

รหัสโครงการ SUT3-304-54-12-10



รายงานการวิจัย

ถึงปฏิกิริยาชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอล

A Membrane Bioreactor for Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT3-304-54-12-10



รายงานการวิจัย

ถึงปฏิกิริยาชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอล

A Membrane Bioreactor for Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทาวิน

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤศจิกายน 2557

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รองศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทาวิน
สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อภาษาไทย

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเอทานอลโดยตรงได้ถูกศึกษา โดยใช้เอทานอลที่ผลิตขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสูญญากาศประสิทธิภาพสูง ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักน้ำหมัก โดยจนพลศาสตร์การหมักแสดงให้เห็นถึงการยับยั้งอย่างมีนัยสำคัญของผลิตภัณฑ์และความเข้มข้นวิกฤตของเอทานอลอยู่ที่ 100 กรัมต่อลิตร น้ำหมักถูกทำให้เดือดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยทำการลดความดันบรรยากาศลงถึงระดับที่ 45 มิลลิบาร์ ไอผสมของเอทานอลจะถูกกลั่นลำดับส่วนให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 94 ก่อนที่จะลอยออกจากหอกลั่นออกไป ส่งผลให้ส่วนกลั่นเอทานอลนั้น สามารถเอาเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำได้โดยตรง โดยไม่ต้องทำการกลั่นเพิ่มเติมอีก ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักนั้นถูกจำกัดให้อยู่ในระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 25 กรัมต่อลิตร ซึ่งส่งผล ทำให้ลดอิทธิพลจากการยับยั้งผลิตภัณฑ์สำหรับการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักแบบกะนั้น อัตราการใช้สารตั้งต้นอยู่ที่ 26.6 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และน้ำตาลกลูโคสจะถูกใช้หมดภายใน 21 ชั่วโมง การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักแบบกะซ้ำนั้น สามารถเติมน้ำตาลกลูโคสเข้าไปได้ 8 ครั้ง และเอทานอลถูกผลิตได้ 8 เท่าของการหมักแบบกะ จากนั้นได้ทำการเตรียมเมมเบรนซึ่งจากการเตรียมเมมเบรนยาง ENR ยาง ENR ผสมไคโตซานและจากไคโตซาน พบว่าการผสมไคโตซานกับยาง ENR โดยการเติมสารละลายไคโตซานลงไประหว่างการสังเคราะห์ยาง ENR นั้น การเติมไคโตซานลงในยาง ENR นั้น ทำให้การดูดซับน้ำ, การดูดซับเอทานอล, สมบัติทางไฟฟ้า, ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุและสมบัติการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น เมมเบรนที่เตรียมได้นั้นจะมีประสิทธิภาพด้านการนำโปรตอนเพิ่มขึ้นตามปริมาณไคโตซานที่เพิ่มขึ้น แต่การแช่เมมเบรนที่เตรียมได้ทั้งหมดในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะทำให้เมมเบรนเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติด้านการนำโปรตอนต่ำลง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนเนฟิออนซึ่งเป็นเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิงเชิงการค้า พบว่าเมมเบรนไคโตซานที่แช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร เป็นเวลา 5 นาทีจะมีค่าการนำโปรตอนต่ำกว่าเมมเบรนเนฟิออนมาก การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างเมมเบรนเนฟิออนกับเมมเบรนที่เตรียมได้พบว่าความเข้มข้นของพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรนเนฟิออนมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ณ ความหนาแน่นของกระแส 280 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่เมมเบรนที่เตรียมได้มีความเข้มข้นของพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรนเนฟิออนมีค่าเท่ากับ 58 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ณ ความหนาแน่นของกระแส 210 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนการใช้สารละลายเอทานอลที่ได้จากถังปฏิกรณ์ชีวภาพโดยตรงนั้น พบว่าการทดลองไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำหมักไปขัดขวางการออกซิโดซ์เอทานอล ณ บริเวณขั้วไฟฟ้าอะโนด

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

A direct ethanol fuel cell was studied using ethanol solution produced in the laboratory. A high efficiency vacuum fractionating technique was introduced to simultaneously remove ethanol from fermentation broth. Fermentation kinetic revealed a strong product inhibition and the threshold ethanol concentration was 100 g/L. The broth was boiled at 35 °C by reducing the pressure to 45 mBar. The ethanol vapor was fractionated for up to 94 wt% before leaving the column. As a result, the ethanol product can be dehydrated without further distillation. Ethanol concentration in the broth was kept lower than 25 g/L, thus minimized the product inhibition effect. For batch extractive fermentation, a high substrate utilization rate was obtained at 26.6 g/L h and most of glucose was consumed within 21 h. For repeated-batch extractive fermentation, addition of glucose was carried out up to 9 times and ethanol was produced 8 times higher than batch fermentation. Subsequently, proton exchange membranes were prepared from epoxidized natural rubber (ENR), ENR blended with chitosan, and chitosan. Experimental results showed that addition of chitosan to ENR increased sorption of water, ethanol, electrical properties, ion exchange capacity, and proton conductivity. However, dipping of membrane in 10% v/v sulfuric acid caused a higher degree of cross-linking resulting in a lower proton conductivity. In comparison to Nafion membrane which is a commercial available proton exchange membrane for fuel cells, the chitosan membrane dipped in 10% v/v sulfuric acid for 5 minutes still possessed much lower proton conductivity. For the testing for electricity generation of the direct ethanol fuel cells using Nafion membrane and prepared membranes, experimental results revealed that the peak power density for Nafion membrane was found to be 80 mW/cm² at a load current-density of 280 mA/cm². However, a peak power density of 58 mW/cm² at a load current-density of 210 mA/cm² was observed with the prepared membrane. Finally, the membrane bioreactor for direct ethanol fuel cell was unsuccessfully investigated. No electricity was obtained probably due to by-products formation which prevented oxidation of ethanol at anode electrode.

สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาทางวิจัย	1
1.2 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)	2
1.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์	3
1.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนทลอมเหลว	4
1.2.3 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก	5
1.2.4 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน	5
1.2.5 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	6
1.2.6 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลกอฮอล์โดยตรง	7
1.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลกอฮอล์โดยตรง (Direct alcohol fuel cell)	7
1.3.1 กลไกการนำโปรตอนของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (PEM)	12
1.3.2 สมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์	14
1.4 การผลิตเอทานอลจากกระบวนการหมัก	17
1.4.1 การพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอล	18
1.4.2 การพัฒนาระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ	20
1.5 จุดประสงค์ของโครงการวิจัย	22
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	23
2.1 การเตรียมเอทานอลจากกระบวนการหมัก	23
2.2 การเตรียมเมมเบรนพอลิเมอร์สำหรับแลกเปลี่ยนโปรตรอน (PEM)	25
2.3 วิธีการดำเนินการทดลอง	25
2.3.1 การเตรียมเมมเบรนไคโตซาน	25
2.3.2 เตรียมน้ำยารองรับกรดซัลฟิวริกและเมมเบรนยารองรับกรดซัลฟิวริก	26

2.3.3	เตรียมสารผสมระหว่างไคโตซานกับยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์	26
2.3.4	เตรียมเมมเบรนผสมระหว่างไคโตซานกับยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์	27
2.4	การทดสอบคุณลักษณะเมมเบรนผสมระหว่างไคโตซานกับยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์	27
2.4.1	การทดสอบสมบัติทางเคมี	27
2.4.2	การทดสอบสมบัติด้านสัณฐานวิทยา	27
2.4.3	การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต	28
2.4.4	การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า	28
2.4.5	สมบัติการดูดซับน้ำ	28
2.4.6	สมบัติการดูดซับเอทานอล	28
2.4.7	การหาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน	28
2.4.8	สมบัติการนำโปรตอน	29
2.5	การประกอบเซลล์เชื้อเพลิง (Membrane Electrode Assembly, MEA)	29
2.6	ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลโดยตรง	31
บทที่ 3	ผลการทดลองและบทวิจารณ์	32
3.1	การผลิตเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบ สุญญากาศ	32
3.1.1	การศึกษาลักษณะของการยับยั้งจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์	32
3.1.2	อิทธิพลของอุณหภูมิ jacket ต่อส่วนกลั่นเอทานอล	35
3.1.3	การแยกเอทานอลควบคู่กับการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบ สุญญากาศ	38
3.1.4	การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักในแบบกะซ้ำ (Extractive fermentation of ethanol in repeated-batch mode)	41
3.2	การศึกษา Proton Exchange Membrane (PEM)	43
3.2.1	การศึกษาโครงสร้างของยาง ENR	43
3.2.2	การศึกษาโครงสร้างของยาง ENR ที่ผสมด้วยไคโตซาน	44
3.2.3	ผลของกรดซัลฟิวริกต่อโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรนที่เตรียมได้	45
3.2.4	การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา	47
3.2.5	สมบัติทางไฟฟ้าของเมมเบรน	47
3.3	เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเอทานอลโดยตรง	52
3.4	ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอล	53
บทที่ 4	สรุปผลการทดลอง	54
	บรรณานุกรม	56

ประวัติผู้วิจัย

58



สารบัญภาพ

รูปภาพ 1 แสดงหลักการทำงานทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell)	2
รูปภาพ 2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์	3
รูปภาพ 3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนทลอมเหลว	4
รูปภาพ 4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก	5
รูปภาพ 5 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน	6
รูปภาพ 6 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง	7
รูปภาพ 7 แผนผังการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลเมื่อเกิดการออกซิไดซ์ที่สมบูรณ์	10
รูปภาพ 8 การประยุกต์ใช้ DEFC ในการเป็นแหล่งพลังงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ (Kamarudin <i>et al.</i> , 2013)	11
รูปภาพ 9 แสดงโครงสร้างระดับไมครอนของเนฟออนที่มีปริมาณน้ำต่ำและสูง (Jiao, 2011)	12
รูปภาพ 10 แสดงการเคลื่อนย้ายโปรตอนโดยตรงในสายโซ่เนฟออน (Jiao, 2011)	13
รูปภาพ 11 แผนผังของการเคลื่อนที่ของโปรตอนในน้ำด้วยกลไกการกระโดด (Jiao, 2011)	14
รูปภาพ 12 โพลารไรซ์ของไดอิเล็กทริก	15
รูปภาพ 13 แสดงวิถี Embden-Meyerhof (Bailey and Ollis, 1986)	18
รูปภาพ 14 แสดงหอกลิ้นแบบ cap tray ของโรงงานผลิตไบโอเอทานอลแห่งหนึ่ง	20
รูปภาพ 15 เปรียบเทียบการผลิตไบโอเอทานอลจากกระบวนการหมักโดยทั่ว ๆ ไป (ซ้าย) และการแยกควบคู่กับกระบวนการหมัก (ขวา)	21
รูปภาพ 16 การทดลองการผลิตเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ	23

รูปภาพ 17 แสดงการจัดการทดลองสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเอทานอลโดยตรง	30
รูปภาพ 18 การจัดการทดลองถึงปฏิกิริยาชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลโดยตรง	31
รูปภาพ 19 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น (A) และความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้น (B) ที่มีต่ออัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะ	34
รูปภาพ 20 โครมาโตแกรมของส่วนกลั่นเอทานอลที่ได้จากอุณหภูมิของ jacket ที่แตกต่างกัน (A) 35 °C, (B) 10 °C, และ (C) 2.5 °C ตามลำดับ	37
รูปภาพ 21 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการหมักเอทานอลแบบกะ (□) น้ำตาลกลูโคส, (○) เอทานอล, และ (Δ) การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ยีสต์	38
รูปภาพ 22 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระหว่างการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ (□) น้ำตาลกลูโคส, (○) เอทานอล, และ (Δ) การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ยีสต์ (บน) การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ยีสต์หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการหมักโดยใช้เทคนิคการย้อมสีด้วย methylene blue (ล่าง)	40
รูปภาพ 23 ลักษณะของผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ควบแน่นได้จากการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ	41
รูปภาพ 24 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระหว่างการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศในแบบกะซ้ำ (□) น้ำตาลกลูโคส, (○) เอทานอลในน้ำหมัก, (●) เอทานอลในส่วนควบแน่น และ (Δ) การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ยีสต์	41
รูปภาพ 25 ATR-FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ (NR) ก่อนการดัดแปรโมเลกุลและหลังการดัดแปรโมเลกุลเป็นยาง ENR	43
รูปภาพ 26 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ยาง ENR จากยางธรรมชาติ (Gan,1986)	44
รูปภาพ 27 ATR-FTIR สเปกตรัมของยาง ENR, ยาง ENR ผสมไคโตซานที่ปริมาณ 3% (ECS1), 5% (ECS2), 8% (ECS3), 10% (ECS4) และไคโตซาน (CS)	45
รูปภาพ 28 ATR-FTIR สเปกตรัมของยาง ENR, ยาง ENR ผสมไคโตซานที่ปริมาณ 5% (ECS2), และไคโตซาน (CS) ที่แช่กรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 30 นาที	46
รูปภาพ 29 ลักษณะของเมมเบรนยาง ENR ผสมไคโตซาน 5% (ECS2)	47

รูปภาพ 30 ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของเมมเบรนยาง ENR ผสมโคโตะซานปริมาณต่างๆ	48
รูปภาพ 31 ค่าความนำไฟฟ้าของเมมเบรนยาง ENR ผสมโคโตะซานปริมาณต่างๆ	49
รูปภาพ 32 ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนที่เตรียมได้จากยาง ENR และยาง ENR ผสมโคโตะซานซึ่งแช่กรดซัลฟิวริกในเวลาต่างๆ	50
รูปภาพ 33 อิทธิพลความหนาแน่นของกระแสที่มีต่อความต่างศักย์ของเซลล์และความเข้มข้นของพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระหว่างเมมเบรน CS และเมมเบรนเนฟิออน	53



สารบัญตาราง

ตาราง 1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเอทานอล 9

ตาราง 2 อิทธิพลอุณหภูมิของ jacket ที่มีต่อองค์ประกอบและอัตราการไหลของส่วนกลั่น 35

ตาราง 3 แสดงค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนที่ผ่านการแช่กรดที่เวลาต่างๆ..... 51



บทที่ 1 บทนำ

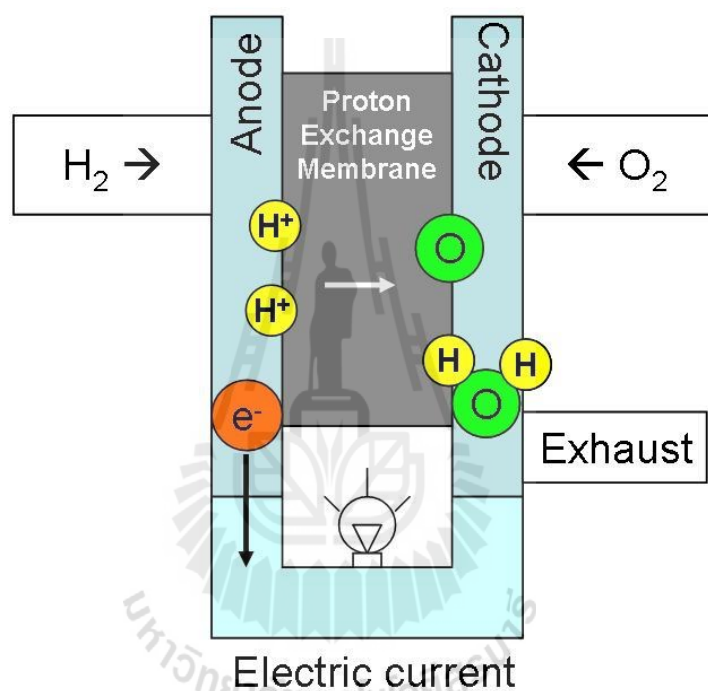
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาทางวิจัย

