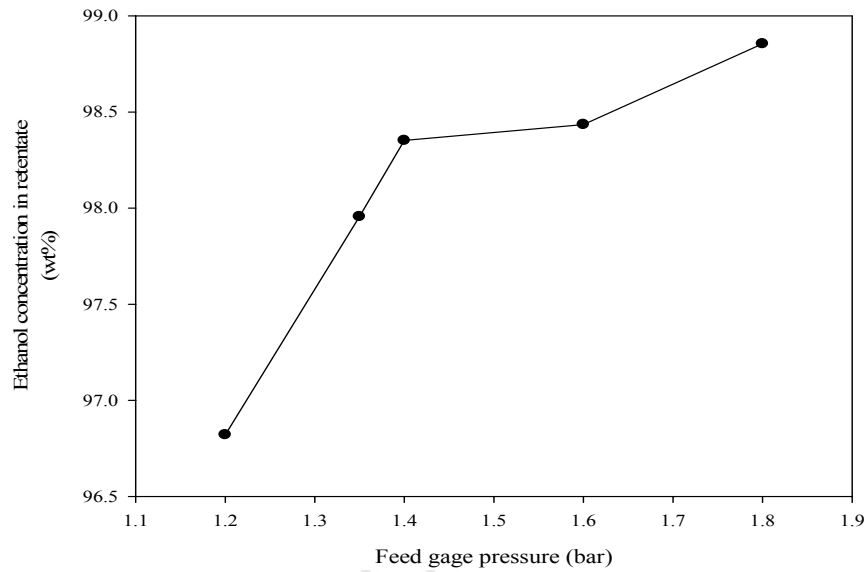
สำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยเทคนิคการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นชนิดแรกที่ใช้ในการทดลองเป็นเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN จากบริษัท Sulzer Chemtech, Switzerland ซึ่งมีพื้นที่ 0.0288 ตารางเมตร (0.16 เมตร × 0.18 เมตร) โดยทำการทดลองที่ความดันระหว่าง 1.2 ถึง 1.8 บาร์ อุณหภูมิโมดูลระหว่าง 80 ถึง 120 องศาเซลเซียส ที่ไม่สามารถทำการทดลองที่อุณหภูมิสูง

กว่านี้เนื่องจากอุณหภูมินี้เป็นค่าสูงที่สุดที่ทางผู้ผลิตเยื่อแผ่นได้แนะนำไว้ ส่วนอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ด้าน retentate ถูกควบคุมด้วย back pressure valve ด้วยอัตราการไหลระหว่าง 0.875 ถึง 3.025 มิลลิลิตรต่อนาที การแยกน้ำออกจากเอทานอลเป็นผลมาจากการความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ระหว่างน้ำและเอทานอลภายในโครงสร้างการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นเยื่อแผ่นนี้ ส่วนอัตราการถ่ายเทมวลของน้ำผ่านเยื่อแผ่นนั้น จะขึ้นอยู่กับ การทดลองที่สภาวะต่างๆ เช่น ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อน อัตราการไหลด้าน retentate ความดันด้านสายป้อน และอุณหภูมิของโมดูล เป็นต้น

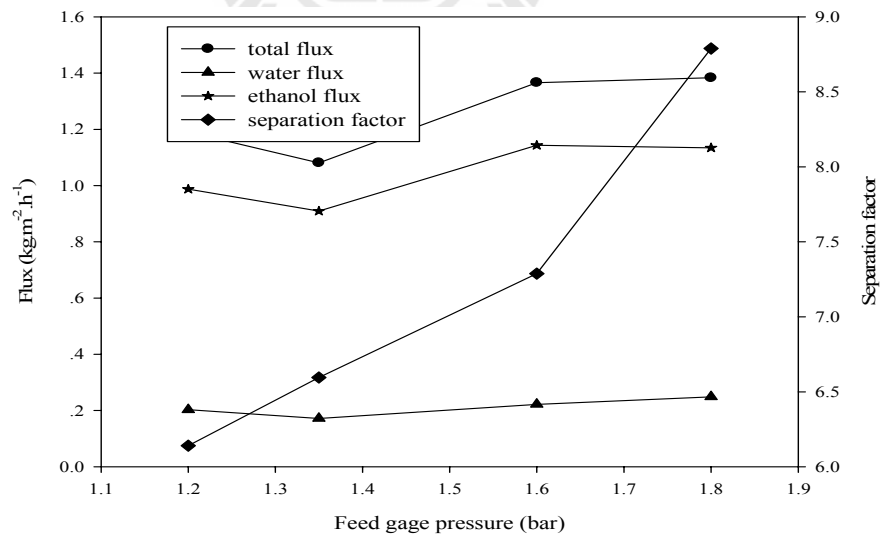
3.2.1.1 ผลของความดันด้านสายป้อน

ผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อความเข้มข้นของเอทานอลในด้าน retentate แสดงดังรูปภาพ 32 ซึ่งจากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเอทานอลในด้าน retentate ขึ้นอยู่กับความดันด้านสายป้อนเป็นสำคัญ โดยที่ความดันด้านสายป้อนที่สูงกว่า จะสามารถผลิตเอทานอลทางด้านสาย retentate ที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า โดยที่ความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 96.82 โดยน้ำหนัก ถึงร้อยละ 98.86 โดยน้ำหนัก เมื่อความดันด้านสายป้อนเพิ่มขึ้นจาก 1.2 บาร์ จนถึง 1.8 บาร์ ตามลำดับ

สำหรับการทดลองนี้ยังได้ศึกษาผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อประสิทธิภาพของการแยกในเทอมของค่าฟลักซ์ (J) และค่าสัมประสิทธิ์การแยก (α) ซึ่งรูปภาพ 33 แสดงถึงผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวม ค่าฟลักซ์ของน้ำ ค่าฟลักซ์ของเอทานอลและค่าสัมประสิทธิ์การแยก จากการทดลองสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูงขึ้นเมื่อความดันด้านสายป้อนสูงขึ้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแยกเพิ่มขึ้นจาก 6.14 ถึง 8.79 เมื่อเพิ่มความดันด้านสายป้อนจาก 1.2 บาร์ จนถึง 1.8 บาร์ ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่าฟลักซ์โดยรวม (total flux) ค่าฟลักซ์ของน้ำ (water flux) และค่าฟลักซ์ของเอทานอล (ethanol flux) มีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนเมื่อเพิ่มความดันด้านสายป้อน และพบว่าค่า ฟลักซ์รวมเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจาก 1.21 ถึง 1.40 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ค่า ฟลักซ์ของเอทานอลจากการทดลองอยู่คงที่ ที่ประมาณ 0.2 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง



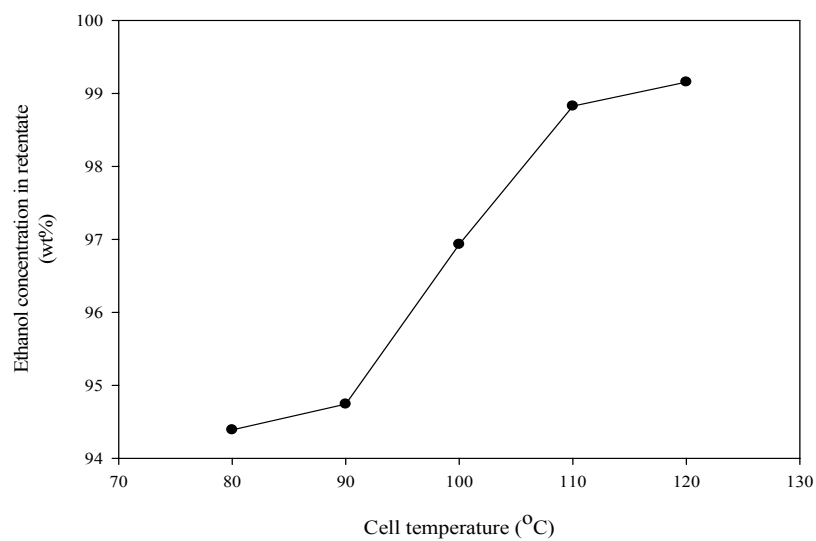
รูปภาพ 32 ความเข้มข้นของเอทานอลด้าน retentate จากการแยกน้ำออกจากเอทานอลที่ความดันด้านสายป้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหล 1.85 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิโมดูล 120 องศาเซลเซียส



รูปภาพ 33 ผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ (J) และค่าสัมประสิทธิ์การแยก (α) ที่ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลด้าน retentate 1.85 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิโมดูล 120 องศาเซลเซียส

3.2.1.2 ผลของอุณหภูมิของโมคูล

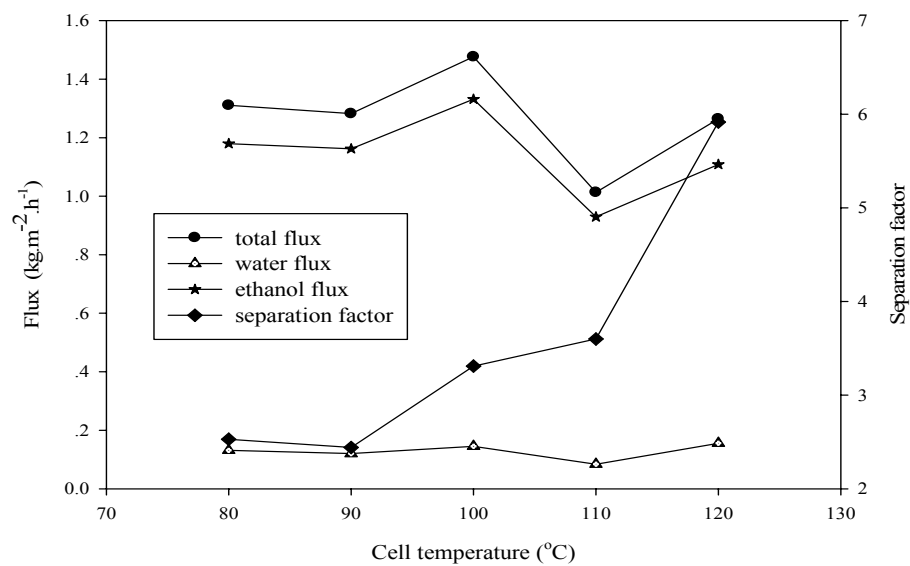
ผลของอุณหภูมิของ โมคูลที่มีต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลด้านสาย retentate แสดงดังรูปภาพ 34 จากการทดลองพบว่าค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลในสาย reter 70 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ โมคูล กล่าวคือ ที่อุณหภูมิสูงๆสามารถผลิตเอทานอลด้านสาย retentate ที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น



รูปภาพ 34 ผลของอุณหภูมิของ โมคูลที่มีต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์เอทานอลในสายด้าน retentate ที่ความดันด้านสายป้อน 1.4 บาร์ ความดันด้านสุญญากาศ 6 มิลลิบาร์ ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหล 0.95 มิลลิลิตรต่อนาที