ปัญหาเรื่องการจัดการด้านพลังงานของประเทศไทยนั้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างเร่งด่วน ทั้งนี้เนื่องจากว่าประเทศไทยไม่มีแหล่งน้ำมันดิบเป็นของตนเอง และประเทศไทยของเรายังต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศเกือบ 100 % อีกทั้งก๊าซธรรมชาติที่ค้นพบในอ่าวไทยนั้นก็คาดว่าจะสามารถขุดเจาะขึ้นมาใช้ได้อีกประมาณ 30 ปีเท่านั้น นอกจากนี้ธุรกิจการขุดเจาะน้ำมันเป็นการลงทุนที่สูงแต่จุดสำคัญที่ต้องคำนึงถึงก็คือราคาน้ำมันดิบที่ซื้อขายกันในตลาด ที่มีความผันผวนเป็นอย่างมากโดยไม่ได้สะท้อนถึงต้นทุนการผลิตที่แท้จริง แต่ราคาจะขึ้นลงตามปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ของโลก ทั้งสถานการณ์ทางเศรษฐกิจ การเก็งกำไรในตลาดซื้อขายล่วงหน้าและการสงคราม เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาถึงพลังงานทดแทนในรูปของเชื้อเพลิงชีวภาพนั้นมีความสำคัญต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีผลิตผลทางการเกษตรที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงทางชีวภาพได้หลายชนิด เช่น ไบโอดีเซลและไบโอเอทานอล เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพในรูปแบบใหม่ ๆ เช่นเซลเชื้อเพลิงจากอัลกอฮอล์นั้น มีความจำเป็นต่อประเทศไทยมาก โดยมีจุดประสงค์ที่สำคัญคือเพื่อยกระดับความสามารถในการทำวิจัยของนักวิจัยไทย อีกทั้งเป็นการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศอีกด้วย

การผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น จำเป็นที่จำต้องทำการแยกน้ำออกโดยใช้กระบวนการต่าง ๆ เช่นการกลั่นและการแยกน้ำออกในขั้นตอนสุดท้าย เป็นต้น เพื่อที่จะให้น้ำปนอยู่ในเอทานอลที่น้อยที่สุด ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จำเป็นต้องมีการลงทุนเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่าง ๆ และยังต้องใช้พลังงานสูงในกระบวนการอีกด้วย อีกทั้งหากมีความต้องการนำเชื้อเพลิงเอทานอลเหล่านี้ไปผลิตกระแสไฟฟ้า จำเป็นที่จะต้องมีเครื่องยนต์สันดาปภายในอีกขั้นตอนหนึ่งอีกด้วย แต่สำหรับแนวความคิดในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลเชื้อเพลิงเอทานอลนั้น จะเป็นการออกซิไดซ์เอทานอลที่ขั้วไฟฟ้า Anode เพื่อที่จะได้พลังงานที่สะอาด มีค่าพลังงานที่สูงและมีความต่อเนื่องของการให้พลังงานที่ดี ส่วนปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วไฟฟ้า cathode นั้น จะเป็นการรับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ด้วยออกซิเจนในอากาศ กลายเป็นน้ำบริสุทธิ์ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของการประยุกต์ใช้เซลเชื้อเพลิงเอทานอลก็คือประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ต่ำ ทำให้เกิดการออกซิไดซ์เอทานอลที่ไม่สมบูรณ์ เกิดเป็นสารตัวกลางต่าง ๆ เช่น acetaldehyde และกรดอะซีติก เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากสารละลายเอทานอลโดยตรง จึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนาขั้วไฟฟ้าให้มีความสามารถในการออกซิไดซ์เอทานอลให้ดียิ่งขึ้น จากนั้นจึงจะนำไปประยุกต์ใช้กับถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบหมุนเพื่อทำการผลิตไฟฟ้าโดยตรงจากระบบการหมักเอทานอลด้วยเชื้อยีสต์ต่อไป

1.2 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิง หรือ Fuel cell คืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกี่ยวกับอิเล็กตรอนมาเป็นกระแสไฟฟ้า (electrochemical energy conversion device) โดยจะทำการเปลี่ยน Hydrogen (H_2) หรือไฮโดรเจน และ Oxygen (O_2) ให้กลายเป็นน้ำ (H_2O) ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยเซลล์เชื้อเพลิงทั่ว ๆ ไปนั้น ปฏิกริยาเคมีจะผลิตไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าสองขั้วคือด้านของเชื้อเพลิง (Anode) และ oxidant (Cathode) โดยมีเยื่อแผ่นชนิด proton exchange membrane เพื่อทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนโปรตรอนจากด้าน Anode ไปยังด้าน Cathode ดังแสดงในรูปภาพ 1



รูปภาพ 1 แสดงหลักการทำงานทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell)

จากรูปภาพ 1 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงซึ่งหมายถึงไฮโดรเจนนั้นจะไหลเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงทางด้านของขั้ว Anode และจะถูกทำให้แตกตัวเป็นโปรตรอนและอิเล็กตรอน โดยโปรตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นชนิดที่เรียกว่า proton exchange membrane (PEM) ในขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ (electric current) ผ่านวงจรเพื่อการใช้งาน ในขณะที่ออกซิเจน (จากอากาศ) นั้นจะไหลเข้าสู่เซลล์ทางด้าน Cathode เพื่อทำปฏิกิริยากับโปรตรอนและอิเล็กตรอนจากด้าน Anode รวมกันเป็นโมเลกุลของน้ำต่อไป โดยการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นจะสามารถกระทำได้อย่างต่อเนื่อง

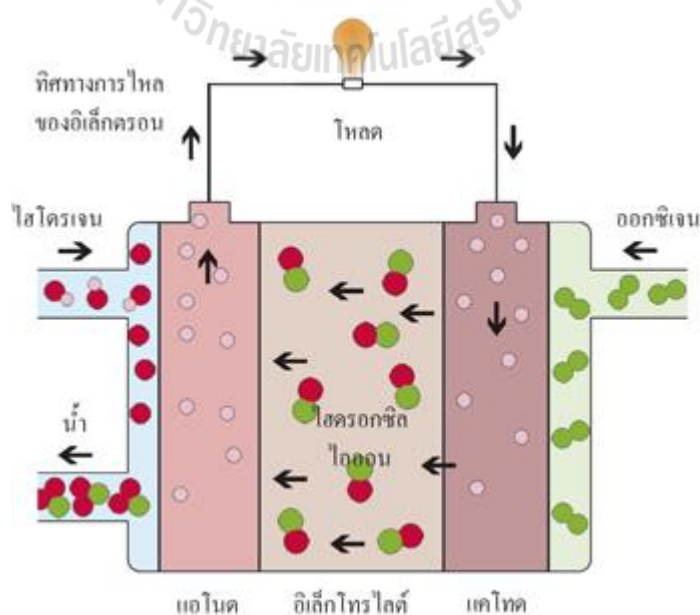
ตราบใดที่มีการป้อนของเชื้อเพลิงและออกซิเจนเข้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง นอกเหนือจากนี้แล้วยังมีเซลล์เชื้อเพลิง ชนิดอื่น ๆ อีกด้วยโดยจะมีความแตกต่างกันโดยชนิดของ

เชื้อเพลิงที่เข้าทำปฏิกิริยาที่ขั้ว Anode นั้นเองเซลล์เชื้อเพลิงมีหลายชนิดแตกต่างกันไปตามชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ และชนิดของเชื้อเพลิง ปัจจุบันได้แบ่งเซลล์เชื้อเพลิงออกเป็น 6 ชนิด คือ

1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์ (alkaline fuel cell: AFC)
2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอเนตหลอมเหลว (molten carbonate fuel cell: MCFC)
3. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid fuel cell: PAFC)
4. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane fuel cell: PEMFC)
5. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง (solid oxide fuel cell: SOFC)
6. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้อัลกอฮอล์โดยตรง (direct alcohol fuel cell : DMFC)

1.2.1. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้งานได้จริงชนิดแรก โดยทำงานภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจน และออกซิเจน (รูปภาพ 2) โดยทั่วไปเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทำด้วยแพลทินัม ซึ่งมีราคาสูง และใช้สารอัลคาไลน์เช่น สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิของเซลล์ขณะทำงานไม่สูงมากนัก คือประมาณ 150-200 องศาเซลเซียส กลุ่มเซลล์ทั่วไปให้กำลังไฟฟ้าออกมาในช่วง 300 วัตต์ ถึง 20 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ ประมาณร้อยละ 70 เป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่พัฒนาขึ้นมา สำหรับใช้งานภาคพื้นดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับยานยนต์และบ้านพักอาศัย นอกจากนี้ในอดีต องค์กรนาซาได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ขึ้นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและผลิตน้ำดื่มสำหรับใช้ในยานอวกาศ

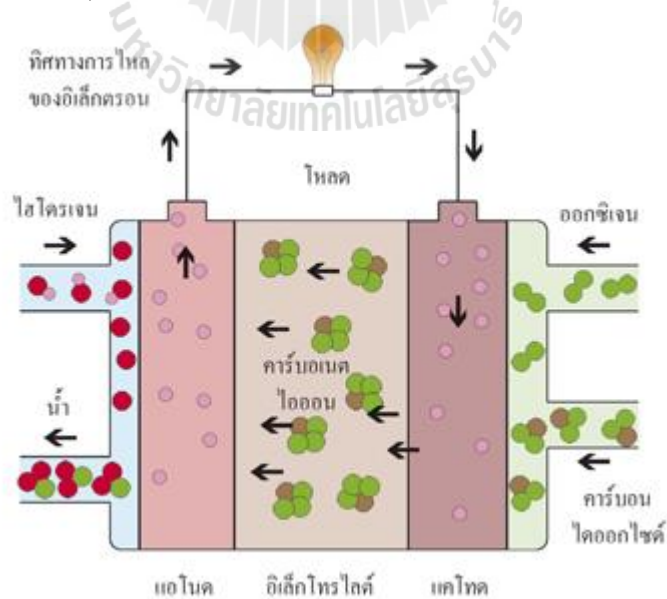


รูปภาพ 2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์

แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์มีข้อได้เปรียบตรงที่มีอัตราส่วนของพลังงานต่อน้ำหนักในเกณฑ์ค่อนข้างสูง ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลคาไลน์จึงเหมาะสำหรับการใช้งานด้านอวกาศ อย่างไรก็ตามการประยุกต์สำหรับงานภาคพื้นดินนั้น ยังมีปัญหาจากการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออน (hydroxyl ion) ในสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารอิเล็กโทรไลต์ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย ดังนั้น การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้งานภาคพื้นดินจึงมุ่งเน้นการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์อย่างอื่น ซึ่งไม่ใช่อัลคาไลน์

1.2.2. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอมเหลว

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอมเหลวเป็นเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอุณหภูมิสูง เคลือบบนคาร์บอนเนตที่นิยมใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ โซเดียมคาร์บอนเนต โพแทสเซียมคาร์บอนเนต และแมกนีเซียมคาร์บอนเนต ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามักใช้โลหะนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้กับเซลล์ชนิดนี้ นิยมผลิตจากถ่านหิน หรือแก๊สธรรมชาติ อุณหภูมิขณะทำงานของเซลล์จะสูงเหนือจุดหลอมเหลวของสารอิเล็กโทรไลต์ คือ ประมาณ 650 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของเซลล์มีประมาณร้อยละ 60-80 จึงนิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่สำหรับโรงไฟฟ้า ตั้งแต่ พ.ศ. 2542 เป็นต้นมา โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่นมีโรงไฟฟ้าที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้หลายแห่ง และมีกำลังผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ 200-1,000 กิโลวัตต์

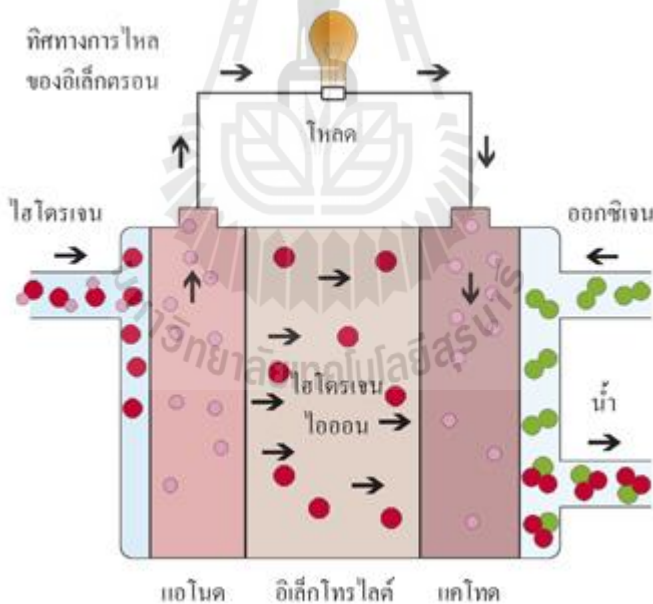


รูปภาพ 3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดคาร์บอนเนตหลอมเหลว

เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิสูง จึงสามารถนำความร้อนจากเซลล์ไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าเสริม ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันความร้อน หรือใช้ทำความอบอุ่นในบ้านเรือนได้ด้วย

1.2.3. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริกใช้เชื้อเพลิงที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแพร่กระจายอยู่บนกระดาษคาร์บอน และใช้กรดฟอสฟอริกในเมทริกซ์ของซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิขณะทำงานอยู่ที่ประมาณ 150-200 องศาเซลเซียส ถึงแม้อุณหภูมิจะไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์มีฤทธิ์เป็นกรด อุปกรณ์ภายในเซลล์จึงต้องสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากกรดได้ดี ประสิทธิภาพของเซลล์มีประมาณร้อยละ 40-80 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกลุ่มเซลล์มีตั้งแต่ 200 กิโลวัตต์ จนถึง 11 เมกะวัตต์ สามารถทำงานได้แม้มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 1.5 นอกจากนี้แก๊สไฮโดรเจนแล้ว ยังสามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงอื่นได้อีกหลายชนิด เช่น แก๊สมีเทน หรือเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนอื่น ที่แยกกำมะถันออกแล้ว

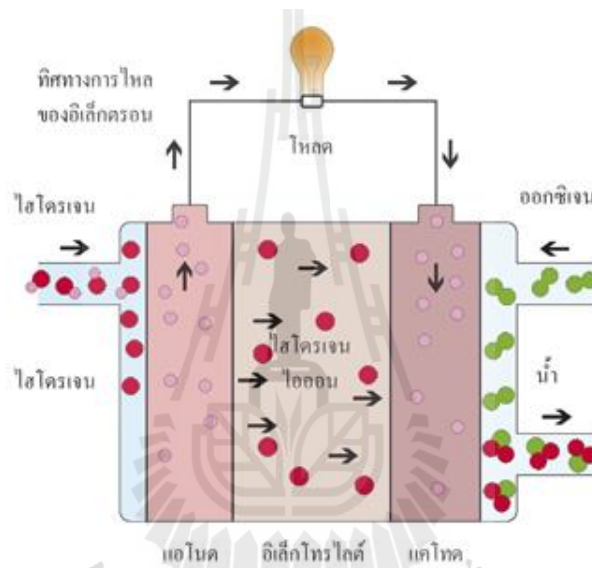


รูปภาพ 4 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดกรดฟอสฟอริก

1.2.4. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนเป็นเซลล์เชื้อเพลิงขนาดกะทัดรัดที่สุด สารอิเล็กโทรไลต์อยู่ในรูปของแผ่นเยื่อบางๆ ที่ไอออนสามารถซึมผ่านได้ ทำจากพอลิเมอร์ชนิดฟลูออโรซัลโฟเนต (fluoro-sulfonate polymers) ซึ่งมีผู้ผลิตหลายรายและมีชื่อทางการค้าต่างๆ กัน เช่น แนฟิออน (Nafion) เฟลมม็อน (Flemion) เอซิเพล็กซ์ (Aciplex) และนีโอเซปตา-เอฟ

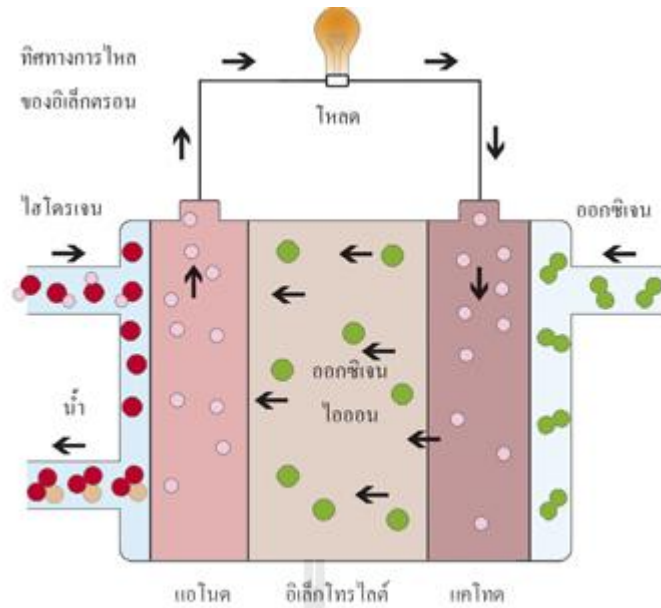
(Neosepta-F) แผ่นเยื่อนี้มีความหนาประมาณ 50-175 ไมโครเมตร ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้กันมากคือ แพลทินัม หรือแพลทินัมผสมโลหะบางชนิด อุณหภูมิขณะทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ที่ประมาณ 80 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 40-50 การต่อเป็นกลุ่มเซลล์สามารถให้กำลังไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 50-250 กิโลวัตต์ และการที่ใช้แผ่นเยื่ออิเล็กโทรไลต์ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่แตกหรือรั่วไหล สามารถทำงานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี ทำให้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีความทนทาน มีขนาดกะทัดรัด และมีน้ำหนักเบากว่าเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น จึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้ในบ้านเรือน ใช้กับรถยนต์หรือยานพาหนะต่างๆ และด้วยเหตุที่แก๊สไฮโดรเจนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ต้องมีความบริสุทธิ์สูง ประกอบกับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองข้าง ของแผ่นเยื่อประกอบด้วยแพลทินัม ซึ่งมีราคาแพงมาก จึงทำให้ต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ สูงมากตามไปด้วย



รูปภาพ 5 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน

1.2.5. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งใช้สารอิเล็กโทรไลต์แข็งเป็นเซรามิกทนความร้อนสูง ที่ทำจากสารประกอบโลหะออกไซด์ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) หรือเซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide) โดยแคโทดทำด้วยโลหะแลนทานัมแมงกานัต (lanthanum manganate) ส่วนแอโนดทำด้วยโลหะ นิกเกิล-เซอร์โคเนีย (nickel-zirconia) ขั้วไฟฟ้าและส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์ทนความร้อนสูงได้ดี โดยสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียสได้ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 60 กลุ่มเซลล์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงถึง 100 กิโลวัตต์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งทำงานที่อุณหภูมิสูงมากและมีขนาดใหญ่ จึงทำให้การนำไปประยุกต์ใช้ ในงานต่างๆ ยังมีอยู่ไม่มากนัก



รูปภาพ 6 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง

1.2.6. เซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลกอฮอล์โดยตรง

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดใช้เมทานอลโดยตรงมีลักษณะคล้ายเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน กล่าวคือเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้แผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนทำหน้าที่เป็นสารอิเล็กโทรไลต์เช่นกัน (รูปภาพ 5) แต่ข้อพิพาทด้านแอโนดต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นที่นอกเหนือจากแพลทินัม ซึ่งส่วนใหญ่มักใช้นิกเกิลทำหน้าที่ให้อัลกอฮอล์แตกตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนไอออน และให้อิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนนี้จะไหลจากแอโนดผ่านวงจรโหลดภายนอกไปสู่แคโทด ขณะเดียวกันแก๊สออกซิเจนที่เข้ามาสู่แคโทดแตกตัวเป็นอะตอมออกซิเจน แล้วรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออน ที่แพร่ผ่านแผ่นเยื่อไปสู่ด้านแคโทดและอิเล็กตรอนเกิดเป็นน้ำ

1.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอัลกอฮอล์โดยตรง (Direct alcohol fuel cell)

แม้ว่าในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งมีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง แต่การที่จะได้มาซึ่งก๊าซไฮโดรเจนนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้ต้นทุนสูงในการผลิต อีกทั้งจำเป็นต้องหาถังจัดเก็บที่มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซอันตราย สามารถติดไฟได้ดี ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงที่มุ่งเน้นในการพัฒนาประยุกต์ใช้สารชีวภาพที่สามารถทำการผลิตขึ้นได้ง่ายในธรรมชาติ ไม่มีปัญหาในการกักเก็บ ให้พลังงานสูง (มีปริมาณของไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุลสูง) และสามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายจากชีวอิเล็กโทรด ซึ่งสารดังกล่าวนั้นก็คือน้ำตาลในหมู่อัลกอฮอล์นั่นเอง ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้แอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง และไม่มี

ต้องใช้อุปกรณ์ เปลี่ยนสภาพเชื้อเพลิงเป็นแก๊สไฮโดรเจน ทำให้สามารถลดขนาดเซลล์ให้เล็กลง จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กเช่น คอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊ก เครื่องเสียงแบบพกพา และโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น ในปัจจุบันอัลกอฮอล์ที่นิยมใช้คือ เมทานอล แต่อย่างไรก็ตามเมทานอลเป็นผลผลิตจากปิโตรเลียม ซึ่งคาดว่าจะมีความผันผวนเป็น อย่างมากในอนาคตและจะได้รับความนิยมลดลงไปในที่สุด ทำให้ขณะนี้ได้มีการให้ความสนใจ กับอัลกอฮอล์อีกชนิดหนึ่งคือเอทานอล ซึ่งเป็นสารที่ได้มีการทำวิจัยทางด้านพลังงานทดแทนกัน อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะการใช้สารตั้งต้นจากการเกษตรนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ เช่น การผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง นั้นจะต้องประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ เช่นการหมัก การกลั่นและการแยกน้ำออกในขั้นตอน สุดท้าย ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จะส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตมีค่าที่สูง และจะต้องจัดหาเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าแบบสันดาปภายใน (internal combustion engine) อีกด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ระบบ การผลิตไฟฟ้าจากเอทานอลมีราคาที่ถูกลง จึงมีแนวความคิดในการเปลี่ยนเอทานอลให้กลายเป็น พลังงานไฟฟ้าด้วยการใช้เซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลโดยตรงหรือที่เรียกว่า direct ethanol fuel cell (DEFC)

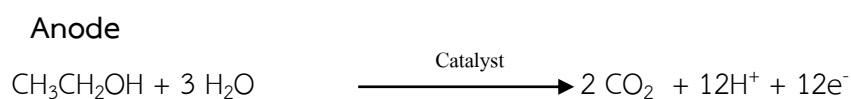
เอทานอล (ethanol) หรือ ไบโอเอทานอล (Bioethanol) เป็นอัลกอฮอล์ที่มีความสำคัญ ที่สุดสำหรับประเทศไทยในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถผลิตได้ง่ายจากวัสดุทางการเกษตร ภายในประเทศได้หลากหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกากน้ำตาลอ้อยและมันสำปะหลัง เป็นต้น สำหรับมันสำปะหลังนั้น จะต้องมีกระบวนการที่เพิ่มเข้ามาคือการย่อยแบ่งให้เป็นน้ำตาลก่อน เรียกว่ากระบวนการ saccharification โดยมีกรใช้น้ำย่อยหรือเอนไซม์สองชนิดคือ อัลฟาอะไมเลส (α -amylase) และ กลูโคอะไมเลส (gluco-amylase) เนื่องจากยีสต์ไม่มี เอนไซม์ดังกล่าว ในตัวเอง การผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นได้รับการสนับสนุนจากทางภาครัฐเป็น อย่างมากทั้งการผลิตในเชิงพาณิชย์และในระดับของการวิจัยค้นคว้า โดยปัจจุบันมีโรงงานผลิตเอทานอลสำหรับเป็นเชื้อเพลิงอยู่เป็นจำนวนมากและมีกำลังผลิตรวมกันมากกว่าหนึ่งล้านลิตรต่อวัน สำหรับเอทานอลบริสุทธิ์สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้โดยการเติมผสมกับน้ำมันเบนซิน 91 ในอัตราส่วนเอทานอล 1 ส่วนต่อน้ำมัน 9 ส่วนเพื่อปรับเพิ่มค่าออกเทน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น แก๊สโซฮอล์ E 10 เป็นการลดปริมาณการใช้น้ำมันเบนซินลง สามารถลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันยังจะมีการส่งเสริมให้มีการเพิ่มอัตราส่วนของเอทานอลในน้ำมันเบนซินให้ มากขึ้นเช่นการผลิตแก๊สโซฮอล์ E20 และ E85 เป็นต้น ซึ่งคาดว่าในอนาคตจะเป็นการลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศได้ถึงปีละกว่าแสนล้านบาท การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของเมทานอลและเอทานอลบริสุทธิ์สามารถดูได้จาก ตาราง 1

ตาราง 1. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเอทานอล

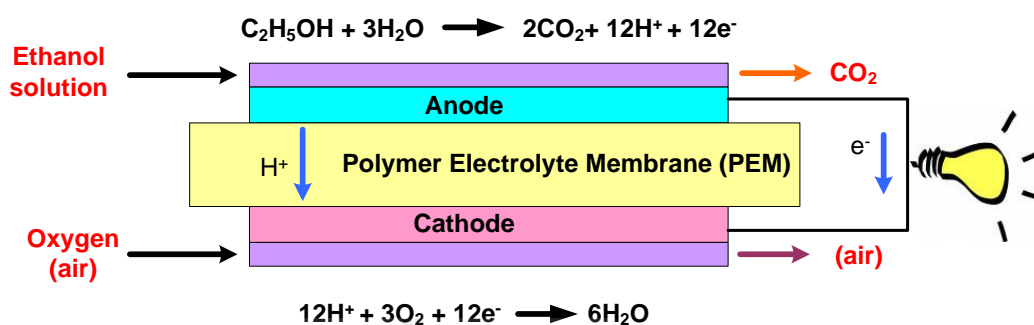
สมบัติ	เมทานอล	เอทานอล
สูตรโครงสร้าง	CH ₃ OH	CH ₃ CH ₂ OH
มวลโมเลกุล	32	46
จุดเดือด (°C)	64.6	78.32
อุณหภูมิวิกฤต (°C)	239.6	243.1
ความหนาแน่นที่ 20 °C, g.cm ⁻³	0.791	0.7893
ความร้อนของการสันดาป, kJ.kg ⁻¹	22.7	29.68
อุณหภูมิที่ติดไฟได้เอง (°C)	460	360

นอกเหนือจากการใช้เอทานอลสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในแล้ว ยังมีงานวิจัยถึงการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงจากแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ ด้วย (Lamy *et al.*, 2004) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลล์เชื้อเพลิงเมทานอล (Direct Methanol Fuel Cell) ซึ่งมีการผลิตออกมาในเชิงพาณิชย์เรียบร้อยแล้ว แต่อย่างไรก็ตามเมทานอลเป็นสารที่มีพิษต่อสิ่งมีชีวิตสูง ถึงแม้ว่าราคาของเมทานอลจะมีราคาถูกกว่าเอทานอลก็ตาม ทำให้งานวิจัยในปัจจุบันได้ให้ความสำคัญกับเอทานอล ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีพลังงานสูง (29.68 kJ.kg⁻¹) ผลิตได้จากวัสดุทางการเกษตรหลายชนิดเช่น กากน้ำตาลอ้อย มันสำปะหลังซึ่งมีมากภายในจังหวัดนครราชสีมา หรือแม้กระทั่งวัสดุจำพวกเซลลูโลสต่าง ๆ ที่กำลังมีงานวิจัยอย่างมากมายในปัจจุบัน นอกจากนี้แล้วเอทานอลยังง่ายต่อการทำให้บริสุทธิ์และการขนส่ง ทำให้เอทานอลเป็นสารเคมีที่น่าสนใจที่สุดในการประยุกต์เป็นเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าว

เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเอทานอลโดยตรง ใช้สารละลายเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในด้านขั้วไฟฟ้า Anode โดยที่เอทานอล 3 โมลจะทำปฏิกิริยากับน้ำ 3 โมล และเมื่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะเกิดผลิตภัณฑ์คือคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 2 โมล ในขณะที่ด้านขั้ว Cathode ก็ยังใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน โดยที่ออกซิเจน 3 โมลจะรับอิเล็กตรอนและโปรตรอนกลายเป็นน้ำ 6 โมล ดังสมการ



ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่า 1 โมลของเอทานอลนั้นจะสามารถผลิตอิเล็กตรอนได้ถึง 12 โมล และสามารถเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าได้จำนวนประมาณ 1.16×10^6 คูอมบ์, C โดยที่แผนผังการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลสามารถแสดงได้โดยรูปภาพ 7



รูปภาพ 7 แผนผังการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลเมื่อเกิดการออกซิไดซ์ที่สมบูรณ์

แต่อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญของการออกซิไดซ์เอทานอลโดยใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical oxidation) นั้นเป็นเรื่องที่ยากมากทั้งนี้เนื่องจากว่าขณะนี้ยังไม่มีขั้วไฟฟ้าที่สามารถทำให้เกิดการออกซิไดซ์เอทานอลอย่างสมบูรณ์และที่อัตราเร็วสูง อีกทั้งยังเกิดปัญหาของการออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์หรือเรียกว่าการออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) ทำให้เกิดสารตัวกลาง (intermediates) ต่าง ๆ เช่น CH_3COH , CH_3CO , CH_x , และ CO โดยผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นคือ อะเซทัลดีไฮด์ (acetaldehyde) กรดอะซิติก (acetic acid) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่ง acetaldehyde และ acetic acid เป็นสารที่ถูกออกซิไดซ์ต่อได้ยาก (Mann *et al.*, 2006) ในปัจจุบันยังไม่มีสารค้นพบถึงสาเหตุที่เกิดการออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์นี้และเหตุใดการออกซิไดซ์ acetaldehyde และ acetic acid จึงเป็นไปได้ยาก โดยทั่วไปแล้วขั้วไฟฟ้า Anode ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการออกซิเดชันของเอทานอลนั้น จะเป็นโลหะจำพวกแพลทตินั่มผสม (Platinum-based catalysts) ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการออกซิไดซ์เอทานอลได้ดีกว่าการใช้แพลทตินั่มอย่างเดียว (Ermete, 2007) โดยจุดสำคัญที่สุดของงานวิจัยเหล่านี้คือการพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่สามารถแตกพันธะระหว่างคาร์บอน (C-C bond) ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดอีกด้วย (Wang and Liu, 2008)

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาปฏิกิริยาการออกซิเดชันของเอทานอลที่ขั้วอะโนดโดยใช้โลหะหลายชนิดและเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าแพลทตินั่มจะให้ประสิทธิภาพในการแตกพันธะระหว่างคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากได้กล่าวมาแล้วว่าการใช้แพลทตินั่มเพียงอย่างเดียว นั้น มักจะเกิดสารตัวกลางขึ้น ในปัจจุบันได้มีความพยายามในการพัฒนาขั้วอะโนดให้เป็นโลหะผสม (alloy) โดยมีการใช้โลหะชนิดต่าง ๆ มาผสมรวมเข้ากับแพลทตินั่มเช่น

Ruthenium (Ru), Tin (Sn), Rhodium (Rh), Tungsten (W), Palladium (Pd), Osmium (Os) และโลหะชนิดอื่น ๆ (Kowal *et al.*, 2009) โดยอาจจะทำการผสมโลหะสองชนิด (binary catalysts) หรือสามชนิด (ternary catalysts) ก็ได้ โดยโลหะที่ทำการผสมลงไปนี้จะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาการแตกตัวของพันธะ C-C ซึ่งเป็นพันธะที่แตกตัวได้ยากที่สุดในโมเลกุลของเอทานอล โดยจะช่วยให้การแตกตัวของเอทานอลเป็นได้ได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น จุดประสงค์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการใช้โลหะผสมคือการลดต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตลง ทั้งนี้เนื่องจากว่าแพลทตินั่มเป็นโลหะที่มีราคาสูง หากลดต้นทุนในการผลิตขั้วไฟฟ้า anode ได้ก็จะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นมีค่าที่ต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนาการผลิตขั้วไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้เป็นที่คาดการณ์ว่าในอนาคตจะมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยที่ลดลง

Kamarudin *et al.*, 2013 ได้กล่าวถึงการพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่ไม่ใช้โลหะแพลทตินั่มในการประยุกต์ใช้ใน DEFC ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของบริษัท NDC power โดยทางบริษัทได้อ้างว่าสามารถผลิตขั้วไฟฟ้าสำหรับ DEFC ซึ่งสามารถมีอายุการทำงาน (operating lifetime) ที่มากกว่า 3,700 ชั่วโมงแบบต่อเนื่อง โดยไม่ต้องมีการ regenerate ขั้วไฟฟ้าแต่อย่างใด