รูปภาพ 35 อธิบายถึงประสิทธิภาพการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น โดยการซึมผ่านของไอผ่านเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN ที่อุณหภูมิต่างๆกัน ซึ่งทำการทดลองที่ความดันด้านสายป้อน 1.4 บาร์ ความดันด้านสุญญากาศ 6 มิลลิบาร์ ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหล 0.95 มิลลิลิตรต่อนาที โดยปกติแล้วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแพร่กระจายของโมเลกุลที่สามารถซึมผ่านได้จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การละลายของไอในเยื่อแผ่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (C.K. Yeom and K.-H., Lee, 1997) สำหรับสัมประสิทธิ์การแยก พบว่าค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิโมคูลจาก 80-100 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 110 องศาเซลเซียส ไปเป็น 120 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแยก

เปลี่ยนแปลงอย่างมาก อาจอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิของโมดูลสูงๆสามารถผลิตความดันไอเอมีตัวสูง ซึ่งจะช่วยให้การละลายของไอด้านสายป้อนในเยื่อแผ่น และทำให้ความแตกต่างของความหนาแน่นของไอเอมีตัวหรือความต้านทานของพื้นผิวลดลงเพื่อเพิ่มค่าฟลักซ์รวมที่ข้ามพื้นผิวระหว่างด้านสายป้อนและเยื่อแผ่น นอกจากนี้อุณหภูมิโมดูลสูงๆยังอาจมีปัจจัยบวกสำหรับการซึมผ่านของไอเอทานอลผสมน้ำ (C.K. Yeom and K.-H.,Lee, 1997)

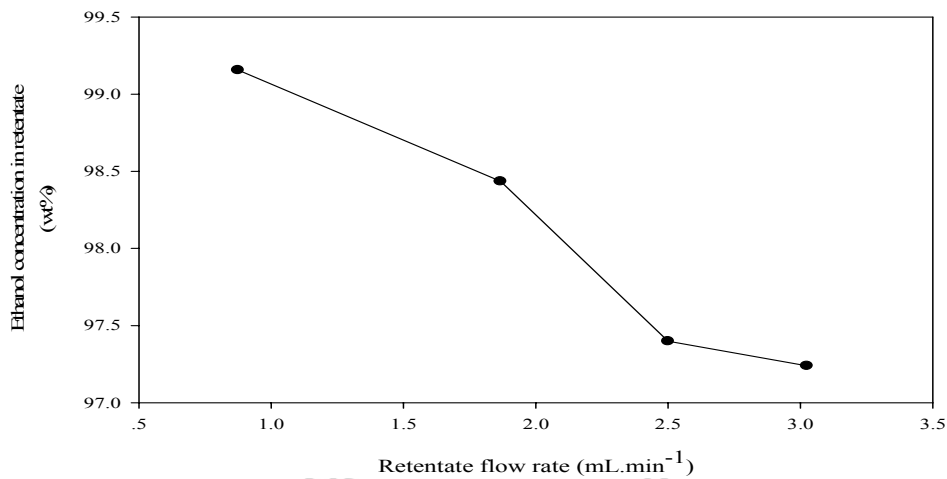


รูปภาพ 35 ผลของอุณหภูมิของโมดูลที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแยก ที่ความดันด้านสายป้อน 1.4 บาร์ ความดันด้านสุญญากาศ 6 มิลลิบาร์ ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหล 0.95 มิลลิลิตรต่อนาที

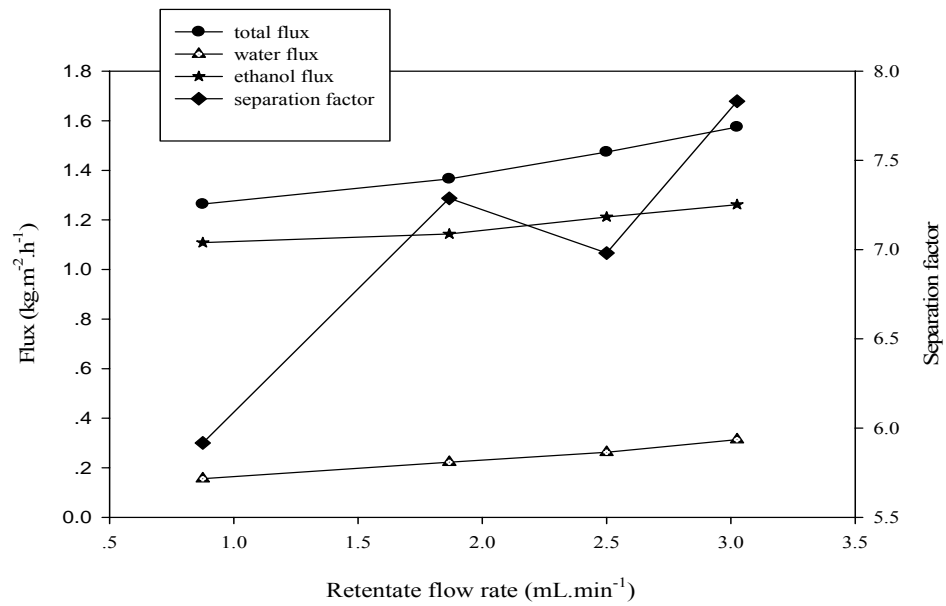
3.2.1.3 ผลของอัตราการไหลด้าน retentate

ผลของอัตราการไหลด้าน retentates ที่มีต่อค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลด้าน retentate แสดงดังรูปภาพ 36 จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเอทานอลขึ้นอยู่กับอัตราการไหลด้าน retentate แสดงให้เห็นว่าที่การทดลองอัตราการไหลด้าน retentate ต่ำๆ อาจจะสามารถผลิตเอทานอลในสาย retentate ที่บริสุทธิ์สูงกว่า ด้วยเหตุผลนี้จึงต้องมีการเอาไอน้ำออกจากเส้นทางการไหลอย่างต่อเนื่อง

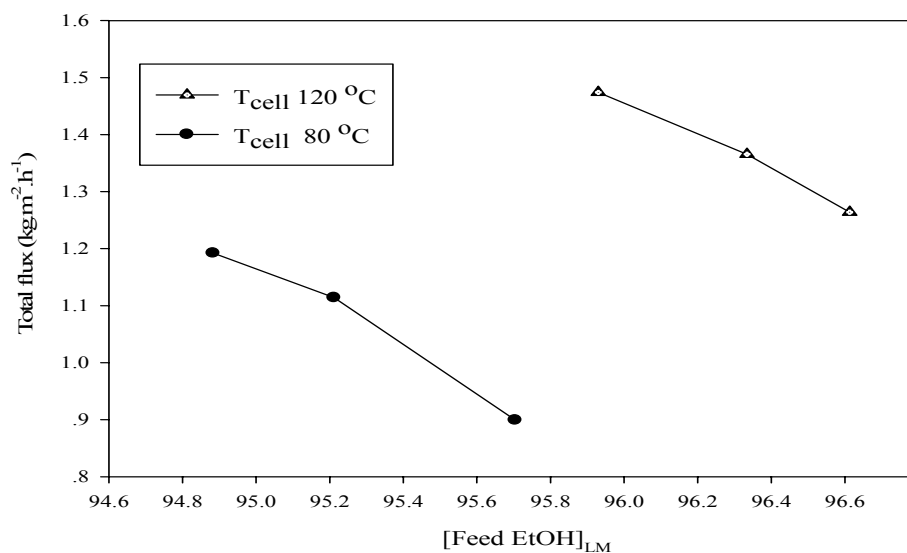
รูปภาพ 37 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลด้าน retentate ที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแยก พบว่าค่าฟลักซ์รวม ฟลักซ์เอทานอล และฟลักซ์ของน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลด้าน retentate สูงขึ้น ฟลักซ์รวมเพิ่มขึ้นจาก 1.26 ถึง 1.57 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงเมื่ออัตราการไหลด้าน retentate เพิ่มขึ้นจาก 0.88 จนถึง 3.03 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับเอทานอลและน้ำก็แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าฟลักซ์น้ำและฟลักซ์ของเอทานอลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยกับการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลด้าน retentate ส่วนสัมประสิทธิ์การแยกก็เห็นได้ชัดว่าค่าสัมประสิทธิ์การแยกเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลด้าน retentate สูงขึ้น



รูปภาพ 36 ผลของอัตราการไหลด้าน retentates ที่มีต่อค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลด้าน retentate ที่ความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิของโมดูล 120 องศาเซลเซียส



รูปภาพ 37 ผลของอัตราการไหลด้าน retentates ที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแยกที่ความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิของโมดูล 120 องศาเซลเซียส



รูปภาพ 38 ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวมที่ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์

ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนเริ่มต้นที่อุณหภูมิโมดูลต่างๆต่อค่าฟลักซ์โดยรวม ซึ่งได้แสดงดังรูปภาพ 38 ผลการทดลองพบว่าฟลักซ์รวมเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของน้ำที่ป้อนเปื้อนในสายป้อนและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโมดูล ผลของความเข้มข้นโพลาริไซในการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นได้รับการตรวจสอบในรายละเอียดแล้ว และมีการตรวจพบว่ามีค่าสำคัญเล็กน้อยสำหรับเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN เนื่องจากการแพร่ในระยะที่เป็นไอมีมากกว่าว่าในสถานะของเหลวประมาณ 3-5 เท่า กล่าวคือความเข้มข้นโพลาริไซในการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นโดยทั่วไปมีขนาดเล็กกว่าใน pervaporation แต่ความหนาแน่นของไอจะมีขนาดเล็กกว่าของเหลวประมาณ 3 เท่า ทำให้เกิดการเพิ่มการขนส่งจำนวนมากไปยังขอบด้านสายป้อนของเยื่อแผ่นที่เกิดจากการแพร่ที่ขนาดใหญ่มากกว่าได้รับการชดเชยบางส่วน อย่างไรก็ตามการแพร่ขนาดใหญ่มากกว่า ในการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นจะเกิดการแพร่หลังการผสมและผลกระทบของความเข้มข้นโพลาริไซในการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นไม่ได้มีนัยสำคัญเหมือนในกระบวนการ pervaporation (R. Rautenbach and F.P. Helmus, 1994) เป็นผลให้พฤติกรรมการแยกความแตกต่างของ เยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN ในการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นไม่สามารถที่เกิดจากความเข้มข้นของโพลาริไซ (M.S. Schehlmann *et al.*, 1995)