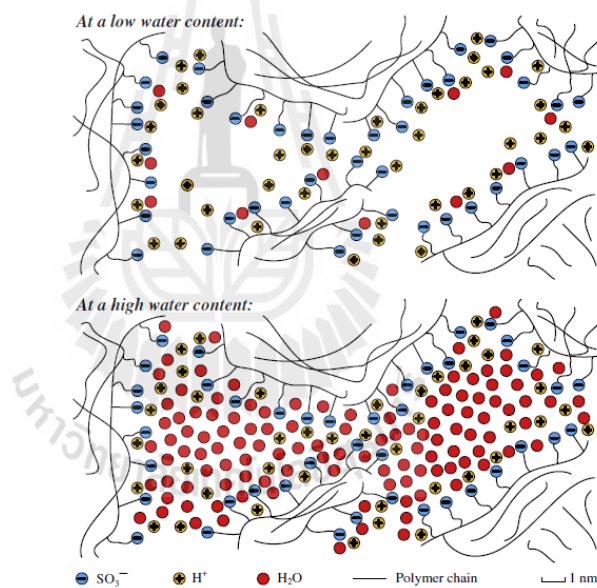


รูปภาพ 8 การประยุกต์ใช้ DEFC ในการเป็นแหล่งพลังงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ (Kamarudin *et al.*, 2013)

1.3.1 กลไกการนำโปรตอนของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน (PEM)

การนำโปรตอนของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์นั้นแบ่งออกเป็น 2 แบบคือกลไกการกระโดด (Hopping or Jumping Mechanism) และกลไกที่มีโมเลกุลของสารที่เป็นพาหนะ (Vehicle Mechanism) ซึ่งแผ่นเมมเบรนที่มีค่าการดูดน้ำสูงนั้นพบว่ากลไกการนำโปรตอนในแผ่นเมมเบรนจะเกิดได้ทั้งสองแบบ แต่ในกรณีที่เมมเบรนมีการดูดซับน้ำต่ำกลไกการส่งผ่านโปรตอนจะเกิดแบบกลไกที่มีโมเลกุลของสารเป็นพาหนะมากกว่า เนื่องจากกลไกการกระโดดจะเกิดขึ้นได้ยากเพราะการขนส่งโปรตอนไปยังฝั่งแคโทดจะเกิดขึ้นได้ช้า

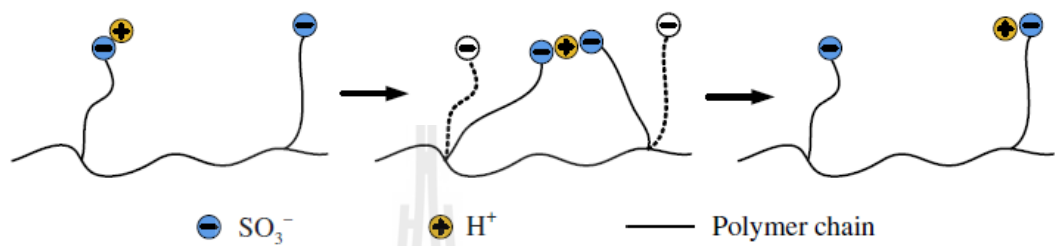
กลไกที่มีโมเลกุลของสารเป็นพาหนะ (Vehicle mechanism)



รูปภาพ 9 แสดงโครงสร้างระดับไมครอนของเนฟิออนที่มีปริมาณน้ำต่ำและสูง (Jiao, 2011)

รูปภาพ 9 แสดงโครงสร้างของเนฟิออนเมมเบรนที่มีปริมาณน้ำต่ำและปริมาณน้ำสูง โดยที่ปริมาณน้ำในเมมเบรนต่ำนั้น น้ำจะไปเกาะอยู่ที่สายโซ่กิ่งและยึดติดกับหมู่ SO₃⁻ ในสถานการณ์นี้ โปรตอนจะถูกถ่ายโอนผ่านทางช่องว่างจากประจุหนึ่งไปยังอีกประจุหนึ่ง โดยโปรตอนจะเกิดการยึดเหนี่ยวอย่างหลวมๆกับหมู่ SO₃⁻ ซึ่งเป็นไปได้ว่าจะเกิดการถ่ายโอนจากสายโซ่หนึ่งไปยังอีกสายโซ่หนึ่งดังรูปภาพ 10 ซึ่งอธิบายได้ว่าสายโซ่กิ่งของพอลิเมอร์นั้นเกิดการสั่นขึ้นในปริมาตรอิสระและเมื่อทิศทางในการสั่นที่เหมาะสมทำให้สายโซ่ทั้งสองเคลื่อนที่มาใกล้กันระยะทางในการเคลื่อนย้าย

โปรตอนลดลงทำให้โปรตอนเกิดการถ่ายโอนจากสายโซ่หนึ่งไปยังอีกสายโซ่หนึ่งได้ การสั้นของสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเกิดได้ดีขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงยืนยันถึงเหตุผลที่พอลิเมอร์สามารถเหนี่ยวนำโปรตอนได้มากกว่าวัสดุเหนี่ยวนำโปรตอนชนิดแข็งอื่นๆ เช่น เซรามิกส์



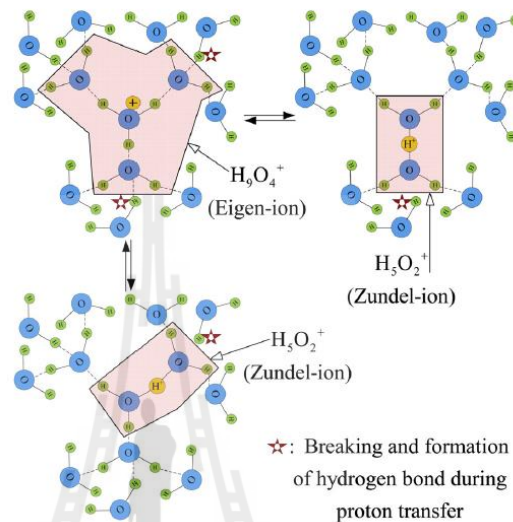
รูปภาพ 10 แสดงการเคลื่อนย้ายโปรตอนโดยตรงในสายโซ่เนฟออน (Jiao, 2011)

การถ่ายโอนโปรตอนโดยการยึดติดกับโมเลกุลของน้ำโดยการเกิดไอออนไฮโดรเจน-น้ำขึ้นเช่น H_3O^+ , H_5O_2^+ การแพร่ผ่านของ H_3O^+ เกิดขึ้นจากบริเวณที่มีความเข้มข้นของโปรตอนสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของโปรตอนต่ำ ทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเกิดได้สะดวกขึ้น ซึ่งเรียกว่ากลไกการนำโปรตอนแบบมีพาหนะ (vehicle mechanism) แต่หาก H_3O^+ เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำอาจจะทำให้เกิดการหน่วงการเคลื่อนย้ายโปรตอนได้เช่นกัน

- กลไกการกระโดด (Proton Tunneling or Hopping)

สำหรับเมมเบรนที่มีปริมาณน้ำในเมมเบรนที่สูงดังแสดงในรูปภาพ 11 นั้นการเคลื่อนที่ของโปรตอนที่อยู่ในรูปแบบของ H_3O^+ จะเคลื่อนที่จากโมเลกุลของน้ำโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลอื่นๆของน้ำได้โดยตรง ซึ่งไม่ได้ยึดเกาะกับโมเลกุลของน้ำโมเลกุลใดโมเลกุลหนึ่งโดยเฉพาะ แต่เปลี่ยนแปลงการยึดเกาะไปเรื่อยๆ ซึ่งเรียกกลไกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่ากลไกการกระโดด(hopping mechanism) ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงแผนผังของการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านโมเลกุลของน้ำโมเลกุลต่างๆ โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของโปรตอนจะทำให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นไอออนที่แตกต่างกัน คือในกรณีไฮโดรเนียมไอออนยึดเกาะกับโมเลกุลของน้ำโมเลกุลข้างเคียง 3 โมเลกุลจะเกิดการฟอร์มตัวเป็น H_9O_4^+ (Eigen-ion) แต่เมื่อเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของไฮโดรเนียมไอออนไปจากเดิม และเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำข้างเคียง 2 โมเลกุลจะเกิดการฟอร์มตัวเป็น H_5O_2^+ (Zundel-ion) ซึ่งการเกิดการ

เปลี่ยนไปมาระหว่าง H_9O_4^+ (Eigen-ion) และ H_5O_2^+ (Zundel-ion) นั้นเกิดจากการแตกของพันธะไฮโดรเจนและการฟอร์มตัวของพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ข้างเคียงไฮโดรเนียมไอออน



รูปภาพ 11 แผนผังของการเคลื่อนที่ของโปรตอนในน้ำด้วยกลไกการกระโดด (Jiao, 2011)

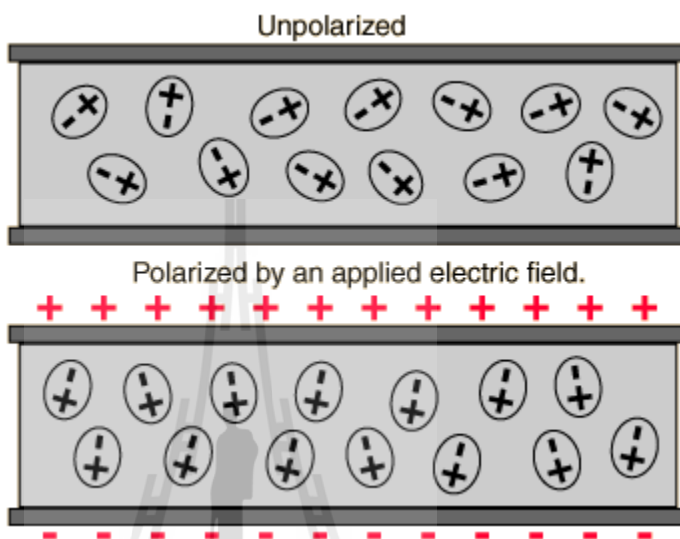
1.3.2 สมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมีสมบัติต้านทานการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าความเป็นฉนวน (หรือไดอิเล็กทริก) โดยมีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (electrical conductivity, σ) น้อยกว่า 10^{-9} S cm^{-1} แต่หากมีการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารเคมีบางชนิด จะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนจากความเป็นฉนวนไปเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductors) ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามากกว่า 10^{-9} S cm^{-1} แต่น้อยกว่า 10^{-2} S cm^{-1} และบางชนิดอาจจะกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า (conductors) ซึ่งมีค่าการเหนี่ยวนำมากกว่าหรือเท่ากับ 10^2 S cm^{-1} โดยทั่วไปแล้วสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกได้หลายอย่างได้แก่

- สมบัติไดอิเล็กทริกหรือสภาพยอมสัมพัทธ์

ในกรณีของพอลิเมอร์ไม่มีประจุที่เคลื่อนที่อิสระจะอยู่รวมกันตรงจุดศูนย์กลางของอะตอมหรือนิวเคลียสซึ่งในพันธะโควาเลนต์ส่วนใหญ่คู่อิเล็กตรอนที่สัมพันธ์กันจะค่อนข้างอยู่ใกล้กับนิวเคลียสมากกว่า ซึ่งนิวเคลียสหนึ่งจะกลายเป็นลบมากกว่าหรือบวกมากกว่านั้นอยู่ที่ไดโพลถาวรที่ถูกสร้างขึ้น แต่เมื่อมีการใช้สนามไฟฟ้าส่งผลให้ไดโพลเกิดการหมุนตามทิศทางของสนามไฟฟ้านั้น ซึ่งจะทำให้

กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าส่วนกลุ่มประจุลบจะถูกผลักไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้โมเมนต์ขดลวดของสารเกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้นดังรูปภาพ 12



รูปภาพ 12 โพลาริซชันของไดอิเล็กทริก

สภาพยอมของวัสดุ (permittivity, ϵ) ที่จะใช้วัดความสามารถในการเกิดโพลาริซชันของวัสดุในสนามไฟฟ้านั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความจุในการเก็บประจุของพอลิเมอร์ซึ่งค่าความจุในการเก็บประจุคือความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุเมื่อให้ความต่างศักย์แก่วัสดุนั้น

ความสามารถในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุ คือปริมาณประจุไฟฟ้าที่ทำให้ตัวนำมีค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 หน่วย ตัวนำใดมีความจุไฟฟ้ามาก แสดงว่าจะต้องใช้ประจุไฟฟ้าจำนวนมากในการทำให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ตัวนำใดมีความจุไฟฟ้าน้อย ศักย์ไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นจากเดิมมาก ถ้าให้ความต่างศักย์กับตัวเก็บประจุ C แล้ว ประจุ Q จะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อความต่างศักย์ V ที่ใช้ และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเก็บประจุ C ซึ่งเป็นสัดส่วนคงที่ นั่นคือ

$$Q = CV$$

เมื่อ Q คือ จำนวนประจุไฟฟ้าที่ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)

V คือ ศักย์ไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็น คูลอมบ์/โวลต์ (C/V) หรือ ฟารัด (F)

ค่าความเก็บประจุของตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับสภาพยอม (permittivity, ϵ) ของวัสดุไดอิเล็กทริก พื้นที่ของตัวเก็บประจุ (A) และระยะห่างของแผ่นเหนี่ยวนำ (d) ดังนั้นค่าสภาพยอมกับความเก็บประจุจะสัมพันธ์กันตามสมการ

$$C = \epsilon(A/d)$$

แต่หากไดอิเล็กทริกที่ใช้เป็นสื่อนำอากาศความเก็บประจุจะเท่ากับ

$$C_0 = \epsilon_0(A/d)$$

เมื่อ ϵ_0 คือสภาพยอมของสุญญากาศ (มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (k) จะเป็นอัตราส่วนของสภาพยอมของวัสดุ (ϵ) ต่อสภาพยอมของสุญญากาศ (ϵ_0) คือ

$$k = \epsilon / \epsilon_0$$

เมื่อ ϵ_0 คือสภาพยอมของสุญญากาศ (มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m)

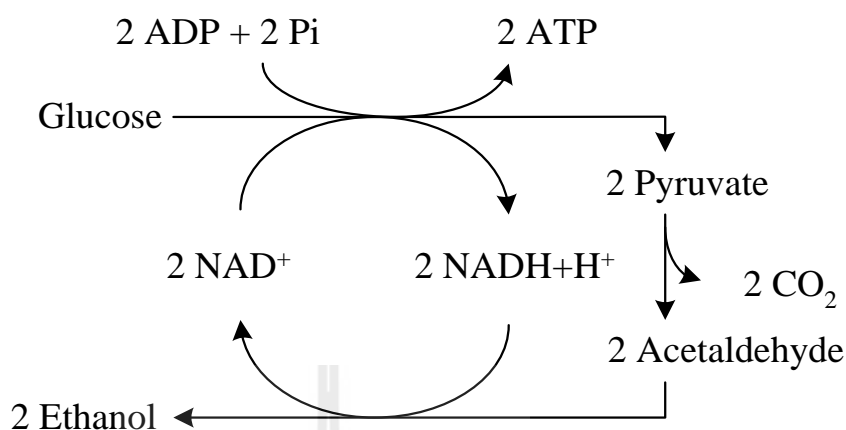
ดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 1 วัสดุทุกชนิดที่สามารถเกิดโพลาริเซชันได้มากกว่าสุญญากาศค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมากกว่า 1 เสมอ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในวัสดุบางชนิดจะขึ้นอยู่กับความถี่ เช่นพอลิเมอร์เนื่องจากสามารถเกิดการโพลาริเซชันโดยความถี่ได้ วัสดุใดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ จะมีสภาพยอมทางไฟฟ้าต่ำด้วยหรือมีความสามารถในการเกิดโพลาริเซชันต่ำและเก็บประจุได้น้อย โดยวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำนั้นจะมีสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี ส่วนวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะมีสภาพยอมมากและจะเก็บประจุไว้ได้สูง ซึ่งเหมาะสมในการทำเป็นตัวเก็บประจุ หรือมักถูกใช้ในหน่วยความจำซึ่งเก็บข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบของประจุ สำหรับค่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วเช่น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) และ พอลิเอทิลีน (PE) นั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะห่างของอะตอมระหว่างโมเลกุลมากขึ้น

แต่สำหรับพอลิเมอร์มีขั้วนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะ ไดโพลจะเกิดการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น โดยเฉพาะที่ใกล้กับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วหรือ T_g ทั้งนี้

หากมีการเติมสารที่มีซัลฟอนไปในพอลิเมอร์จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นด้วยเช่นในกรณีของ ไนลอนที่เป็ยกขึ้นซึ่งมีน้ำอยู่ในพอลิเมอร์ หรือกรณีของการเติมเข้ามาดำในยาง ไอโซพรีนที่เชื่อมขวาง แล้ว หรือในกรณีการเติมผงโลหะในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Elias, H-G., 1997)

1.4 การผลิตเอทานอลจากกระบวนการหมัก

น้ำตาลกลูโคสเป็นสารตั้งต้นสำหรับเอนไซม์จากเชื้อยีสต์โดยน้ำตาลดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนให้เป็นเอทานอล ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นผลพลอยได้ (วิธี Embden-Meyerhof) นอกจากเชื้อยีสต์แล้วยังมีเชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ที่น่าสนใจในการผลิตเอทานอลสำหรับอุตสาหกรรมอีกด้วยเช่นเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* และเชื้อยีสต์ *Kluyveromyces sp.* สำหรับปฏิกิริยาชีวเคมีในการเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอลนั้นจะอยู่ภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่ง น้ำตาลจะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดไพรูวิกโดยผ่านทางวิถีไกลโคไลซิส ซึ่งกระบวนการหมักนี้จะผลิต พลังงานให้เชื้อยีสต์โดยมีการผลิตเอทานอลและ CO_2 สำหรับวิถีไกลโคไลซิสนั้นจะมีการเติมฟอสเฟต 2 โมเลกุลเข้าไปในน้ำตาลก่อนที่จะแตกตัวกลายเป็น glyceraldehyde-3-phosphate ซึ่งเป็นสารที่มีคาร์บอน 3 อะตอมจำนวน 2 โมเลกุลก่อนที่จะถูกออกซิไดซ์เป็นไพรูเวตต่อไปดังแสดงในรูปภาพ โดยที่จะมีการผลิต ATP สุทธิ 2 โมเลกุลจากน้ำตาล 1 โมเลกุล (Hofmeyr, 1997) ในสภาวะที่มีออกซิเจน ไพรูเวตดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนให้เป็น acetyl-CoA ก่อนที่จะเข้าสู่วงจรเครป โดยที่ acetyl-CoA จะถูกออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์และมีการผลิต ATP จากกระบวนการ oxidative phosphorylation ในการเปรียบเทียบกันจะพบว่ากระบวนการหมักเอทานอลจะทำให้มีการผลิต ATP เป็นจำนวนน้อยกว่ากระบวนการ oxidative phosphorylation โดยที่การหมักเอทานอลซึ่งผ่านวิถี ไกลโคไลซิสจะมีการผลิต ATP เพียง 2 โมเลกุลในขณะที่กระบวนการ oxidative phosphorylation จะมีการผลิต ATP ถึง 36 โมเลกุลจากน้ำตาล 1 โมเลกุลดังแสดงในรูปภาพ 13



รูปภาพ 13 แสดงวิถี Embden-Meyerhof (Bailey and Ollis, 1986).

1.4.1 การพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอล

การหมักเอทานอลสามารถหมักได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรหลายชนิดเช่น กากน้ำตาล อ้อย ข้าวฟ่างหวาน เซลลูโลส (cellulosic ethanol) และจากมันสำปะหลังเป็นต้น ในกรณีที่วัตถุดิบเป็นจำพวกแป้ง มีความจำเป็นต้องใช้เอ็นไซม์ในการย่อยแป้งให้กลายเป็นน้ำตาลก่อน จากนั้นจะใช้เชื้อยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำตาลในถังหมักให้เป็นเอทานอล ซึ่งกระบวนการหมักนั้นจะดำเนินจนกระทั่งปริมาณน้ำตาลได้หมดลง หรือกระบวนการหมักสิ้นสุดเนื่องจากปฏิกิริยาการยับยั้งการเจริญของเชื้อยีสต์อันเนื่องมาจากปริมาณเอทานอลที่สะสมในน้ำหมัก ก่อนที่จะนำน้ำหมักดังกล่าวไปกลั่นลำดับส่วนต่อไป โดยปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักแบบกะโดยทั่ว ๆ ไปในระดับอุตสาหกรรมสามารถແจกແจงได้ดังนี้

1). เอทานอลเป็นสารพิษต่อเซลล์ของเชื้อยีสต์ มีรายงานว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ 1-2% สามารถ ก่อให้เกิดความเครียดในเชื้อยีสต์ได้และความเข้มข้นของเอทานอลที่ประมาณ 10% จะทำให้การหมัก สิ้นสุดลง เป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่เชื้อยีสต์หยุดกิจกรรมและตายไปในที่สุดเนื่องจากเอทานอลจะเข้าไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ให้สูญเสียคุณลักษณะในการควบคุมการเลือกผ่านสารเข้า-ออกเซลล์ ทำให้เซลล์ยีสต์ไม่สามารถนำเอน้ำตาลเข้าเซลล์และเอาเอทานอลออกจากเซลล์ได้ ทำให้เซลล์ยีสต์ตายในที่สุด มีรายงานวิจัยหลายด้านที่พยายามจะเพิ่มปริมาณของเอทานอลจากการหมัก เช่นการพัฒนาเชื้อที่ทนต่อความเป็นพิษของเอทานอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยในการแยกเอทานอลออกจากน้ำหมัก ในระหว่างที่การหมักกำลังดำเนินไปโดยใช้

เทคนิคต่าง ๆ เช่น การใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการสกัดเอาเอทานอลออกมา การใช้เยื่อแผ่น (membrane processes) และการอัดก๊าซ (gas stripping) เป็นต้น

2). หลังจากที่กระบวนการหมักสิ้นสุดลงแล้วในถังหมัก (Fermentor) ขั้นตอนต่อไปที่สำคัญคือ การทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ โดยน้ำหมักดังกล่าวจะถูกนำไปให้ความร้อนโดยใช้หอกลั่น เพื่อให้ได้เอทานอลที่บริสุทธิ์ต่อไป แต่เนื่องจากการกลั่นแบบธรรมดา นั้น จะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเอทานอลและน้ำจะเกิดของผสมอะซีโอโทรป (azeotropic mixture) ที่ความเข้มข้นดังกล่าวนั่นเองและจะไม่สามารถแยกเอาน้ำส่วนที่เหลือออกจากระบบได้ด้วย การกลั่นแบบธรรมดาอีกต่อไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มขึ้นขั้นตอนการแยกน้ำส่วนเกินนี้ ออกอีกขั้นตอนหนึ่ง คือการใช้ molecular sieve ชนิด 3 หรือ 4 อังสตรอม เพื่อผลิตเป็นไปเอทานอลต่อไป โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว การกลั่นลำดับส่วนเป็นวิธีการแยกของเหลวที่สามารถระเหยได้ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มีหลักการเพื่อต้องการแยกองค์ประกอบในสารละลายให้ออกจากกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแยกองค์ประกอบที่มีความแตกต่างของจุดเดือดไม่มากนัก การกลั่นลำดับส่วนเหมาะสำหรับใช้กลั่นของเหลวที่เป็นองค์ประกอบของสารละลายที่จุดเดือดต่างกันน้อย ๆ เช่นการแยกเอทานอลกับน้ำ โดยกระบวนการกลั่นลำดับส่วนจะเป็นการนำไอของแต่ละส่วนไปควบแน่นแล้วนำไปกลั่นซ้ำและควบแน่นไอของส่วนกลั่นนั้นไปเรื่อย ๆ ภายในหอกลั่นหรือคอลัมน์ โดยคอลัมน์ของการกลั่นลำดับส่วนแบบทั่วไปจะมีลักษณะเป็นชั้นซ้อนกันหลายชั้น โดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบ cap tray แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการพัฒนาการกลั่นเอทานอลในระดับห้องปฏิบัติการคือการคำนวณจำนวนของชั้นของหอกลั่นเพื่อที่จะให้ได้ความเข้มข้นของสารที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่นจำนวนชั้นภายในหอกลั่นของเอทานอลเพื่อกลั่นให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 95 นั้น จะต้องใช้จำนวนชั้นที่มากกว่า 70 ชั้น ทำให้จำเป็นต้องสร้างหอกลั่นที่มีความสูงมาก ส่งผลให้มีต้นทุนในการก่อสร้างที่สูง ใช้พลังงานในการกลั่นสูง นอกจากนี้แล้วการดูแลรักษายังลำบากอีกด้วย

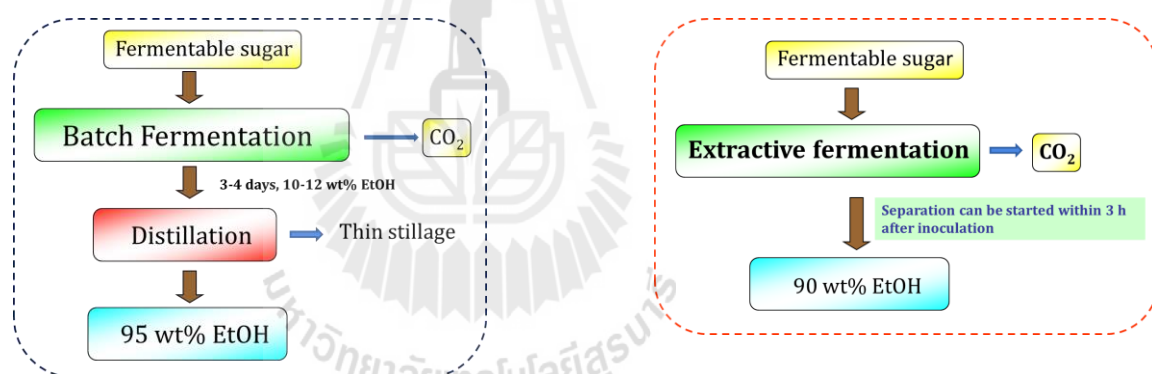


รูปภาพ 14 แสดงหอกลิ้นแบบ cap tray ของโรงงานผลิตไบโอเอทานอลแห่งหนึ่ง

1.4.2 การพัฒนาระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่น ลำดับส่วนแบบสุญญากาศ

กล่าวโดยสรุปแล้ว ปัญหาหลักของการพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเด็นคือ 1.) การเกิดการยับยั้งจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลให้สามารถผลิตเอทานอลได้ประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ปัญหาด้านอื่น ๆ ของการหมักก็ยังมีอยู่เช่น การในน้ำเป็นปริมาณมากในการผสมกับกากน้ำตาลอ้อย ส่งผลให้น้ำกากสาซึ่งเป็นของเสียมีปริมาณมากตามไปด้วย และ 2.) หอกลิ้นลำดับส่วนมีราคาแพง ทำให้ค่าก่อสร้างมีราคาสูงไปด้วย ดังนั้นโรงงานผลิตเอทานอลจึงไม่มีการผลิตในระดับเล็ก นักวิจัยโดย รศ. ดร. อภิชาติ บุญทาวัว จึงได้นำเสนอแนวความคิดใหม่ในการพัฒนาระบบการหมัก โดยการแยกเอทานอล บริสุทธิ์สูง ออกจากน้ำหมักควบคู่ไปกับกระบวนการหมัก (*in situ* product removal หรือ extractive fermentation) ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมนั้น พบว่ามีงานวิจัยเกี่ยวกับการแยกเอทานอลออกควบคู่ไปกับกระบวนการหมักโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การใช้ตัวทำละลาย (solvent extraction) การใช้เยื่อแผ่น (pervaporation) และ การใช้สุญญากาศ (vacuum fermentation) เป็นต้น โดยแนวความคิดของการแยกผลิตภัณฑ์เอทานอลออกจากกระบวนการหมักนี้ จะทำให้มีข้อดีหลายประการคือ เอทานอลจะถูกแยกออกจากกระบวนการอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้ไม่เกิดความเป็นพิษของเอทานอลต่อเชื้อยีสต์ โดยที่ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักมีค่า

ต่ำอยู่เสมอ ทำให้สามารถทำการเพิ่มผลิตผล (volumetric productivity) ของเอทานอลได้นอกจากนี้จากการที่ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักต่ำอยู่เสมอ ทำให้สามารถใช้ความเข้มข้นของยีสต์ที่สูง (high-cell-density fermentation) หรือการหมักด้วยน้ำตาลเข้มข้น (high substrate concentration) ได้ อันจะเป็นการส่งผลให้ขนาดของถังหมักเล็กลงเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตที่เท่ากันจากการหมักแบบกะ (batch fermentation) เนื่องจากเชื้อยีสต์จะสามารถผลิตเอทานอลได้ในปริมาณที่มากขึ้น แต่ผลการทดลองจากเทคนิคต่างๆ ที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมนั้น พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้นั้น มักจะไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งเอทานอลที่สกัดได้นั้น จึงจำเป็นที่จะต้องนำเข้าสู่กระบวนการกลั่นอีกครั้งหนึ่ง สำหรับแนวความคิดของนักวิจัยคือต้องการสกัดเอทานอลความเข้มข้นร้อยละมากกว่า 90 ควบคู่กับกระบวนการหมัก โดยเอทานอลนี้สามารถนำเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วนซ้ำอีก



รูปภาพ 15 เปรียบเทียบการผลิตไบโอเอทานอลจากกระบวนการหมักโดยทั่ว ๆ ไป (ซ้าย) และการแยกควบคู่กับกระบวนการหมัก (ขวา)

รูปภาพ 15 แสดงการเปรียบเทียบแนวความคิดของการแยกควบคู่กับการหมัก (extractive fermentation) กับกระบวนการหมักแบบกะ (Batch fermentation) ซึ่งในระหว่างการหมักแบบกะนั้น หลังจากที่ทำกรเติมกล้าเชื้อแล้ว เชื้อยีสต์จะใช้เวลาประมาณ 3-4 วันในการหมักและได้ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักก่อนกระบวนการกลั่นลำดับส่วนประมาณร้อยละ 10-12 ขั้นตอนต่อไปคือการกลั่นลำดับส่วนเพื่อที่จะกลั่นเอทานอลให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักต่อไป ส่วนการแยกควบคู่กับกระบวนการหมักนั้น ขั้นตอนการแยกเอทานอลสามารถที่จะเริ่มได้หลังจากเติมเชื้อยีสต์ลงไปประมาณ 3 ชั่วโมง และตั้งที่ได้กล้าวมาแล้ว หากมีระบบที่สามารถแยกเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 90 % ควบคู่กับกระบวนการหมักได้

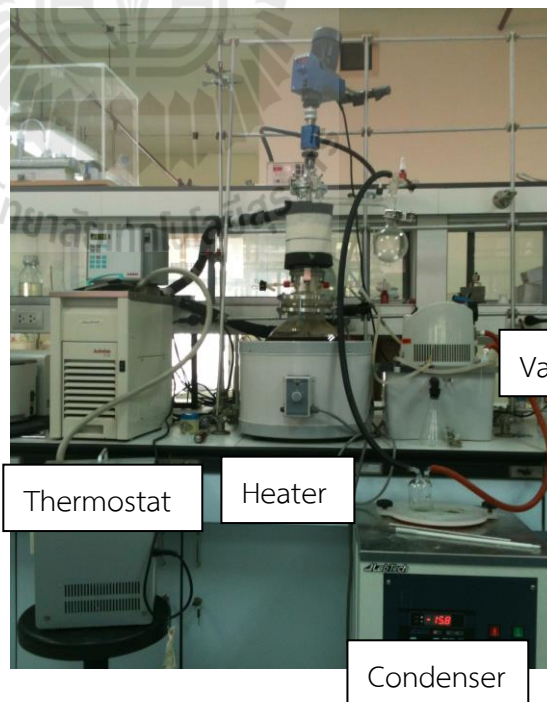
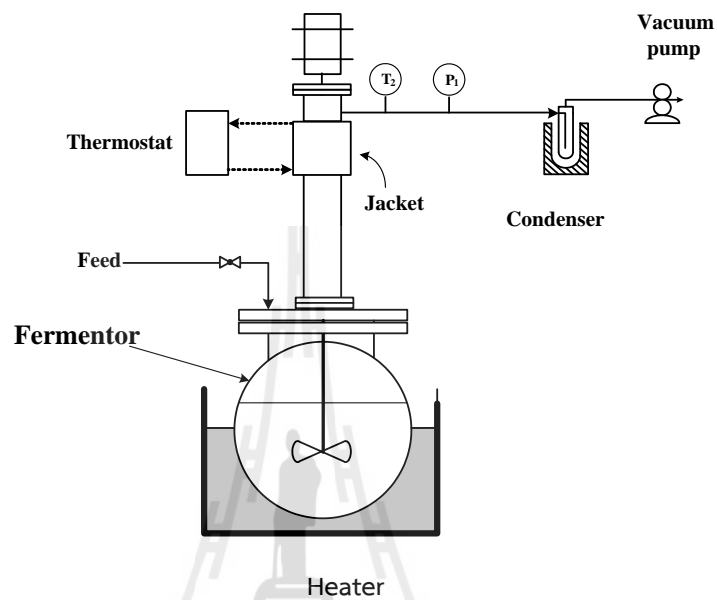
นั่นก็จะเป็นประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากสามารถนำเอทานอลที่ผลิตได้นี้เข้าสู่การแยกน้ำเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเอทานอลได้โดยตรง โดยไม่ต้องทำการกลั่นซ้ำอีกรอบหนึ่ง ซึ่งจากการพิจารณาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอลนั้น พบว่ามีความสามารถในการกลายเป็นไอสูงกว่าน้ำ กล่าวคือเอทานอล มีจุดเดือดอยู่ที่ 78 องศาเซลเซียส ดังนั้นกระบวนการที่เหมาะสมในการแยกเอทานอลออกจากน้ำก็คือการกลั่นลำดับส่วน ส่วนการใช้สมบัติอย่างอื่นจะทำให้การแยกทำได้ค่อนข้างยาก เช่นการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการสกัดจะพบปัญหาสำคัญคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแยก (distribution coefficient) ที่ต่ำ โดยเฉพาะเอทานอลซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังจำเป็นต้องทำการกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกผลิตภัณฑ์ออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ภายหลังจากการสกัดอีกด้วย