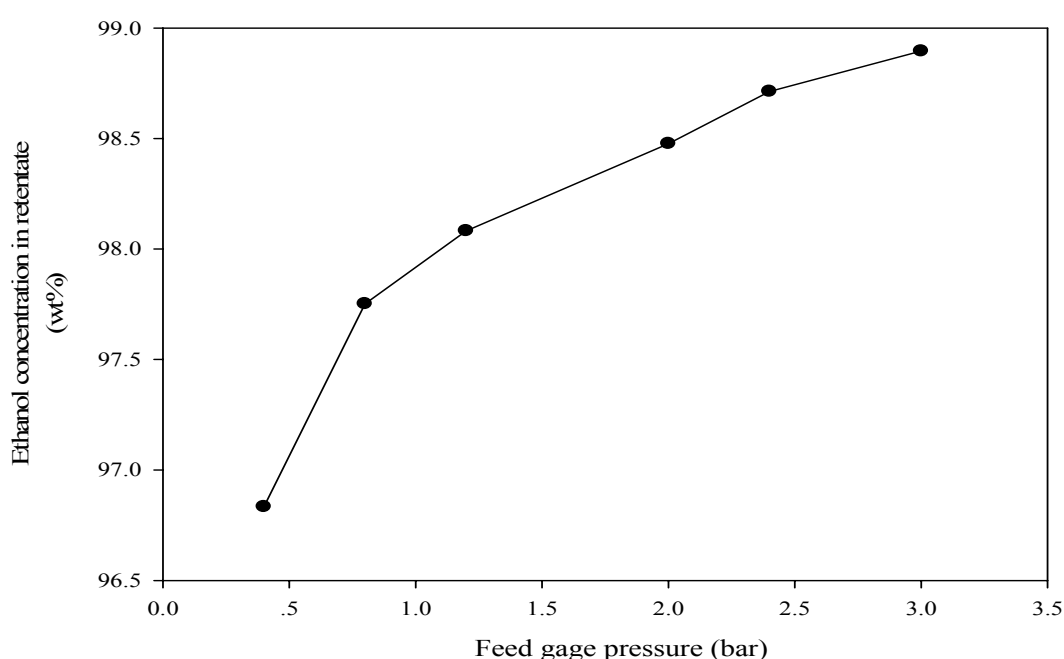
โดยสรุปความบริสุทธิ์ของเอทานอลความเข้มข้นสูงสุดร้อยละ 99.16 โดยน้ำหนักได้จากการทดลองในครั้งนี้สามารถผลิตได้ที่สภาวะการทดลองตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้คือ อุณหภูมิโมดูล 120 องศาเซลเซียส อัตราการไหลด้าน retentate 0.875 มิลลิลิตรต่ออนาที และความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่านี้ได้ เนื่องจากการแยกน้ำออกจากเอทานอลทำได้ยากมากเมื่อต้องการความเข้มข้นของเอทานอลสูงๆ ในขณะที่แรงขับเคลื่อนในการแยกมีต่ำ

3.2.2 เยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอ

เพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบ ได้ทำการศึกษาการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นโดยการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอ ซึ่งมีพื้นที่ผิว 0.0352 ตารางเมตร นำเข้าจาก Mitsui Engineering & shipbuilding ประเทศญี่ปุ่น การศึกษาประสิทธิภาพของการทำงานของระบบทำการทดลองที่ความดัน 0.4 ถึง 3 บาร์ และอุณหภูมิของโมดูลที่ 110 ถึง 145 องศาเซลเซียส เนื่องจากเยื่อแผ่นทำมาจากวัสดุเซรามิก ซึ่งคุณสมบัติของมันจึงมีความเสถียรทางกลและทนความร้อนได้ดีกว่าเยื่อแผ่นประเภทพอลิเมอร์ อัตราการไหลของสารด้าน retentates หรือด้านผลิตภัณฑ์

ถูกควบคุมโดยวาล์วแรงดันกลับซึ่งมีอัตราการไหลระหว่าง 5.17 ถึง 21.83 มิลลิลิตรต่อนาที การแยกน้ำและเอทานอลเป็นไปตามคุณสมบัติของการแยกขนาดของโมเลกุลซีโอไลต์ และลักษณะการถ่ายโอนมวลขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานที่สภาวะต่างๆ

3.2.2.1 ผลของความดันด้านสายป้อน

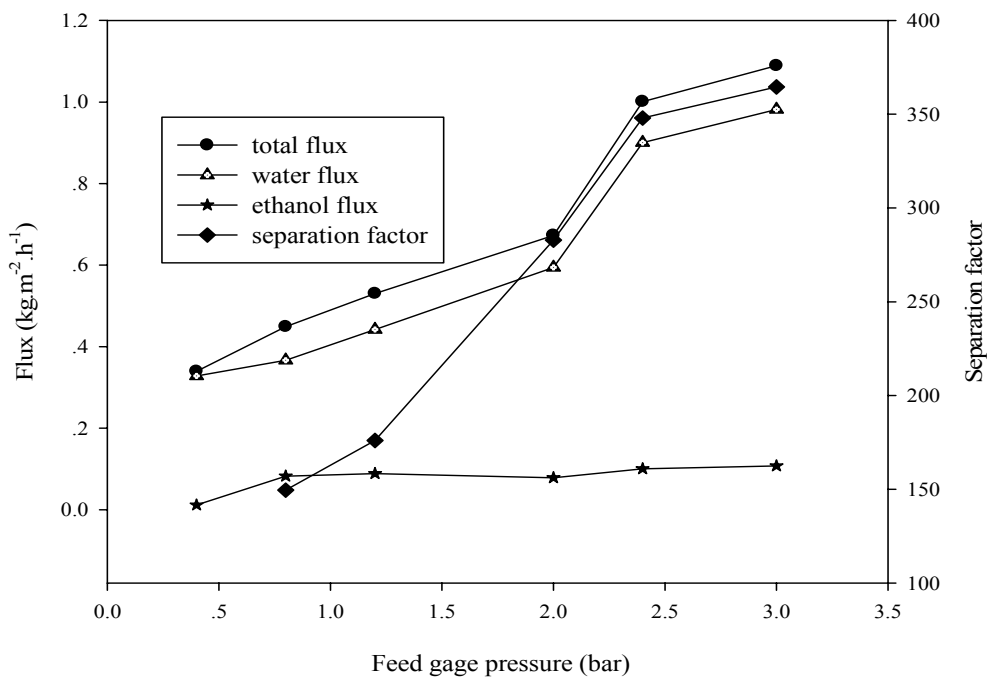


รูปภาพ 39 ผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลด้าน retentate ที่ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลด้าน retentate 7.8 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิของโมดูล 145 องศาเซลเซียส

อิทธิพลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลด้าน retentate โดยการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอ แสดงดัง

รูปภาพ 39 พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลยังขึ้นอยู่กับความดันด้านสายป้อน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าที่ความดันด้านสายป้อนที่สูงขึ้นสามารถผลิตเอทานอลในสาย retentate ที่มีคุณภาพ ความเข้มข้นหรือความบริสุทธิ์สูงขึ้น ความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 96.83 ถึงร้อยละ 98.90 โดยน้ำหนัก เมื่อความดันด้านสายป้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.4 ถึง 3 บาร์ โดยทั่วไปพบว่าเยื่อแผ่นที่

ทำมาจากเซรามิกมีประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากเอทานอลได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นที่ทำมาจากพอลิเมอร์ ฟลักซ์ของน้ำและสัมประสิทธิ์การแยกค่อนข้างสูงเนื่องจากลักษณะการแยกขนาดโมเลกุลของซีโโอลิท์ที่รูพรุน และ ความดันที่ใช้ในการทดลองก็สามารถที่จะดำเนินการได้ถึง 3.0 บาร์ ดังนั้นเยื่อแผ่นที่ทำมาจากเซรามิกจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับกระบวนการแยกน้ำออกจากเอทานอล

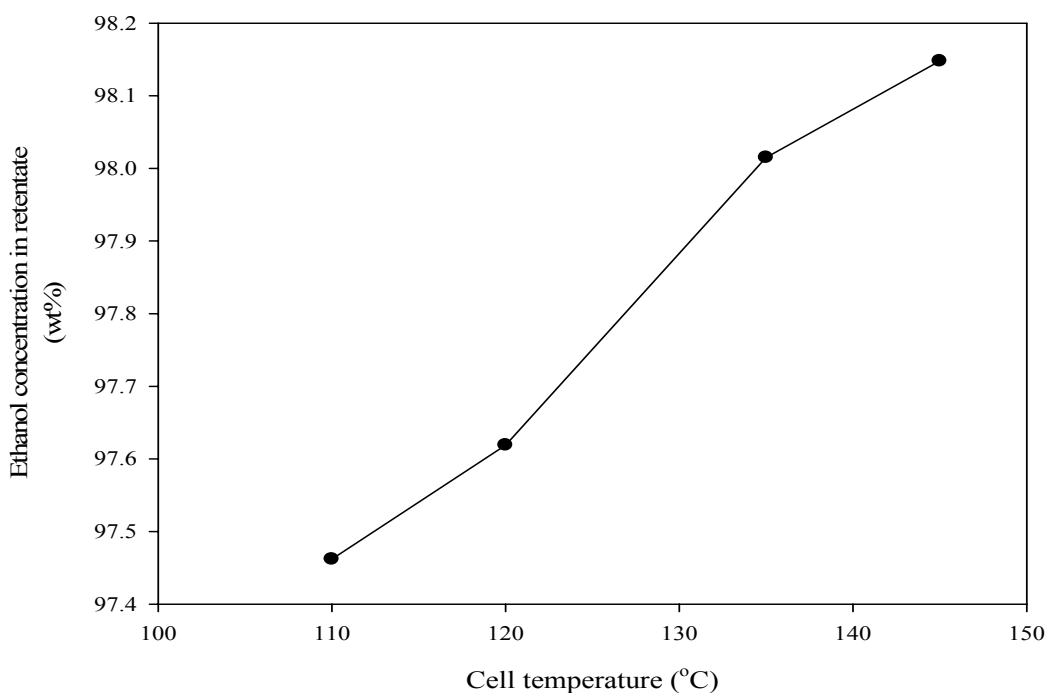


รูปภาพ 40 ผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแยกที่ ความดันสูง 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลด้าน retentate 7.8 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิของโมดูล 145 องศาเซลเซียส

รูปภาพ 40 แสดงผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแยก โดยการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นซีโโอลิท์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอ จากการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์รวมและฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้นกับความดันที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเยื่อแผ่นจะทำงานได้ดีขึ้นที่ความดันที่สูงกว่า นอกจากนี้ค่าฟลักซ์ของเอทานอลยังคงใกล้เคียงกับศูนย์ตลอดการทดสอบ การศึกษาสัมประสิทธิ์การแยกก็เห็นได้ชัดว่าสัมประสิทธิ์การแยกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความดัน

สายป้อน สัมประสิทธิ์การแยกเพิ่มขึ้น จาก 149.55 ถึง 364.55 เมื่อความดันด้านสายป้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.8 ถึง 3.0 บาร์

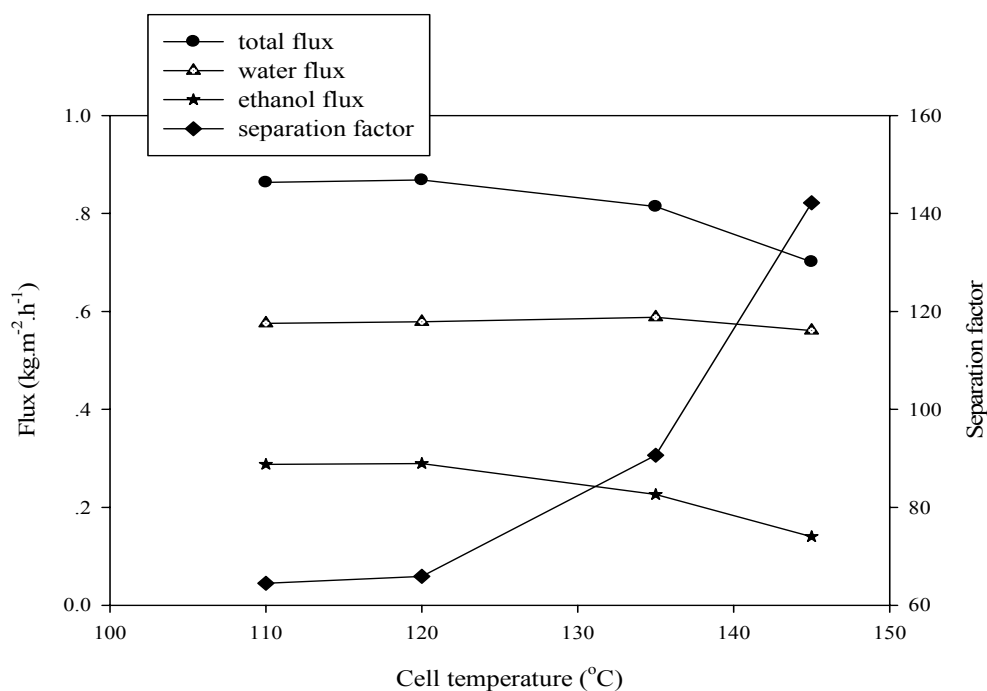
3.2.2.2 ผลของอุณหภูมิของโมดูล



รูปภาพ 41 ผลของอุณหภูมิของโมดูลที่มีต่อค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลด้าน retentate ที่ความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอัตราการไหลด้าน retentate 8.77 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลของอุณหภูมิของโมดูลที่มีต่อค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลด้าน retentate โดยการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเมแสดงดังรูปภาพ 41 ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเอทานอลได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของโมดูล แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิโมดูลที่สูงกว่าสามารถผลิตเอทานอลในสาย retentate ที่มีคุณภาพความเข้มข้นที่สูงกว่า ซึ่งจากการ

ทดลองความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 97.46 ถึงร้อยละ 98.15 โดยน้ำหนัก เมื่ออุณหภูมิของโมดูลเพิ่มขึ้นจาก 110 ถึง 145 องศาเซลเซียส



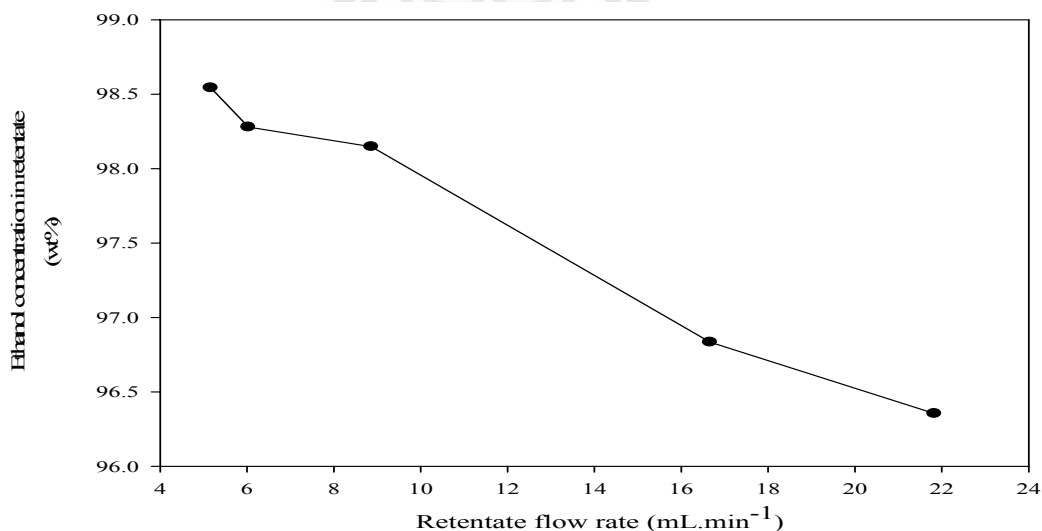
รูปภาพ 42 ผลของอุณหภูมิของโมดูลที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแยกที่ ความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอัตราการไหลด้าน retentate 8.77 มิลลิลิตรต่อนาที

การศึกษาประสิทธิภาพของการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นในเทอมของฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การแยกผ่านเยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอแบบสังเคราะห์ที่มีชั้นรองรับแบบไม่สมมาตรที่เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิของโมดูลที่ 110 ถึง 145 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปภาพ 42 สำหรับฟลักซ์รวมและฟลักซ์ของเอทานอล เห็นได้ชัดว่าเมื่ออุณหภูมิของโมดูลเพิ่มขึ้นทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงเล็กน้อย ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการแยกน้ำผ่านเยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงๆ และเมื่ออุณหภูมิของโมดูลสูงขึ้นพบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ การศึกษาสัมประสิทธิ์การแยกก็เห็นได้ชัดว่าค่าของสัมประสิทธิ์การแยกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิโมดูลเพิ่มขึ้นจาก 120

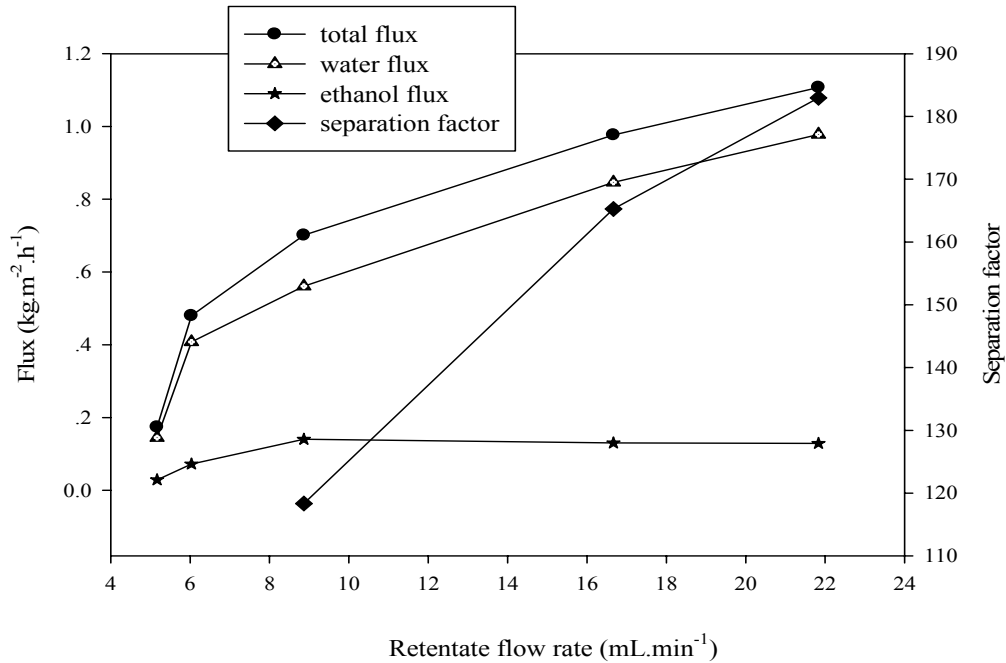
ถึง 145 องศาเซลเซียส ดังนั้นสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิและความดันสูงขึ้นไปทำให้เยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอมีคุณสมบัติในการแยกน้ำมีประสิทธิภาพที่สูง ถึงแม้ว่าเราไม่ได้มีการทดลองการดูดซับน้ำผ่านเยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอมีที่มีอุณหภูมิสูงถึง 145 องศาเซลเซียส แต่มีการรายงานว่าปริมาณการดูดซับน้ำผ่านเยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอมีจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่าค่านี้ (D.W. Breck, 1974) ดังนั้นนี้อาจจะบ่งว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นสามารถปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการดูดซับประกอบกับค่าการดูดซับความร้อนลดลง ดังนั้นการสังเกตความสำคัญของอุณหภูมิที่มีผลต่อการซึมผ่านของน้ำผ่านเยื่อแผ่นซีโอไลต์อาจจะเกิดขึ้นในอุณหภูมิที่สูงกว่าที่ 100-145 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิมิมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการดูดซับและการแพร่ (Sato *et al.*, 2007)

3.2.2.3 ผลของอัตราการไหลด้าน retentate

ผลของอัตราการไหลด้าน retentates ที่มีต่อค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ เอทานอลด้าน retentate ของการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอมีแสดงดังรูปภาพ 43 ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเอทานอลขึ้นอยู่กับอัตราการไหลด้าน retentate ซึ่งเอทานอลความบริสุทธิ์ที่สูงกว่าสามารถผลิตได้ที่อัตราการไหลที่ต่ำกว่า

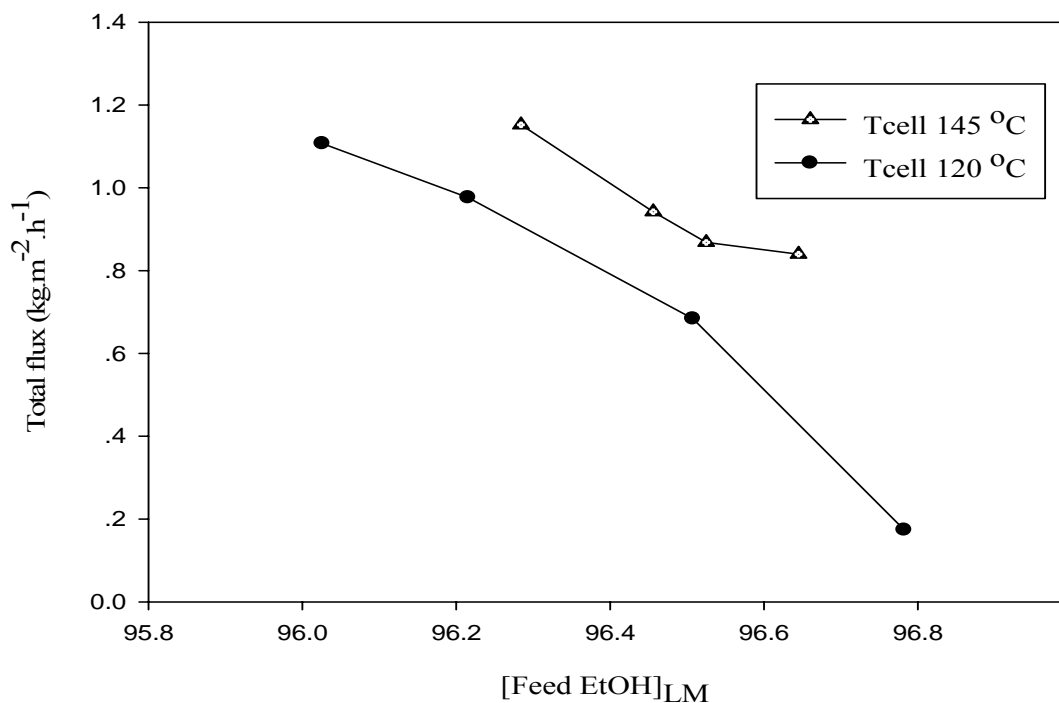


รูปภาพ 43 ผลของอัตราการไหลด้าน retentates ที่มีต่อค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ เอทานอลด้าน retentate ที่ความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิของโมดูล 145 องศาเซลเซียส