1.5 จุดประสงค์ของโครงการวิจัย

1. พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือก โดยการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้า anode และ cathode ชนิดต่าง ๆ และประกอบเป็นเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าว
2. ศึกษาถึงประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้ในการออกซิไดซ์เอทานอลให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะการทดลองต่าง ๆ และทำการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวให้มีกำลัง 1 กิโลวัตต์
3. นำผลการทดลองที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการนานาชาติ

บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมเอทานอลจากกระบวนการหมัก



รูปภาพ 16 การทดลองการผลิตเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ

รูปภาพ 16 เป็นการทดลองการผลิตเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ ผู้วิจัยโดย รศ.ดร. อภิชาติ บุญทาวัน ได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ โดยได้ทำการยื่นขอจดสิทธิบัตรเครื่องมือนี้ดังกล่าวเรื่อง “กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ควบคู่กับกระบวนการหมัก” 28 กุมภาพันธ์ 2557 เลขที่คำขอ 1401001518 โดยระบบมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

1. ถังหมัก ในที่นี้เป็นโถแก้วขนาด 10 ลิตร วางอยู่ใน heating mantle เพื่อรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสม
2. หอกกลั่นประสิทธิภาพสูง โดยตัวจะเป็นคอลัมน์ (column) ลักษณะเป็นท่อกลวง มีสองชั้น (jacket) โดยชั้นนอกจะใช้สำหรับไหลเวียนสารให้ความเย็นและทำการควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องทำความเย็น หรือที่เรียกว่า thermostat โดยหอกกลั่นประสิทธิภาพสูงนี้จะถูกวางไว้บนโถแก้วและยึดติดกันด้วยประเก็นยาง
3. แกนหมุน (drive shaft) ด้านบนสุดต่อเข้ากับมอเตอร์กระแสตรงขนาด 120 วัตต์ ที่ปรับความเร็วการหมุนได้ โดยแกนหมุนจะต่อเข้ากับหัวขับแบบแม่เหล็ก (magnetic drive) โดยมีการออกแบบให้สามารถทำงานในสภาวะสุญญากาศได้ดี แกนหมุนนี้เมื่อประกอบเข้ากับคอลัมน์แล้ว จะอยู่ ณ จุดกึ่งกลางของคอลัมน์พอดี และจะทำหน้าที่ในการยึดใบพัดโดยมีจำนวนใบพัดทั้งหมด 5 อัน และมีระยะห่างระหว่างตัวใบพัดที่เท่า ๆ กัน

ในหลักการการทำงานของระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศนั้น เริ่มต้นจะทำการหมักเอทานอล ซึ่งจะใช้อ่างน้ำตาลอ้อยผสมกับน้ำให้ได้ความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solid) ประมาณ 30 °Brix จากนั้นจะเติมยีสต์ลงไป 10 กรัมต่อลิตร ในระหว่างการหมักจะทำการลดความดันบรรยากาศให้ต่ำลงเหลือประมาณ 65 มิลลิบาร์ด้วยเครื่องทำสุญญากาศแบบ aspirator ซึ่งจะทำให้น้ำหมักเดือดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการหมักปกติ เอทานอลซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าจะกลายเป็นไอ และลอยขึ้นสู่ด้านบนของหอกกลั่น โดยจะมีความเข้มข้นของเอทานอลบริเวณผิวหน้าของน้ำหมักประมาณ 25% เท่านั้น เมื่อไอผสมของน้ำและเอทานอลลอยเข้าสู่บริเวณที่มีการควบคุมอุณหภูมิผ่านท่อ jacket จะมีการใช้ระบบทำความเย็น (Thermostat) ในการลดอุณหภูมิของไอผสมดังกล่าวลง ซึ่งหากควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม จะทำให้เกิดการควบแน่นของน้ำบางส่วนกลายเป็นของเหลวไหลกลับลงสู่ถังหมัก ก่อนที่ไอของเอทานอลบริสุทธิ์ความเข้มข้นร้อยละประมาณ 90 โดยน้ำหนักจะยังคงสถานะที่เป็นไอและถูกแยกออก กลายเป็นส่วน

กลั่น (distillate) ต่อไป ซึ่งในห้องปฏิบัติการนั้นส่วนกลั่นนี้จะถูกทำให้ควบแน่นโดย condenser ซึ่งใช้อุณหภูมิเย็นจัด (-20 องศาเซลเซียส) ควบคู่กับการใช้ไนโตรเจนเหลว (cold trap) สำหรับส่วนกลั่นเอทานอลความเข้มข้นประมาณร้อยละ 90 ที่ได้นี้ จะใช้เป็นแหล่งพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเอทานอลโดยตรงต่อไป

2.2 การเตรียมเมมเบรนพอลิเมอร์สำหรับแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEM)

สารเคมี

1. น้ำยาล้างชนิดแอมโมเนียสูงซึ่งมีปริมาณเนื้อยาล้าง 60%
2. ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุล 500,000 กรัมต่อโมล มีระดับดีอะซิทิลเลชัน 85 % ผลิตโดยบริษัท seafresh industry public company limited
3. กรดฟอร์มิก (CHOOH) เข้มข้นร้อยละ 94 ใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์ยาง ENR ผลิตโดยบริษัท BASF-YPC Company Limited
4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้นร้อยละ 50 ใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์ยาง ENR ผลิตโดยบริษัท Thai Peroxide Co., LTD.
5. กรดเทอร์ริก 16A 16 เป็นสารรักษาความเสถียรให้น้ำยาล้างธรรมชาติในการสังเคราะห์ยาง ENR ผลิตโดยบริษัท CCM Chemicals Sdn. Bhd.
6. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้นร้อยละ 95-98 เป็นสารที่ใช้แช่เมมเบรนเพื่อให้เกิดกระบวนการ Protonation ซึ่งจะเป็นการเพิ่มโปรตอนให้แก่เมมเบรน ผลิตโดยบริษัท J.T. Baker Neutrasorb.
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริสุทธิ์ร้อยละ 99 ใช้เป็นสารมาตรฐานในการทดสอบการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรน ผลิตโดยบริษัท Merk KGaA, Germany
8. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 94 ใช้ไทเทรตกับสารละลาย NaOH ที่ผ่านการแช่เมมเบรนเพื่อหาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน ผลิตโดยบริษัท J.T. Baker Neutrasorb.

2.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

2.3.1 การเตรียมเมมเบรนไคโตซาน

1. เตรียมสารละลายไคโตซานเข้มข้น 2% w/v ในกรดฟอร์มิกเข้มข้น 10% v/v โดยกวนทิ้งไว้ 1 คืนแล้วนำมากรองแยกส่วนที่ไม่ละลายออก
2. เทสารละลายไคโตซานใส่แผ่นกระจกปริมาณ 15 กรัม

3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง
4. แช่ในสารละลาย NaOH เข้มข้น 10% w/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ล้างเมมเบรนด้วยน้ำกลั่นจน น้ำที่ล้างมีค่าเป็นกลางแล้ววางให้แห้ง
6. นำไปแช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 %v/v เป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60 นาทีและ 24 ชม.
7. ล้างเมมเบรนด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH เป็นกลาง
8. นำไปอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสประมาณ 1 ชั่วโมง
9. เก็บเมมเบรนไว้ในเดซิเคเตอร์จนกว่าจะนำไปใช้ต่อไป

2.3.2 เตรียมน้ำยารธรรมชาติดีฟ็อกไซด์และเมมเบรนยารธรรมชาติดีฟ็อกไซด์

1. นำน้ำยารธรรมชาติที่มีปริมาณเนือยงแห้งร้อยละ 60 มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาณเนือยงแห้งร้อยละ 20 แล้วเติมสารรักษาสภาพลงไป
2. นำน้ำยารที่เตรียมจากข้อ 1 ไปกวนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
3. เติมกรดฟอร์มิกเข้มข้น 10%v/v ลงไปในน้ำยารโดยใช้เวลาในการเติมประมาณ 1 ชั่วโมง
4. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในปฏิกิริยาโดยใช้เวลาหยุดประมาณ 3 ชั่วโมง
5. ปลอ่ยให้เกิดปฏิกิริยาต่อไปอีก 1 ชั่วโมง จากนั้นหยุดปฏิกิริยา แล้วลดอุณหภูมิ น้ำยารที่เตรียมได้จนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วแบ่งเป็น 2 ส่วนโดยส่วนหนึ่งเก็บไว้ในตู้เย็น 1 คืน ก่อนนำมาใช้ อีกส่วนหนึ่งนำไปจับตัวด้วยเมทานอลแล้วรีดเป็นแผ่นบางจากนั้นนำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชม. แล้วเก็บไว้เพื่อนำไปทดสอบสมบัติอื่นๆเปรียบเทียบต่อไป
6. นำน้ำยารธรรมชาติดีฟ็อกไซด์ที่แช่ในตู้เย็นจากข้อ 5 มาเทใส่แผ่นกระจกแล้วอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชม. จากนั้นนำไปปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 %v/v เป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60 นาทีและ 24 ชม.
7. ล้างเมมเบรนด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH เป็นกลาง
8. นำไปอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง
9. เก็บเมมเบรนไว้ในเดซิเคเตอร์จนกว่าจะนำไปใช้ต่อไป

2.3.3 เตรียมสารผสมระหว่างโคโตซานกับยารธรรมชาติดีฟ็อกไซด์

1. เตรียมสารละลายโคโตซานเข้มข้น 1, 2, 3, 4 % w/v ในกรดฟอร์มิกเข้มข้น 10%v/v โดยกวนทิ้งไว้ 1 คืนแล้วนำมากรองแยกส่วนที่ไม่ละลายออก
2. นำน้ำยารธรรมชาติที่มีปริมาณเนือยงแห้งร้อยละ 60 มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาณเนือยงแห้งร้อยละ 20 แล้วเติมสารรักษาสภาพลงไป

3. นำน้ำยางที่เตรียมจากข้อ 2 ไปกวนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
4. เติมสารละลายโคโตซานเข้มข้น 1, 2, 3, 4 % w/v ในกรดฟอร์มิกเข้มข้น 10%v/v ลงไปในน้ำยางแต่ละสูตรโดยใช้เวลาในการเติมประมาณ 1 ชั่วโมง
5. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในปฏิกิริยาโดยใช้เวลาหยุดประมาณ 3 ชั่วโมง
6. ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาต่อไปอีก 1 ชั่วโมง จากนั้นหยุดปฏิกิริยา แล้วลดยุณหภูมิ น้ำยางที่เตรียมได้จนถึงอุณหภูมิห้อง

2.3.4 เตรียมเมมเบรนผสมระหว่างโคโตซานกับยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR)

1. นำสารผสมจากข้อ 3.3.3 ออกจากตู้เย็นแล้วกวนจนอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง
2. เทใส่แผ่นกระจก
3. นำไปอบในตู้อบอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชม.
4. ลอกเมมเบรนแล้วนำไปปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 %v/v เป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60 นาทีและ 24 ชม.
5. ล้างเมมเบรนด้วยน้ำกลั่นจนน้ำที่ล้างมีค่าเป็นกลาง
6. นำไปอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสประมาณ 1 ชั่วโมง
7. เก็บเมมเบรนไว้ในโถแก้วดูความชื้นจนกว่าจะนำไปใช้ต่อไป

2.4 การทดสอบคุณลักษณะเมมเบรนผสมระหว่างโคโตซานกับยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์

2.4.1 การทดสอบสมบัติทางเคมี

การทดสอบสมบัติทางเคมีของเมมเบรนในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบขึ้นตัวอย่างที่เตรียมเป็นแผ่นบาง ด้วยเครื่อง FTIR โดยใช้เทคนิค attenuate total reflectance (ATR) ทำการวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$

2.4.2 การทดสอบสมบัติด้านสัณฐานวิทยา

ในการทดสอบหากเป็นการดูพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างสามารถตัดชิ้นตัวอย่างขนาดประมาณ 1×1 ซม. ส่วนกรณีของการทดสอบภาพตัดขวางของชิ้นตัวอย่างต้องนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ในไนโตรเจนเหลว แล้วหักชิ้นตัวอย่างก่อน จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างที่ต้องการทดสอบติดบนแท่งทองเหลือง จากนั้นทำการฉาบด้วยทองคำโดยใช้เครื่อง sputter coater จำนวน 1 ครั้ง เป็นเวลา 120 วินาทีแล้วนำไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

2.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

ใช้การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer รุ่น Rheometric Scientific DMTA V, USA โดยใช้เทคนิค Dual Cantiliver แบบ Dynamic Temperature Ramp ที่ความถี่ 1.0 Hz ความเครียด 0.1% อุณหภูมิ -90 - 90 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

2.4.4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

การทดสอบทางไฟฟ้าของเมมเบรนในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบค่าต่างๆดังนี้คือ ค่าคงที่ ไดอิเล็กทริก ค่าลอสแฟคเตอร์ และค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของเมมเบรนโดยใช้เครื่อง Precision LCR meter รุ่น Agilent 4285A (รูปที่ 3.4) ที่ช่วงความถี่ 75 kHz ถึง 30 MHz โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างตัดเป็นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. จากการวัดจะได้ค่าการเหนี่ยวนำที่ความถี่ต่างๆ ค่าแฟกเตอร์สูญเสีย ($\tan \delta$) และค่าความจุไฟฟ้า (Cp)

2.4.5 สมบัติการดูดซับน้ำ

ตัดเมมเบรนขนาดประมาณ 2 x 2 ซม. แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างไว้ จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปใส่ขวดทดสอบที่เตรียมไว้แล้วเติมน้ำกลั่น ปริมาณ 25 มล. จากนั้นปิดฝาแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อให้เกิดการดูดซับน้ำอย่างเต็มที่ จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างที่แช่ในน้ำครบ 24 ชม. แล้วมาชั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างด้วยกระดาษชั่งให้แห้งอย่างรวดเร็ว แล้วชั่งบนเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าน้ำหนักชิ้นตัวอย่างไว้ แล้วนำไปคำนวณหาค่าร้อยละของการดูดซับน้ำ

2.4.6 สมบัติการดูดซับเอทานอล

การวัดการดูดซับเอทานอลของเมมเบรนนั้น ใช้วิธีการวัดแบบเดียวกับการวัดสมบัติการดูดซับน้ำ แต่เปลี่ยนตัวทำละลายจากน้ำกลั่นมาเป็นเอทานอล

2.4.7 การหาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน

1. ชั่งเมมเบรนแห้งให้มีน้ำหนักประมาณ 20 มิลลิกรัม
2. แช่ในสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล ปริมาตร 15 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนอย่างสมบูรณ์

3. คูดสารละลาย NaOH ในข้อ 2 มาไทเทรตกับ HCl เข้มข้น 0.005 นอร์มอล โดยจุด-ยุติจะมีความค่า pH เท่ากับ 7 แล้วคำนวณค่าความสามารถในแลกเปลี่ยนไอออน