รูปภาพ 44 ผลของอัตราการไหลด้าน retentates ที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแยกที่ความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิของโมดูล 145 องศาเซลเซียส

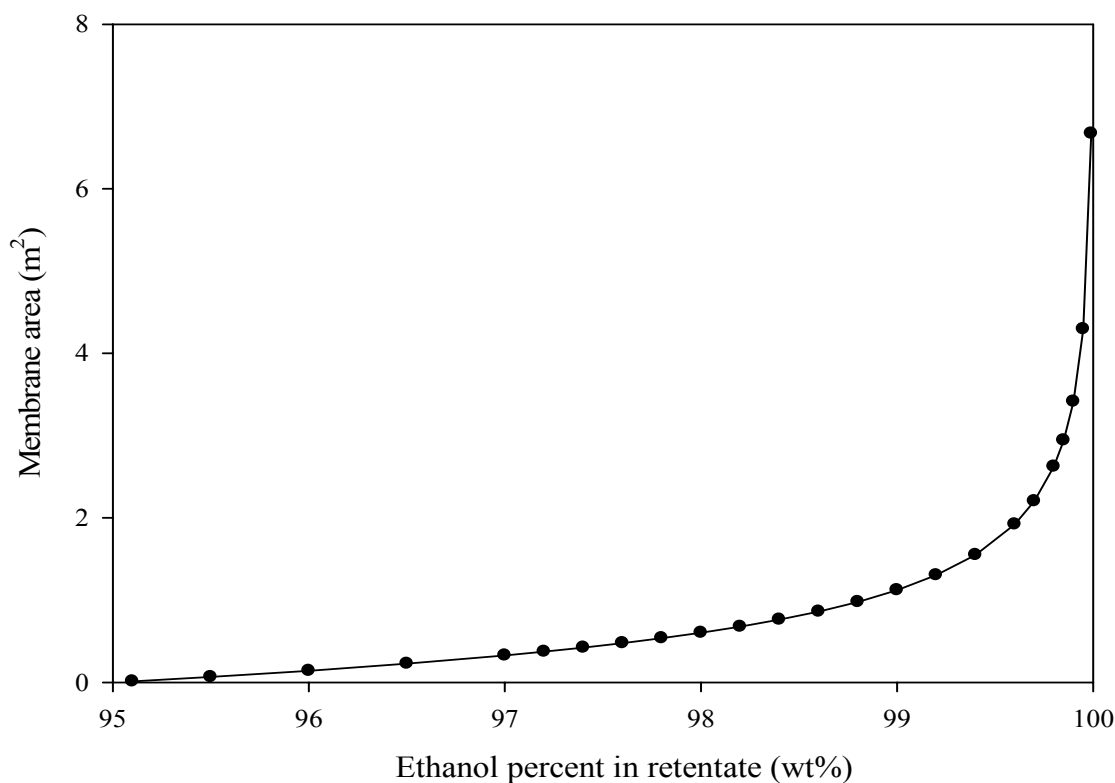
อิทธิพลของอัตราการไหลด้าน retentates ที่มีต่อค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแยกที่ความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิของโมดูล 145 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปภาพ 44 ผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์รวม ฟลักซ์ของเอทานอลและฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราการไหลด้าน retentate เพิ่มขึ้นจาก 5.17 ถึง 21.83 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับสัมประสิทธิ์การแยกพบว่ามีแนวโน้มที่ไม่เฉพาะเจาะจงเมื่ออัตราการไหลด้าน retentate เพิ่มขึ้นจาก 5.17 ถึง 8.87 มิลลิลิตรต่อนาที แต่สัมประสิทธิ์การแยกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 142.18 ถึง 212.13 เมื่ออัตราการไหลด้าน retentate เพิ่มขึ้นจาก 8.87 ถึง 21.83 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปภาพ 45 ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวมที่ความดันสูญญากาศ 6 มิลลิบาร์

ผลกระทบของอุณหภูมิโมดูลและความเข้มข้นเอทานอลด้านสายป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์รวมของการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นซีโอไลต์แบบหลอดชนิดโซเดียมเอแสดงในรูปภาพ 45 ผลการทดลองพบว่า ฟลักซ์รวมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเจือปนในสายป้อนรวมทั้งอุณหภูมิโมดูลเพิ่มขึ้นความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของการซึมผ่านและอุณหภูมิด้านสายป้อนให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับคุณสมบัติการซึมผ่าน เนื่องจากอุณหภูมิเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์การดำเนินงานที่สำคัญที่สุดสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมในกระบวนการแยกน้ำออก เป็นข้อสังเกตว่าอุณหภูมิมีผลต่อสามคุณสมบัติสำคัญ (i) การดูดซับ (ii) การแพร่และ (iii) ความดันไอในสายป้อนในระหว่างการซึมผ่านผ่านเยื่อแผ่นซีโอไลต์ ซึ่งพารามิเตอร์ที่สามของความดันไอในสายป้อนเป็นแรงขับเคลื่อนการไหลซึมผ่านเยื่อแผ่นซีโอไลต์ (Sato *et al.*, 2007)

3.2.3 สมการการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงผลของพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องใช้ในการ แยกน้ำ ต่อความเข้มข้นของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ต้องการ



รูปภาพ 46 การจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงผลของพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องใช้ในการแยกน้ำ ต่อความเข้มข้นของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ต้องการในกระบวนการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น

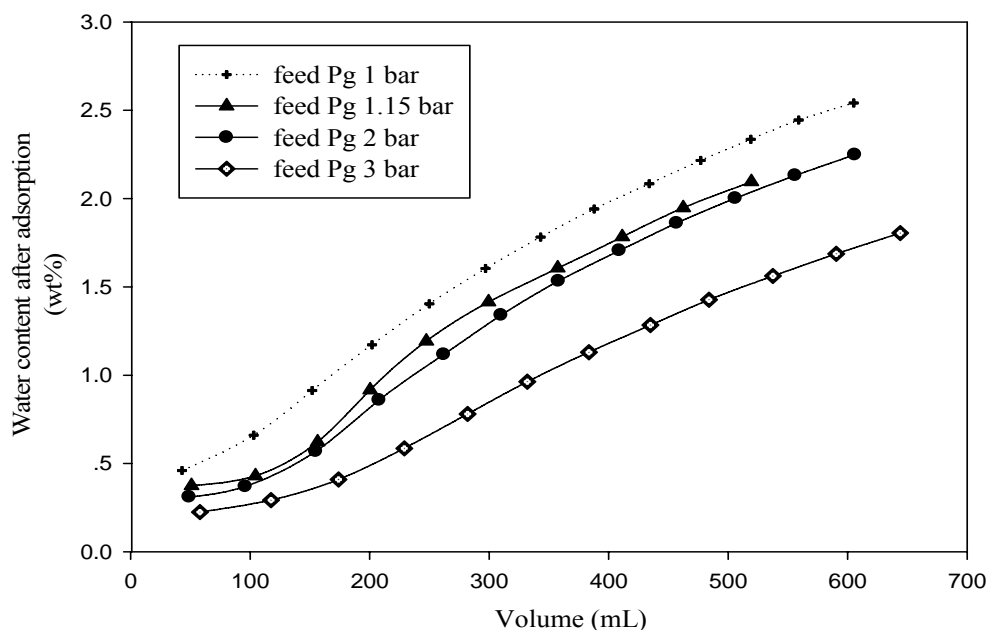
พื้นที่เยื่อแผ่นที่จะต้องใช้เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์เอทานอลความบริสุทธิ์ให้ได้ตามที่กำหนด สำหรับกระบวนการแยกน้ำออกจากเอทานอลนั้น มีผลกระทบที่สำคัญเกี่ยวกับค่าใช้จ่าย รูปภาพ 46 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงผลของพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องใช้ในการแยกน้ำต่อความเข้มข้นของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ต้องการโดยใช้สมการ (22) ตัวอย่างการคำนวณได้ตั้งค่าตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณดังนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การแยกเฉลี่ยเท่ากับ 100 ความเข้มข้นเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ค่าฟลักซ์การซึมผ่านในเยื่อแผ่น 1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของเอทานอลเป็น 0.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมงตามลำดับ พื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องใช้

ในการแยกน้ำค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อต้องการความบริสุทธิ์ของเอทานอลตั้งแต่ร้อยละ 95.1 จนถึงร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก เมื่อต้องการความบริสุทธิ์ของเอทานอลร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก จะต้องใช้พื้นที่ของเยื่อแผ่นถึงประมาณ 1.12 ตารางเมตร แต่จุดที่สำคัญอาจจะสังเกตได้เมื่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลด้าน retentate เกินค่านี้นี้ กล่าวคือเมื่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลในสาย retentate เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 99 ถึงร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก พื้นที่ของเยื่อแผ่นที่จำเป็นต้องใช้เพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 1.12 จนกระทั่งมากกว่า 6.67 ตารางเมตร แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ของเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นมากเกือบประมาณ 6 เท่า ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความสมเหตุสมผลที่จะใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นเพื่อผลิตเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์สูงถึงที่ร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ดังนั้นเทคนิคทางเลือกที่ทำงานได้ดีขึ้นที่ความเข้มข้นของน้ำลดลงจึงเป็นที่น่าสนใจมากขึ้น สำหรับกระบวนการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยการดูดซับได้มีการทำแล้วในระดับอุตสาหกรรมทั่วไป แต่ไม่เคยมีการตีพิมพ์มาก่อนเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณน้ำที่เจือปนในสารป้อน

3.3 การดูดซับ

สำหรับการทดสอบการดูดซับ ถูกใช้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการแยกน้ำออกจากเอทานอล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์สูงสุดถึงร้อยละ 99.95 โดยน้ำหนักขึ้นไป คอลัมน์ดูดซับบรรจุเต็มไปด้วยตัวดูดซับความชื้น (molecular sieve 3 Å) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อน และความดันด้านสายป้อนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ โดยที่ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 95 ถึงร้อยละ 99.0 โดยน้ำหนักและความดันด้านสายป้อนเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 3 บาร์

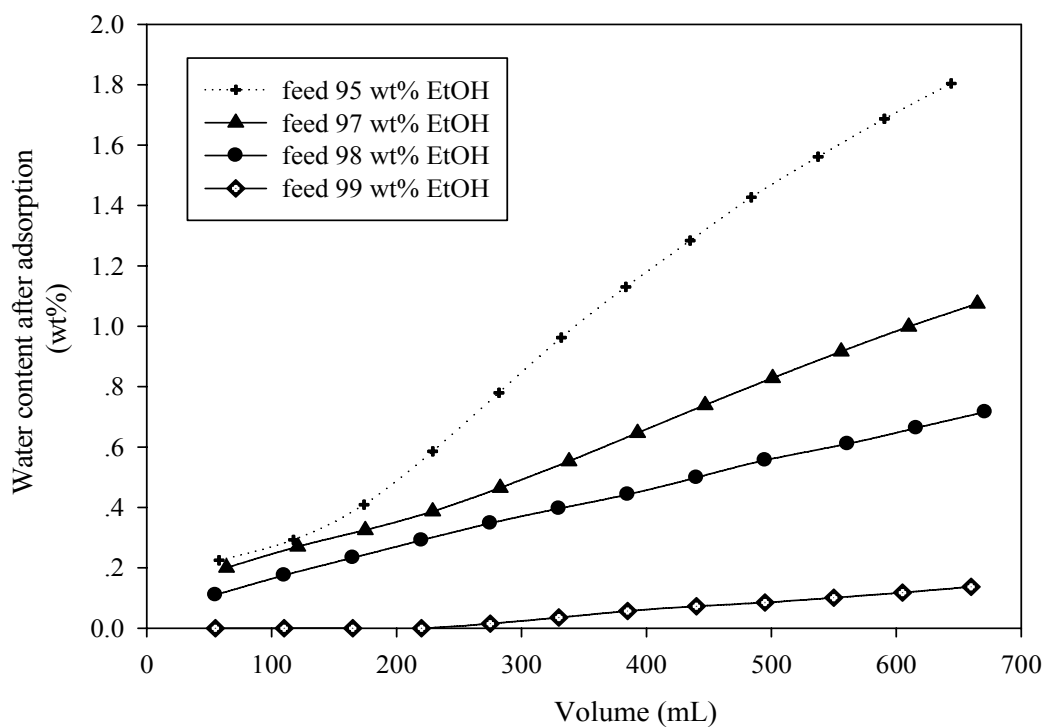
3.3.1 ผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ



รูปภาพ 47 ผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เจือปนกับผลิตภัณฑ์เอทานอลหลังการดูดซับกับปริมาตรของผลิตภัณฑ์เอทานอลหลังการดูดซับที่ความบริสุทธิ์ของเอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิของคอลัมน์ 145 องศาเซลเซียส

รูปภาพ 47 แสดงผลของความดันด้านสายป้อนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ พบว่าน้ำถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความดันด้านสายป้อนสูงขึ้น จาก 1 ถึง 3 บาร์ จะเห็นได้ว่าที่ความดันด้านสายป้อนที่สูงกว่าสามารถดูดซับปริมาณน้ำได้มากกว่าเมื่อเทียบกับที่ความดันด้านสายป้อนที่ต่ำกว่า จากผลการทดลอง พบว่าการดูดซับทำงานได้ดีขึ้นที่ความดันด้านสายป้อนที่สูงกว่า

3.3.2 ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ



รูปภาพ 48 ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เจือปนกับผลิตภัณฑ์เอทานอลหลังการดูดซับกับปริมาตรของผลิตภัณฑ์เอทานอลหลังการดูดซับ ที่ความความดันทางด้านสายป้อน 3 บาร์และอุณหภูมิของคอลัมน์ 145 องศาเซลเซียส

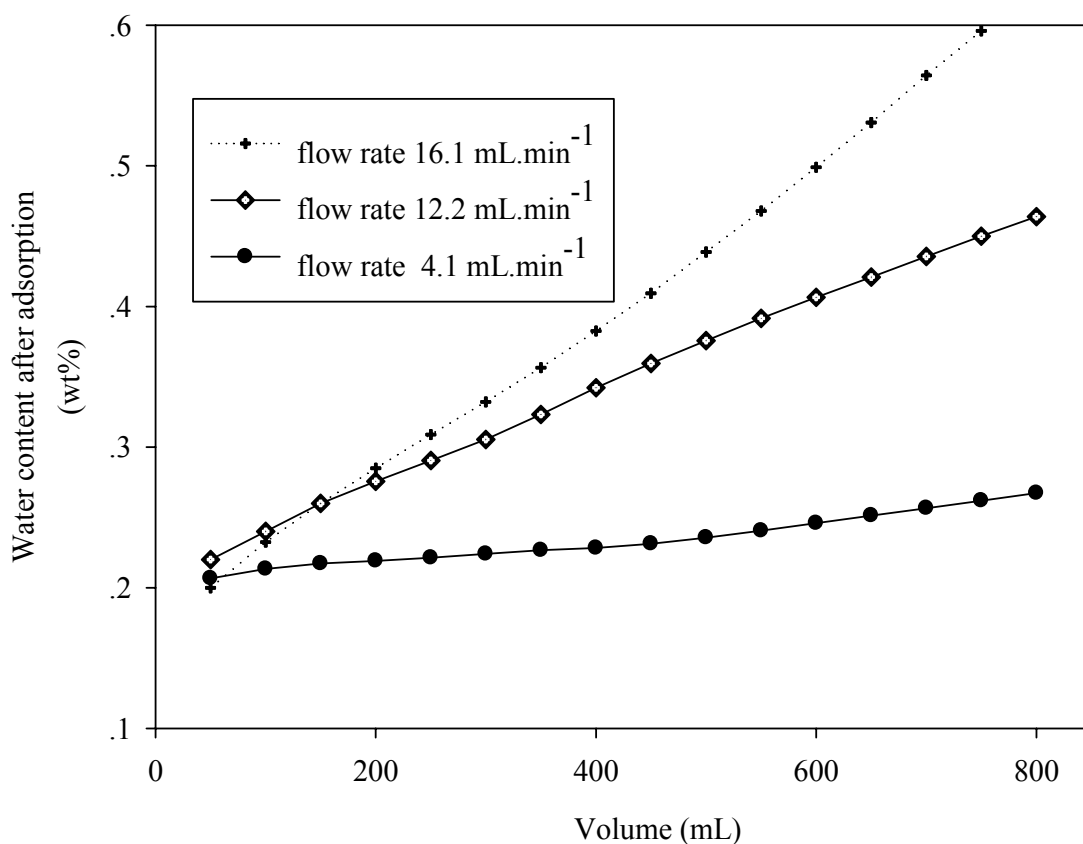
ผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับและการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์แสดงดังรูปภาพ 48 ทำการทดลองที่ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 95 ถึงร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนต่าง ๆ กัน ที่ความเข้มข้นของเอทานอลสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณน้ำที่เจือปนกับผลิตภัณฑ์เอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพียงหลังที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตรเท่านั้น ซึ่งมีปริมาณน้ำเจือปนต่ำสุดประมาณร้อยละ 0.29 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าการทำงานของการดูดซับที่ความเข้มข้นของเอทานอล

สายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนักยังมีประสิทธิภาพต่ำ เพราะปริมาณสัดส่วนของผลิตภัณฑ์เอทานอล ความบริสุทธิ์สูงที่ได้ถือว่าต่ำอยู่ สำหรับที่ความเข้มข้นของเอทานอลสายป้อนร้อยละ 97 และ 98 โดยน้ำหนัก พบว่าความสัมพันธ์การทำงานของเครื่องดูดซับมีแนวโน้มเหมือนกับที่ความเข้มข้นของเอทานอลสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และพบว่าความชื้นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ กับการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อน ซึ่งเป็นข้อสังเกตว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 99.0 โดยน้ำหนัก ความสามารถในการดูดซับมีมากที่สุด จากผลการทดลองพบว่าขั้นตอนการดำเนินการของการดูดซับมีประสิทธิภาพที่ดีมากกว่าที่ปริมาณน้ำที่เจือปนกับด้านสายป้อนต่ำๆ ปริมาณน้ำที่เจือปนอยู่ในผลิตภัณฑ์เอทานอลลดลงไปที่ระดับ ppm ก่อนที่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นหลังจากที่ปริมาตรผลิตภัณฑ์เอทานอลสะสมได้ 300 มิลลิลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาตรผลิตภัณฑ์เอทานอลสะสมได้ 550 มิลลิลิตร ปริมาณน้ำที่เจือปนยังอยู่ในระดับต่ำมากประมาณร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับรูปภาพ 46 ผลการทดลองยืนยันว่าขั้นตอนการทำงานของกระบวนการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นมีประสิทธิภาพมากขึ้นที่ปริมาณน้ำเจือปนในสายด้านป้อนสูงๆ ในขณะที่กระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพมากขึ้นที่ปริมาณน้ำเจือปนในสายด้านป้อนต่ำๆ เพราะความสามารถของการดูดซับขึ้นอยู่กับช่องว่างของตัวดูดซับความชื้นที่มีอยู่สำหรับโมเลกุลของน้ำ ปริมาณน้ำที่เจือปนในสายป้อนจึงควรจะมีปริมาณที่ต่ำที่สุด อาจสรุปได้ว่าควรแยกน้ำออกจากกระบวนการจนกว่าจะได้เอทานอลความบริสุทธิ์สูงๆซึ่งมีน้ำเจือปนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นก่อน ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการการดูดซับต่อไป

3.4 การแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยการรวมระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ

ผลการทดลองในรูปภาพ 49 แสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยการรวมระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับเข้าด้วยกัน ทำการทดลองที่อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์เอทานอลที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลมีผลอย่างมากต่อปริมาณน้ำที่เจือปนในผลิตภัณฑ์เอทานอล ที่อัตราการไหล 16.10 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณน้ำเจือปนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มต้นของการทดสอบ ความชื้นของกราฟสามารถประมาณได้ที่ร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนักต่อ 100 มิลลิลิตรของผลิตภัณฑ์ ผลจากการทดสอบที่ดีที่สุดคือที่อัตราการไหล 4.10 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าปริมาณน้ำเจือปนต่ำสุดร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าปริมาณน้ำเจือปนต่ำสุดมีค่าต่ำกว่าผลที่ดีที่สุดที่ได้ในรูปภาพ 49 และพบว่าที่ปริมาตรของผลิตภัณฑ์เอทานอลสะสมมากกว่า 800 มิลลิลิตร มีปริมาณน้ำเจือปนต่ำกว่าร้อยละ 0.26 โดยน้ำหนัก สำหรับการดำเนินงาน

อย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณน้ำเกินจุดที่กำหนด จะมีการเปลี่ยนทิศทางของสารป้อนไปยังอีกคอลัมน์หนึ่ง จากนั้นจะทำการ regenerate คอลัมน์ที่ถึงจุดอิ่มตัวโดยการทำให้เกิดสุญญากาศและทำให้เกิดการควบแน่นโดยใช้ condenser ร่วมกัน เพื่อเพิ่มอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์เอทานอลบริสุทธิ์ที่ต้องการ จะต้องดำเนินการทดสอบเพิ่มเติมสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเวลาในการ regenerate เพื่อเป็นการการบอกเวลาการทำงานของระบบการดูดซับสำหรับหนึ่งรอบ