2.4.8 สมบัติการนำโปรตอน

ตัดชิ้นตัวอย่างขนาด 3 ซม. x 3 ซม. แล้วนำไปแช่ในน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นซับน้ำที่ผิวให้แห้ง แล้ววัดความหนาของชิ้นตัวอย่าง และทำการทดสอบหาค่าความต้านทาน R ที่ความถี่ 10 kHz ด้วยเครื่อง LCR meter รุ่น HEWLETT PACKARD 4263B โดยใช้หัววัดแบบขนาน รูปร่างกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. จากนั้นนำค่า R ที่ได้ไปคำนวณหาค่าการนำโปรตอน (σ , ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร) ตามสมการ

$$\sigma = \frac{l}{R \cdot S}$$

เมื่อ

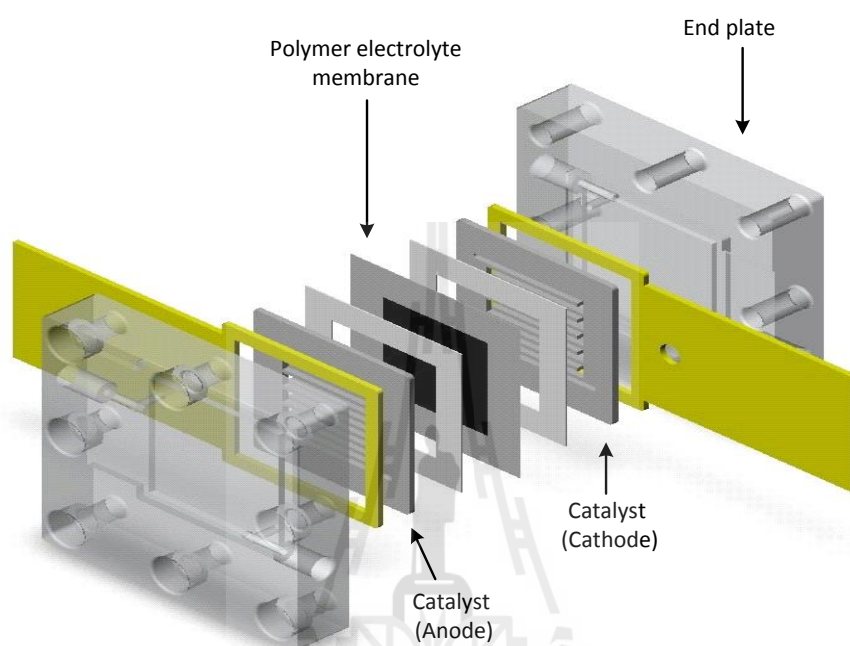
- l = ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (เซนติเมตร)
- R = ความต้านทาน (โอห์ม)
- S = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

2.5 การประกอบเซลล์เชื้อเพลิง (Membrane Electrode Assembly, MEA)

การประกอบเซลล์เชื้อเพลิงนั้นเป็นการจัดเรียงเยื่อแผ่นที่ผ่านการไหลของไฟฟ้า Anode และ Cathode เรียบร้อยแล้ว ให้มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกันเป็นชั้น ๆ (stack) เพื่อให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าตามต้องการ จากนั้นจะมีการประกอบตัวเรือน (housing หรือ End plate) ซึ่งทำจาก acrylic สำหรับสำหรับขั้นตอนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลนั้น จะแสดงหลักการทำงานได้ดังรูปภาพ 17

ซึ่งด้าน Anode นั้นจะเป็นการไหลเวียนสารละลายเอทานอล จากนั้นในด้านของขั้วไฟฟ้า Cathode จะเป็นการทำเป็นช่องให้อากาศไหลเวียนเท่านั้น โดยที่ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับโปรตรอนและอิเล็กตรอนได้เป็นโมเลกุลของน้ำออกมา ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลนี้จะถูก ทดสอบในระบบปิด หรือที่เรียกว่า cyclic voltametry โดยจะมีการใช้ตัวต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์ม (1 k Ω) ทำให้สามารถที่จะติดตามถึงลักษณะและประสิทธิภาพการผลิตกระแสของระบบได้ นอกจากนี้แล้วยังจะมีการติดตามถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงโวลต์ตลอดระยะเวลาของการทดลองโดยมีการใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (National Instrument, USA) นอกจากนี้แล้ว ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงที่

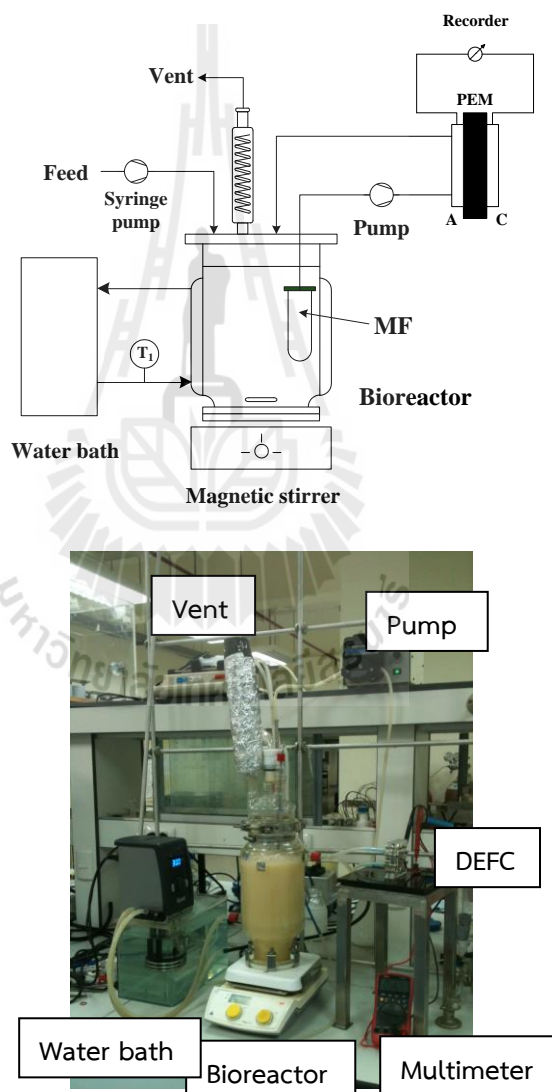
ประกอบขึ้น จะสามารถแสดงโดยการเปรียบเทียบกับค่าออกซิไดซ์เอทานอลโดยสมบรูณ์ดังสมการ (1) ซึ่งในการอ้างอิงนั้น จะมีการผลิตอิเล็กตรอนจำนวน 12 โมลต่อเอทานอล 1 โมล



รูปภาพ 17 แสดงการจัดการทดลองสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเอทานอลโดยตรง

2.6 ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลโดยตรง

ทำการเลี้ยงเซลล์ยีสต์ในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ เพื่อทำการผลิตเอทานอล จากนั้นจะทำการกรองผ่านเยื่อแผ่นชนิด ไมโครฟิวเตรชัน (micro-filtration, MF) เพื่อทำการกรองเซลล์ออก ก่อนที่จะนำส่วนที่กรองได้ (filtrate) มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) ดังที่ได้แสดงดังรูปภาพ 18



รูปภาพ 18 การจัดการทดลองถึงปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลโดยตรง

บทที่ 3 ผลการทดลองและบทวิจารณ์

3.1 การผลิตเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสูญญากาศ

3.1.1 การศึกษาลักษณะของการยับยั้งจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

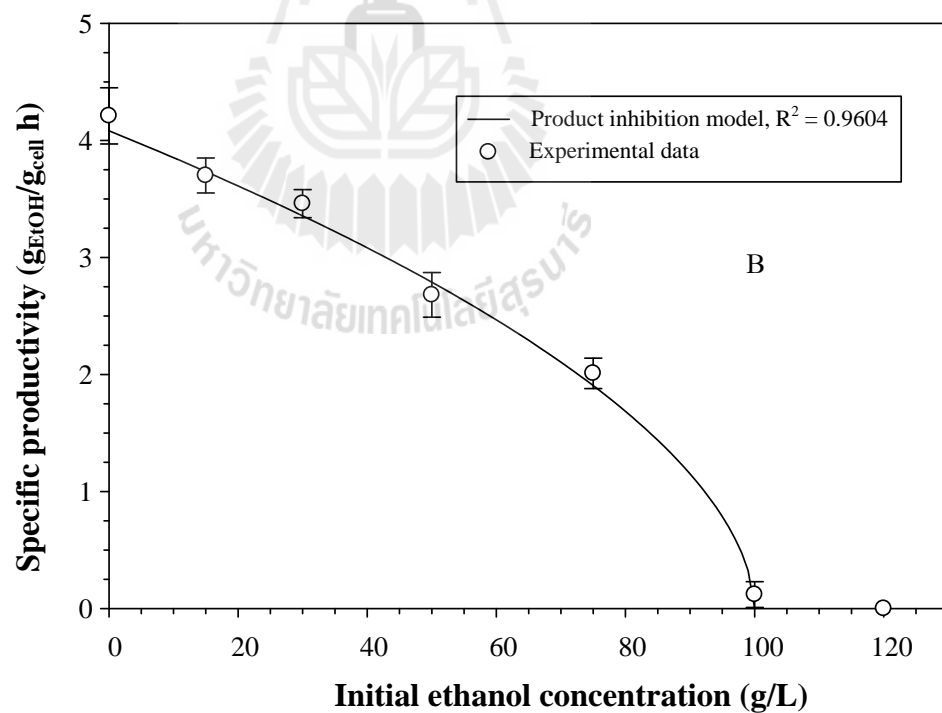
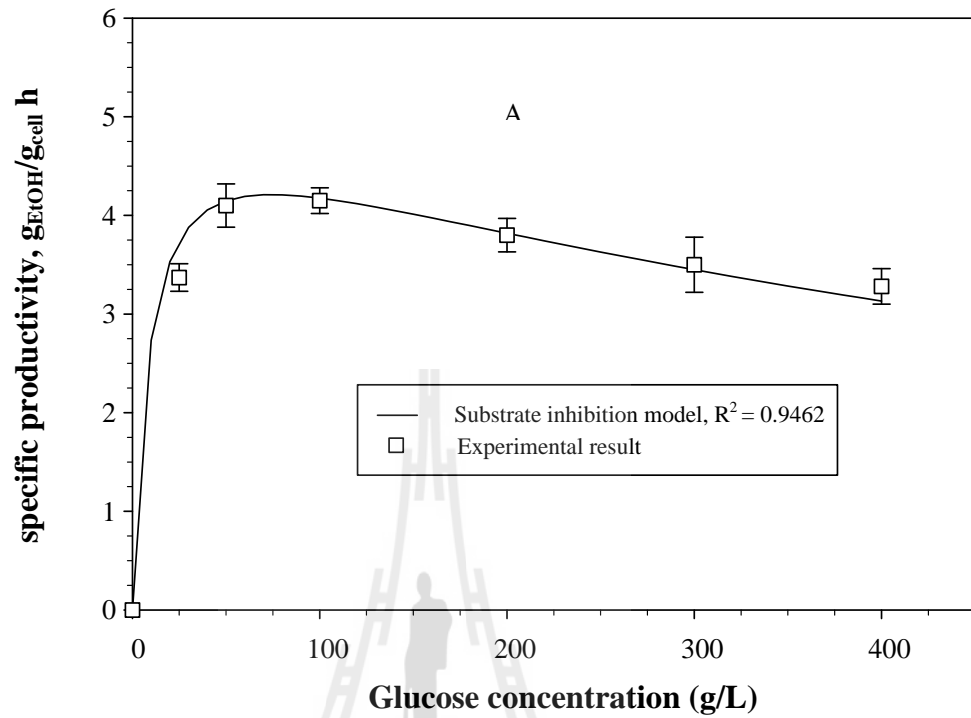
การศึกษาจลศาสตร์ของการยับยั้งอันเนื่องมาจากแหล่งคาร์บอนและผลิตภัณฑ์เอทานอลนั้น ได้ถูกศึกษาอย่างเป็นระบบ โดยในขั้นตอนแรกนั้นได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่มีต่อค่าอัตราการสร้างเอทานอล โดยทั่วไปแล้ว การใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลสูงนั้น มักจะส่งผลทำให้อัตราการสร้างเอทานอลในน้ำหมักมีค่าสูงขึ้นไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่สูงนี้ อาจส่งผลกระทบต่อเชื้อยีสต์ได้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) นั่นเอง นอกจากนี้ความเข้มข้นของน้ำตาลที่สูง จะส่งผลทำให้ผลพลอยได้อื่น ๆ เช่น กลีเซอรอล กรดอะซิติกและฟิวเซลอย (fusel oil) มีปริมาณที่สูงขึ้นตามไปด้วย ในการทดลองนี้ ได้ทำการแปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาลระหว่าง 100-400 กรัมต่อลิตร โดยได้ทำการวัดอัตราการเพิ่มขึ้นของเอทานอลในช่วงแรก ๆ ของการทดลองที่ความชันของกราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาลที่มีต่ออัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะ (กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ต่อชั่วโมง) ได้ถูกแสดงในรูปภาพ 19 (A) โดยผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่มีต่อค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะนั้น ค่อนข้างอ่อน กล่าวคือค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 4.08 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ต่อชั่วโมง ณ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาล 100 กรัมต่อลิตร และเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้น อัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะมีค่าลดลงเล็กน้อยโดยมีค่า 3.80, 3.52, และ 3.28 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ต่อชั่วโมง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาลอยู่ที่ 200, 300, และ 400 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการยับยั้งจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ดังสมการ

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

โดยที่ v = อัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะ, v_{\max} คือค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะสูงสุด, S ความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอน, K'_S คือค่าคงที่ของการอิ่มตัว, K'_i คือค่าคงที่ของการยับยั้งจากสารตั้งต้น, P คือความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (เอทานอล) และ P'_m คือความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์สูงสุดที่ทำให้เกิดการยับยั้งอย่างสมบูรณ์แบบตามลำดับ นอกจากนี้เลขยกกำลัง a_i แสดงถึง

ค่าคงที่ที่เป็นเลขยกกำลังในส่วนของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการพล็อตกราฟของความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าที่ได้จากการทดลองนั้น มีความใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่า r^2 อยู่ที่ 0.9462 ค่าคงที่ของการอิมิตัว (K'_S) และค่าคงที่ของการยับยั้งจากสารตั้งต้น (K'_I) ในการทดลองนี้ สามารถคำนวณได้ที่ 8.92 และ 620.71 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งค่า K'_I ที่มีค่าสูงนี้ บ่งบอกความหมายเป็นนัยว่ากระบวนการหมักสามารถทำได้โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลที่สูงได้ โดยความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นในช่วง 200-300 กรัมต่อลิตร ค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะไม่ลดลงจากค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะสูงสุดมากนัก ซึ่งส่งผลในการทำให้ถังหมักมีขนาดที่เล็กลง เป็นการลดต้นทุนของการผลิตลงได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้นมีอิทธิพลต่อค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากเอทานอลเป็นสารที่มีพิษต่อเซลล์ยีสต์ค่อนข้างสูง ในการทดลองนี้ได้ทำการแปรผันค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลในน้ำหมักตั้งแต่ 0-120 กรัมต่อลิตรและกำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาลที่ 100 กรัมต่อลิตร ซึ่งผลการทดลองในรูปภาพ 19 (B) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักมีอิทธิพลอย่างสูงกับประสิทธิภาพในการหมักของเชื้อยีสต์ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของเอทานอลจะมีในปริมาณที่เล็กน้อยก็ตาม ค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะจะมีค่าสูงสุดเมื่อปราศจากเอทานอลในระบบ และค่าดังกล่าวจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อมีเอทานอลอยู่ในระบบมากยิ่งขึ้น โดยผลการทดลองพบว่า ณ ความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้น 75 กรัมต่อลิตร ค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะจะลดลงประมาณร้อยละ 50 ของค่าสูงสุดเมื่อปราศจากเอทานอล ก่อนที่ค่าดังกล่าวจะลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าเกือบเป็นศูนย์เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลเท่ากับ 100 กรัมต่อลิตร ในขณะที่ ณ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอล 120 กรัมต่อลิตร ค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่ง ณ จุดนี้ อัตราการใช้น้ำตาลของเชื้อยีสต์พบว่าเป็นศูนย์ ถึงแม้ว่าจะมีน้ำตาลเริ่มต้นอยู่มากมายในระบบก็ตาม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกระบวนการหมักแบบกะทั่ว ๆ ไปนั้น อัตราการผลิตเอทานอลในน้ำหมักจะมีค่าสูงสุดเมื่อเริ่มต้นกระบวนการหมัก และเมื่อเชื้อยีสต์ทำการผลิตเอทานอล ความเข้มข้นของเอทานอลในระบบจะมีค่ามีสูงขึ้น และจะส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับการใช้น้ำตาลและความสามารถในการผลิตเอทานอลของเชื้อยีสต์ กล่าวคืออัตราการใช้ น้ำตาลและอัตราการผลิตเอทานอลจะมีลักษณะแปรผกผันกับความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมัก ยิ่งความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักมีมากเท่าใด อัตราการใช้น้ำตาลและอัตราการผลิตเอทานอลก็จะลดลงมากขึ้นเท่านั้น ในอุตสาหกรรมนั้น การหมักเอทานอลแบบกะจะใช้เวลาประมาณ 3-4 วัน ก่อนที่จะนำน้ำหมักดังกล่าวไปทำการกลั่นลำดับส่วนเพื่อผลิตเป็นไบโอเอทานอลต่อไป