รูปภาพ 49 ผลของอัตราการไหลที่มีต่อปริมาณน้ำที่เหลือปนอยู่กับผลิตภัณฑ์เอทานอลตลอดกระบวนการการกำจัดน้ำด้วยระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับร่วมกันที่ความดันด้านสายป้อน 3 บาร์ เอทานอลด้านสายป้อนเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของโมดูลและคอลัมน์ 145 องศาเซลเซียส

บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง

กระบวนการแยกน้ำออกจากเอทานอลเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ต้นทุนสูง โดยที่ของผสมเอทานอล/น้ำจะเกิดเป็นของผสมอะซีโอโทรปที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก และไม่สามารถทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้นไปอีกด้วยวิธีการกลั่นแบบธรรมดา การรวมเทคนิคผสมระหว่างการกลั่น การแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่ถูกนำเสนอมาแก้ปัญหาสำหรับการผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์จากจุดอะซีโอโทรป หอกลั่นเอทานอลแบบต่อเนื่องประสิทธิภาพสูง ซึ่งอาศัยหลักการการผสมแบบบังคับได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นที่สำเร็จในหน่วยวิจัยการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวล ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากการทดลองพบว่าค่าความเร็วรอบของใบพัดที่เหมาะสมที่สุดคือ 1000 รอบต่อนาที สามารถกลั่นเอทานอลได้ความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงที่สุดที่จะกลั่นได้

สำหรับเทคนิคการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น ประสิทธิภาพของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำออกจากไอผสมขึ้นอยู่กับความดันไอของสารด้านป้อน อุณหภูมิของโมดูล อัตราการไหลด้าน retentate และความดันด้านสุญญากาศ ในงานวิจัยนี้พบว่าเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN และท่อใยกลวงเชิงประกอบสามารถผลิต เอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง (Motor fuel grade ethanol) ได้สำหรับเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN พบว่า เมื่ออุณหภูมิของโมดูล 120 องศาเซลเซียส อัตราการไหลด้าน retentate 0.875 มิลลิลิตร ความดันด้านสุญญากาศ 6 มิลลิบาร์ และความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ สามารถผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ได้สูงถึง 99.16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับเยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ พบว่าเมื่ออุณหภูมิโมดูล 145 องศาเซลเซียส อัตราการไหลด้าน retentate 7.785 มิลลิลิตร ความดันด้านสุญญากาศ 6 มิลลิบาร์ และความดันด้านสายป้อน 1.6 บาร์ สามารถผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ได้สูงถึงร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเยื่อแผ่นเชิงประกอบ PVA/PAN และเยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ จากผลการทดลองพบว่า เยื่อแผ่นซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอได้เปรียบในเรื่องของให้ค่าสัมประสิทธิ์การแยกที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังเป็นเยื่อแผ่นที่มีคุณสมบัติที่ดีมากทั้งด้านทางเคมีและสามารถทนอุณหภูมิได้สูง ซึ่งถือได้ว่าเป็นเยื่อแผ่นที่มีประสิทธิภาพสูง แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากเอทานอลยังทำได้ยากขึ้นเมื่อต้องการเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ที่สูงๆ จากสมการการจำลองทางคณิตศาสตร์ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของเอทานอลบริสุทธิ์สูงๆจำเป็นต้องใช้พื้นที่ของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำเพิ่มสูงขึ้น เมื่อต้องการเอทานอลความเข้มข้นบริสุทธิ์สูงๆจากร้อยละ 99 ถึง 99.99

โดยน้ำหนัก พบว่าจำเป็นต้องใช้พื้นที่ของเยื่อแผ่นในการแยกน้ำเพิ่มสูงขึ้นเกือบหกเท่า เพราะฉะนั้นจึงเป็นเหตุผลที่จะใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นเพื่อผลิตเอทานอลความเข้มข้นสูงเพียงร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก เพราะถ้าต้องการความเข้มข้นของ เอทานอลที่มากกว่านี้การแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นจะไม่มีประสิทธิภาพ

สำหรับขั้นตอนสุดท้ายในการแยกน้ำจนกระทั่งได้เอทานอลความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 99.99 โดยน้ำหนัก ก็กระบวนการดูดซับโดยโมเลกุลคาร์ซีฟขนาด 3 อังสตรอม ผู้ทำการวิจัยได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อน และความดันด้านสายป้อนต่อการแยกน้ำออกจากเอทานอล จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้นเมื่อความดันด้านสายป้อนสูงขึ้นและความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนที่มีน้ำเจือปนน้อยๆประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

สำหรับประสิทธิภาพของการแยกน้ำด้วยการรวมเอากระบวนการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับเข้าด้วยกัน จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของโมดูล 145 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของเอทานอลด้านสายป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สด้านสายป้อน 3 บาร์ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ 4.10 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูง โดยในผลิตภัณฑ์ 800 มิลลิลิตรมีปริมาณน้ำเจือปนอยู่ร้อยละ 0.26 โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก ก

ตาราง B-1 ค่าการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงผลของพื้นที่ของเยื่อแผ่นที่ต้องใช้ในการแยกน้ำ
ต่อความเข้มข้นของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ต้องการในกระบวนการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น

เปอร์เซ็นต์ของเอทานอล ในสาย retentate	x_0 : สัดส่วนของเอทานอลใน สาย retentate	พื้นที่ของเยื่อแผ่น (m^2)
95.1	0.049	0.1066
95.5	0.045	0.5572
96.0	0.04	1.1854
96.5	0.035	1.9062
97.0	0.03	2.7525
97.2	0.028	3.1369
97.4	0.026	3.5542
97.6	0.024	4.0101
97.8	0.022	4.5123
98.0	0.02	5.0707
98.2	0.018	5.6988
98.4	0.016	6.4149
98.6	0.014	7.2456
98.8	0.012	8.2307
99.0	0.01	9.4339
99.2	0.008	10.9652
99.4	0.006	13.0397

ตาราง B-1 (ต่อ)

เปอร์เซ็นต์ของเอทานอลในสาย retentate	x_0 : สัดส่วนของเอทานอลในสาย retentate	พื้นที่ของเยื่อแผ่น (m^2)
99.6	0.004	16.1644
99.7	0.003	18.5292
99.8	0.002	22.0759
99.85	0.0015	24.7460
99.90	0.001	28.7273
99.95	0.0005	36.1245
99.99	0.0001	56.1338

หมายเหตุ :

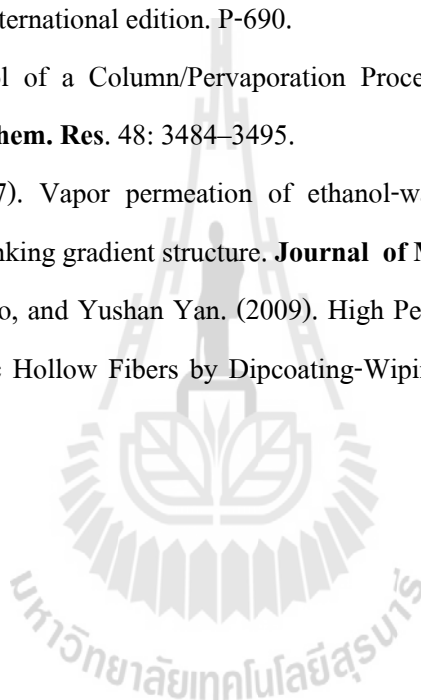
q_{F0} : อัตราการไหลด้าน Retentate ($kg \cdot h^{-1}$)	0.1
สัมประสิทธิ์การแยก	100
x_F : สัดส่วนของน้ำในสายป้อน	0.05
J : ค่าฟลักซ์การซึมผ่านในเยื่อแผ่น ($kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	0.024

บรรณานุกรม

- Banat, F.A., Abu Al-Rub, F.A., Simandl, J. (2000). Analysis of vapor–liquid equilibrium of ethanol–water system via headspace gas chromatography: effect of molecular sieves. **Separation and Purification Technology**. 18 (2): 111–118.
- Boontawan A., Bösch P., Schausberger, P., Brinkmann, T. and Friedl A. (2007). Dehydration of Ethanol/Water, Mixtures using Pervaporation and Vapor Permeation Technique, **Journal of Applied Membrane Science and Technology**. 5: 1-7.
- Boontawan A., เครื่องกลั่นประสิทธิภาพสูงด้วยระบบการปั่นผสมไอแบบต่อเนื่อง เลขที่คำขอ 1001000226 วันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2553.
- Burns D.A., and Ciurczak E.W. (editors), *Handbook of Near-Infrared Analysis*, Marcel-Dekker, New York, 2001.
- C.K. Yeom, K.-H. Lee. (1997). Vapor permeation of ethanol-water mixtures using sodium alginate membranes with crosslinking gradient structure. **Journal of Membrane Science**. 135: 225-235.
- Delgado, P., Sanz, M.T., and Beltran S. (2008). Pervaporation study for different binary mixtures in the esterification system of lactic acid with ethanol, **Separation and Purification Technology**. 64:78-87.
- D.W. Breck, Zeolite Molecular Sieve, John Wiley & Sons Inc., 1974, p. 771.
- Doig, S. D., Boam, A. T., Leak, D. I., Livingston, A. G., and Stuckey, D. C., A Membrane Bioreactor for Biotransformation of Hydrophobic Molecules. *Biotechnol. Bioeng.* 58, (6), 1998, p.p. 587-594.
- Fáunderz, C.A., Alvarez, V.H., & Valderrama, J.O., Predictive models to describe VLE in ternary mixtures water + ethanol + congener for wine distillation, *Thermochemica Acta*, 450, 110-117, 2006.
- Hartline, F. F. (1979). **Science (Washington, O.C.)**. 6: 41
- Hassaballah, A.A., Hills, J.H. (1990). Drying of ethanol vapors by adsorption on corn meal. **Biotechnol. Bioeng.** 35: 598–608.
- Huang, R.Y.M. (1991). Pervaporation Membrane Separation Process, Elsevier, USA.
- Jae-Hwa Chang, Je-Kang Yoo, Seung-Ho Ahn, Kyu-Hyun Lee and Suk-Moon Ko. (1998). Simulation of pervaporation process for ethanol dehydration by using pilot test results. **Korean J. Chem Eng.** 15(1): 28-36.
- Jan B. Haelssig, Andre ´ Y. Tremblay, and Jules Thibault. (2008). Technical and Economic Considerations for Various Recovery Schemes in Ethanol Production by Fermentation. **Ind. Eng. Chem. Res.** 47: 6185–6191.

- Jianguo Guan and Xijun Hub (2003). Simulation and analysis of pressure swing adsorption: ethanol drying process by the electrical analogue. **Separation and Purification Technology**, 31: 31-35
- Marian Simo, Christopher J. Brown, Vladimir Hlavacek. (2008). Simulation of pressure swing adsorption in fuel ethanol production process. **Computers and Chemical Engineering**, 32: 1635-1649.
- Matsuura, T. (1994). Synthetic Membrane and Membrane Separation processes. **CRC Press, Florida**.
- Mendes L.S., Oliveira F.C.C., Saurez P.A.Z., and Rubim J.C., Determination of ethanol in fuel ethanol and beverages by Fourier transform (FT)-near infrared and FT-Raman spectrometries, *Analytica Chimica Acta*, 493, 2003, p.p. 219-231.
- M.J. Carmo and J.C. Gubulin. (1997). Ethanol-water adsorption on commercial 3Å zeolites: kinetic and thermodynamic data. **Braz. J. Chem. Eng.** vol. 14 no. 3.
- M.S. Schehlmann, E. Wiedemann, R.N. Lichtenthaler. (1995). Pervaporation and vapor permeation at the azeotropic point or in the vicinity of the LLE boundary phases of organic/aqueous mixtures. **Journal of Membrane Science**. 107: 277-282.
- O'Brien D.J., Roth L.H., and McAloon A.J., Ethanol production by continuous fermentation-pervaporation: a preliminary economic analysis, *J. Membr. Sci.*, 16, 2000, p.p. 105-111.
- Ohe, S., Vapor-Liquid Equilibrium Data, Elsevier, Amsterdam, 1989.
- Patricia M. Hoch and Jose ´ Espinosa. (2008). Conceptual Design and Simulation Tools Applied to the Evolutionary Optimization of a Bioethanol Purification Plant. **Ind. Eng. Chem. Res.** 47: 7381-7389.
- R. Rautenbach and F.P. Helmus, Some considerations on mass transfer resistances in solution-diffusion-type membrane processes, **J. Membrane Sci.**, 87 (1994) 171-181.
- Ried, R.C., J.M. Prausnitz, and B.E. Poling. (2000). The properties of gases and liquids. **McGraw Hill**.
- Roehr, M., 2001. The Biotechnology of Ethanol: Classical and Future Applications. WILEY-VCH, Germany.
- Seader, J.D. and E.J. Henley, Separation Process Principles. (2005). John Wiley & Sons, United Kingdom.
- 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 in vapor permeation. **Journal of Membrane Science**. 307, (2): 181-195.
- Shivaji Sircar. (2002). Pressure Swing Adsorption. **Ind. Eng. Chem. Res.** 41: 1389-1392.
- Siesler H.W., Ozaki Y., Kawata S., and Heise H.M. (editors), Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications, Wiley-VCH, Germany, 2002. A.E. Jansen, W.F. Versteeg, B. van Engelenburg, J.H. Hanemaaijer and B.Ph. ter Meulen. (1992). Methods to improve flux during alcohol/water azeotrope separation by vapor permeation, **Journal of Membrane Science**. 68: 229-239.

- Thu Lan Thi Nguyen, Shabbir H. Gheewala, and Savitri Garivait. (2007). Full Chain Energy Analysis of Fuel Ethanol from Cassava in Thailand. **Environ. Sci. Technol.** 41: 4135-4142
- Torbjorn Pettersen, Kristian M. Lien. (1995). Design of hybrid distillation and vapor permeation processes. **Journal of Membrane Science.** 99: 21-30.
- Vicente Gomis, Ricardo Pedraza, Olga France 's, Alicia Font, and Juan Carlos Asensi. (2007). Dehydration of Ethanol Using Azeotropic Distillation with Isooctane. **Ind. Eng. Chem. Res.** 46: 4572-4576.
- Wah Koon Teo and Douglas M. Ruthven. (1986). Adsorption of Water from Aqueous Ethanol Using 3-A Molecular Sieves. **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.** 25: 17-21.
- Warren L. McCabe, Julian C. Smith and Peter Harriott. (2005). Unit operations of chemical engineering. Seventh edition. McGraw-Hill international edition. P-690.
- William L. Luyben. (2009). Control of a Column/Pervaporation Process for Separating the Ethanol/Water Azeotrope. **Ind. Eng. Chem. Res.** 48: 3484-3495.
- Yeom, C.K., and K.-H. Lee. (1997). Vapor permeation of ethanol-water mixtures using sodium alginate membranes with crosslinking gradient structure. **Journal of Membrane Science.** 135: 225-235.
- Zhengbao Wang, Qinqin Ge, Jia Shao, and Yushan Yan. (2009). High Performance Zeolite LTA Pervaporation Membranes on Ceramic Hollow Fibers by Dipcoating-Wiping Seed Deposition. **J. AM. CHEM. SOC.** 131: 6910-6911.



ประวัติผู้วิจัย

1. **ชื่อ :** นาย อภิชาติ บุญทาวัน
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
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
1990	มัธยมศึกษาตอนปลาย	-	โรงเรียนปริญญ์ร้อยตรีวิทยาลัย เชียงใหม่	ไทย

5. **ประสบการณ์การทำงาน**
 - งานวิจัยหลังปริญญาเอก ASEA-UNINET Post-doc, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเวียนนา, ประเทศออสเตรีย (พ.ค. 2550- เม.ย. 2551)

- อาจารย์/ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ม.ค. 2548 - ปัจจุบัน)

6. สถานะภาพงานวิจัย

หัวหน้าโครงการ

- การศึกษาการพัฒนาการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องจากกากน้ำตาลอ้อยโดยใช้เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในถังหมักแบบใช้เชื้อแผ่น
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 100,000. บาท
สถานะภาพ เสร็จสิ้นโครงการ (ก.ย. 2548- ส.ค. 2549)
- การเก็บเกี่ยวกรด L-แล็คติกจากน้ำหมักด้วยระบบอิเล็กโตรดิอออนไนเซชัน
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ/มทส สัญญาเลขที่ มทส -3-304-51-12-09
240,000. บาท (ธ.ค. 2550- พ.ย. 2551) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การสังเคราะห์เมทานอลแบบต่อเนื่องด้วยเชื้อ *Methylosinus trichosporium* OB3b ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพหมุนเวียนโดยใช้เทคนิคเพอร์เวปเพอเรชัน
แหล่งเงินทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
305,000.- บาท (ค.ค. 2549- พ.ย. 2551) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดไขมันจากสบู่ดำ ในสภาวะไร้ออกซิเจน
แหล่งเงินทุน: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
200,000. บาท (ก.ย. 2549- ส.ค. 2550) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การพัฒนาท่อใยกลวงเชิงประกอบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตอะซิโตน-บิวทานอล-เอทานอลจากมันสำปะหลัง
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
351,000. บาท (ธ.ค. 2552- พ.ย. 2553) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การประยุกต์ใช้สเปกโตรสโคปีของรังสีใกล้อินฟราเรดในการควบคุมการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์โดยใช้ระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ

แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

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

- การประยุกต์ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์อินทรีย์เซชันในการแยกโปรตีนเอ็นเทอโรไลเนสจากน้ำหมัก

แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

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 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น และการดูดซับ

แหล่งเงินทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

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

- การสร้างโรงงานต้นแบบการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงจากมันสำปะหลัง โดยใช้เทคนิคผสมระหว่างการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

- การทำบริสุทธิ์กรดซักซินิกจากน้ำหมักด้วยวิธีตกตะกอน เอสเทอร์รีฟิเคชันและการกลั่น

แหล่งเงินทุน: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ

537,200. บาท งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

- การทำบริสุทธิ์กรด D- และ L-แล็คติกด้วยวิธีเอสเทอร์รีฟิเคชันและการกลั่นจากน้ำหมัก

แหล่งเงินทุน: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (B10-52)

3,272,440. บาท (ช.ค. 2552- พ.ย. 2553) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

- การออกแบบถังปฏิกรณ์แบบท่อไหลสำหรับการทำปฏิกิริยาระดับ D-เล็กติก
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
683,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- การพัฒนาท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
385,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอล
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
350,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

ผู้ร่วมโครงการ

- การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการทำปฏิกิริยาระดับเล็กติกโดยอิงเทคโนโลยีการกลั่นพร้อมการทำเอสเทอร์รีไฟเคชัน (สัญญา สนช-มก-มทส เลขที่ B10-52) จากน้ำหมักของบริษัท มิตรผลวิจัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด
แหล่งเงินทุน: บริษัท มิตรผลวิจัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด
หัวหน้าโครงการ: ผศ.ดร. วีระศักดิ์ เลิศศิริ โยธิน
1,187,220. บาท (1 พ.ย 2553- เม.ย 2554) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การพัฒนาเยื่อแผ่นเชิงประกอบจากยางธรรมชาติสำหรับการแยกเอทิลแอลกอฮอล์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีไฟเคชันด้วยระบบเพอร์เวปพอร์เรชัน
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 α -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*, **Submitted.**
- 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 Khunnonkwao, P., Ariyawong, C., Lertsiriyothin, W., and **Boontawan, A.** (2012) Purification of D-(-)-Lactic Acid from Fermentation Broth using Nanofiltration, Esterification, Distillation, and Hydrolysis Technique, *Adv Mater Res*, **Accepted.**
- 9 **Boontawan, A.** (2012) Purification of Succinic Acid from Synthetic Solution using Vapor Permeation-Assisted Esterification Coupled with Reactive Distillation, *Adv Mater Res*, **Accepted.**

- 10 Champreda, V., Stuckey, C., and **Boontawan, A.** (2012) Separation of Methanol/Water Mixtures from Dilute Aqueous Solutions using Pervaporation Technique, *Adv Mater Res*, **Accepted**.
- 11 Samnaknit, W., and Boontawan, A., (2012) Extractive Fermentation of Ethanol using a Vacuum Fractionation Technique, *Bioresource Technol*, **In Preparation**

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 6th Regional Symposium on Membrane Science and Technology 2008*, 13rd-15th 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*, 12nd-18th 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*, 12nd-18th 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 3rd International Conference on Renewable Resources and Biorefineries 2007*, 4th-6th 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*, 26th-29th April 2006, Nanyang Technological University, Singapore. (นำเสนอแบบโปสเตอร์)

6. **Boontawan, A.** and Stuckey, D.C. A Membrane Bioreactor for Biotransformation of Monoterpene. *3rd Regional Symposium on Membrane Science & Technology 2005*, 27th-28th April 2005, Institut Teknologi Bandung, Indonesia. (นำเสนอด้วยวาจา)
7. **Boontawan, A.** Molecular Diffusion in PVA Membrane for Separation Dehydration of EtOH/H₂O Mixtures using Vapor Permeation Technique. *Nanotech Insight Conference 2009*, 29th March-2nd 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 8th International Conference on Membrane Science and Technology 2010*, 29th November-2nd 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 4th International Conference on Fermentation Technology for Value Added Agricultural Products (FerVAAP) Conference*, 29th -31st 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*, 19th-22nd March 2012, Bangkok, Thailand

11. March 2012, Bangkok