รูปภาพ 19 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น (A) และความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้น (B) ที่มีค่าอัตราการผลิตเอทานอลจำเพาะ

3.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ jacket ต่อส่วนกลั่นเอทานอล

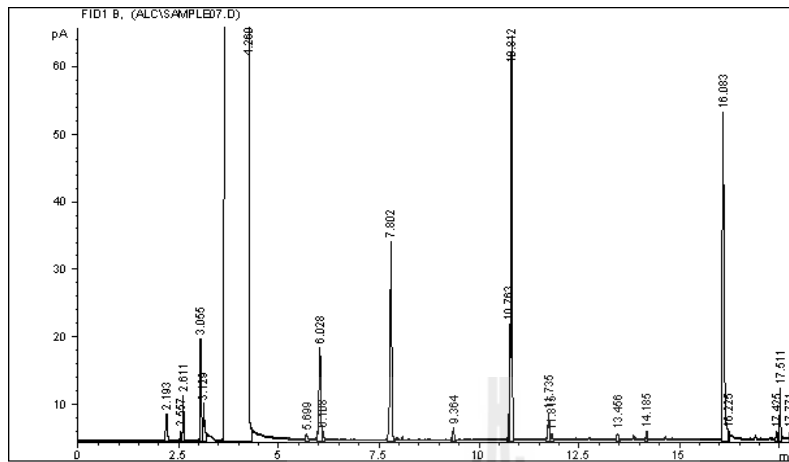
ในการทดลองนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในส่วนของ jacket ซึ่งถูกควบคุมโดยเครื่อง thermostat (รูปภาพ 16) โดยทำการหมักเอทานอลแบบกะก่อนเป็นอันดับแรก และเมื่อน้ำตาลกลูโคสถูกใช้หมดแล้ว จึงเริ่มทำการทดลองโดยการลดความดันบรรยากาศให้ต่ำลงเหลือประมาณ 65 มิลลิบาร์ด้วยเครื่องทำสุญญากาศแบบ aspirator ซึ่งจะทำให้ให้น้ำหมักเดือดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เอทานอลซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าจะกลายเป็นไอ และลอยขึ้นสู่ด้านบนของหมักกลั่น โดยจะมีความเข้มข้นของเอทานอลบริเวณผิวหน้าของน้ำหมักประมาณ 25% เท่านั้น เมื่อไอผสมของน้ำและเอทานอลลอยเข้าสู่บริเวณที่มีการควบคุมอุณหภูมิผ่านท่อ jacket การใช้ระบบทำความเย็นในการลดอุณหภูมิของไอผสมดังกล่าวลง จะทำให้เกิดการควบแน่นบางส่วน (partial condensation) ของไอผสมน้ำ/เอทานอลเหล่านี้ ซึ่งหากควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม จะทำให้เกิดการควบแน่นของน้ำบางส่วนกลายเป็นของเหลวไหลกลับลงสู่ถังหมัก ก่อนที่ไอของเอทานอลบริสุทธิ์จะยังคงสถานะที่เป็นไอและถูกควบแน่นโดยใช้ความเย็นจัดจากเครื่องควบแน่น (condenser) ที่ได้ทำการควบคุมอุณหภูมิที่ -30°C ของเหลวที่แยกได้จะกลายเป็นส่วนกลั่น (distillate)

ตาราง 2 อิทธิพลอุณหภูมิของ jacket ที่มีต่อองค์ประกอบและอัตราการไหลของส่วนกลั่น

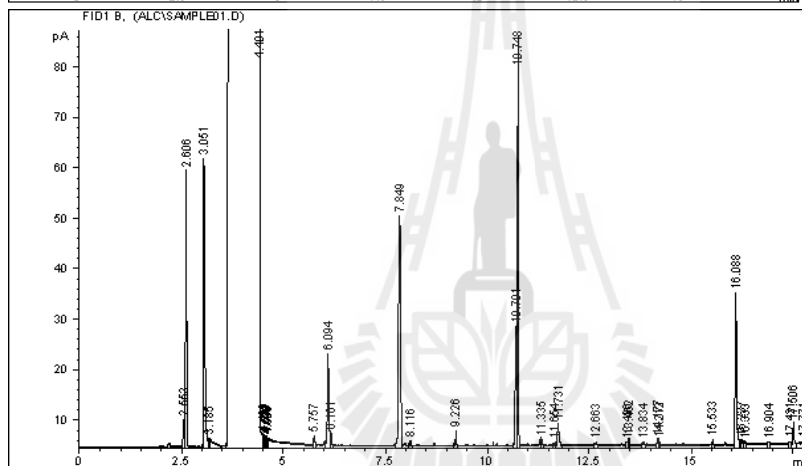
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Flow rate (kg/h)	EtOH (%wt)	H ₂ O (%wt)	Impurities (mg/L)			
				ProOH	ButOH	Isoamyl	n-amyl
2.5	0.048	89.9	6.4	66.28	9.71	270.13	17.73
4	0.090	87.0	9.3	76.87	10.65	310.21	21.43
7.5	0.187	83.8	12.3	77.04	12.25	314.08	26.79
10	0.200	80.9	15.7	85.81	12.55	321.32	28.18
15	0.267	74.2	22.1	92.97	14.07	334.48	27.91
35	0.296	44.7	51.4	106.94	14.68	379.97	30.22

ตาราง 2 แสดงอิทธิพลอุณหภูมิของ jacket ที่มีต่อองค์ประกอบและอัตราการไหลของส่วนกลั่นเอทานอลในระหว่างการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ ซึ่งนักวิจัยได้ทำการแปรผันอุณหภูมิของ jacket ระหว่าง $2.5-35^{\circ}\text{C}$ จากนั้นได้ทำการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศและทำการวัดอัตราการไหลของส่วนกลั่นเอทานอล พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของส่วนกลั่นที่ได้โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) โดยเทียบความเข้มข้นกับกราฟมาตรฐานของเอทานอลและผลพลอยได้จาก

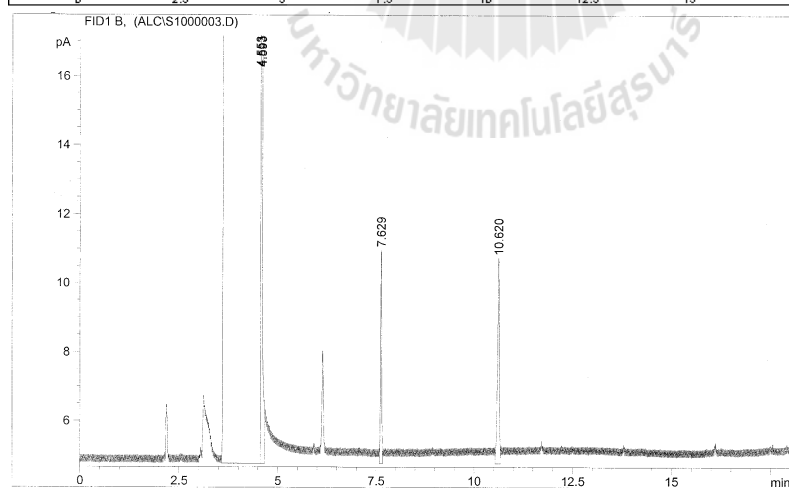
การหมักอื่น ๆ เช่น propanol (ProOH), butanol (ButOH), Isoamyl alcohol (Isoamyl), และ n-amyl alcohol (n-amyl) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดความเข้มข้นของน้ำในส่วนกลั่นเอทานอลที่ได้โดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่น (density meter) โดยหลังจากที่ทำการหมักเอทานอลแบบกะเสร็จสิ้นแล้วนั้น พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักอยู่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้แล้วยังพบว่ายังมีผลพลอยได้อื่น ๆ จากกระบวนการหมักอีกด้วยเช่นอัลดีไฮด์ อัลกอฮอล์ชนิดอื่น ๆ เอสเทอร์และกรดอินทรีย์ที่ระเหยได้ (volatile organic acid) ตามลำดับ ซึ่งสารเหล่านี้จะมีจุดเดือดที่แตกต่างกันออกไป และความเข้มข้นของสารเหล่านี้ในส่วนกลั่นเอทานอลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ jacket เป็นสำคัญ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้จะแปรผกผันกับอุณหภูมิของ jacket ที่ใช้ เช่น เมื่อใช้อุณหภูมิของ jacket ที่ 35 °C (รูปภาพ 20 (A)) พบว่ามีสารปนเปื้อนอื่น ๆ ตามมามากมายรวมถึงน้ำด้วย อัตราการไหลของส่วนกลั่นที่ได้คือ 0.296 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แต่ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้มีเพียงร้อยละ 44.7 เท่านั้น ส่วนที่เหลือคือน้ำ (ร้อยละ 51.4) และสารปนเปื้อนอื่น ๆ สำหรับการทดลองที่ใช้อุณหภูมิของ jacket ที่ 10 °C (รูปภาพ 20 (B)) โครมาโตแกรมแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่าง ๆ ลดลงจาก ณ 35 °C โดยอัตราการไหลของส่วนกลั่นที่ได้คือ 0.20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 44.7 เป็นร้อยละ 80.9 ส่วนที่เหลือคือน้ำความเข้มข้นร้อยละ 15.7 และความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อน (impurities) โดยรวมคือ 447.86 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการทดลองที่ใช้อุณหภูมิของ jacket ที่ 2.5 °C (รูปภาพ 20 (C)) โครมาโตแกรมของก๊าซโครมาโตกราฟีแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่าง ๆ ลดลงเป็นอย่างมาก โดยอัตราการไหลของส่วนกลั่นที่ได้คือ 0.296 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แต่ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 89.9 ส่วนที่เหลือคือน้ำความเข้มข้นร้อยละ 6.4 และความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนโดยรวมคือ 363.85 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งหากพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่า เทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้นั้น มีส่วนสำคัญในการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลในส่วนกลั่นเป็นอย่างมาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการกลั่นเอทานอลให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 90 ขึ้นไปนั้น จะต้องใช้หอกลั่นแบบชั้น (plate column) ซึ่งมีราคาแพง ในขณะที่ชุดกลั่นลำดับส่วนที่ได้พัฒนาขึ้นมา นี้ ใช้หลักการการควบคุมอุณหภูมิของไอเอทานอลผ่านทาง jacket ซึ่งเมื่อควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการควบแน่นบางส่วนของน้ำส่วนเกินที่ติดมากับไอเอทานอลนั้น โดยที่น้ำที่ควบแน่นแล้วนี้จะไหลตกกลับลงไปในถังหมักทำให้ยังสามารถรักษาปริมาตรของของเหลวในถังหมักไว้ได้อยู่ ส่วนเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงจะยังอยู่ในสถานะที่เป็นไอ และจะลอยผ่าน jacket ออกไปจากระบบก่อนที่จะถูกควบแน่นต่อไป ซึ่งเอทานอลบริสุทธิ์สูงที่ได้นี้สามารถนำไปเข้ากระบวนการกำจัดน้ำได้โดยตรง



A



B

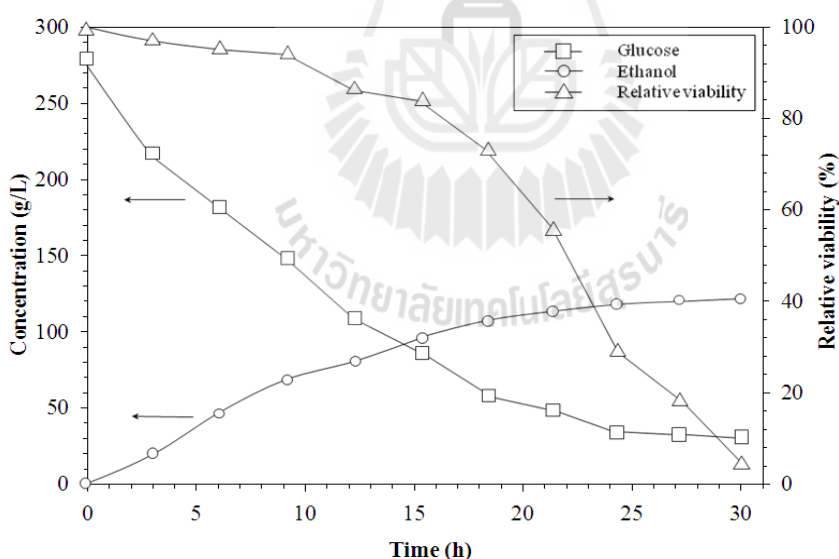


C

รูปภาพ 20 โครมาโตแกรมของส่วนกลั่นเอทานอลที่ได้จากอุณหภูมิของ jacket ที่แตกต่างกัน (A) 35 °C, (B) 10 °C, และ (C) 2.5 °C ตามลำดับ

3.1.3 การแยกเอทานอลควบคู่กับการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ

ผลการทดลองของหัวข้อก่อนหน้านี้นี้แสดงให้เห็นว่า เอทานอลเป็นสารที่มีอิทธิพลต่อค่าอัตราการผลิตจำเพาะเป็นอย่างมาก การมีเอทานอลที่มากเกินไปในน้ำหมักนั้นจะส่งผลทางด้านลบต่อเชื้อยีสต์ และ เอทานอลบริสุทธิ์ความเข้มข้นถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนักสามารถแยกออกจากน้ำหมักได้ ณ อุณหภูมิ 35 °C โดยใช้เทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ ดังนั้นหากประมวลเอาสองส่วนนี้เข้าด้วยกันก็จะเห็นได้ว่า เอทานอลบริสุทธิ์นั้นสามารถแยกออกจากน้ำหมักไปพร้อม ๆ กับกระบวนการหมักได้ ซึ่งปฏิบัติการเช่นนี้จะส่งผลดีต่อกระบวนการหมักคือ เอทานอลจะถูกแยกออกจากระบบอยู่ตลอดเวลา ทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลในระบบจะต่ำอยู่เสมอ ทำให้เชื้อยีสต์สามารถแสดงออกถึงกิจกรรมในการหมักน้ำตาลได้อย่างเต็มที่ ปราศจากการยับยั้งจากเอทานอล และ ส่วนกลั่นเอทานอลที่ได้ก็จะสามารถนำเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำ (dehydration) ได้โดยตรงโดยไม่ต้องนำไปกลั่นลำดับส่วนซ้ำอีก ทำให้เป็นที่คาดหมายว่าต้นทุนในการผลิตเอทานอลด้วยเทคนิคนี้จะถูกลงเป็นอย่างมาก

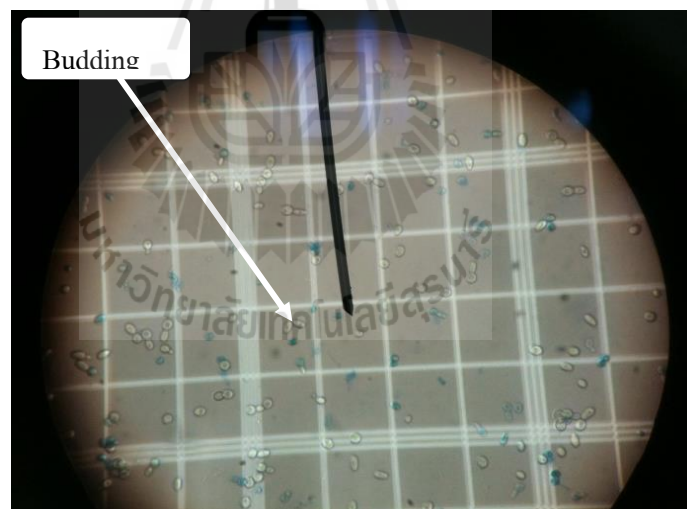
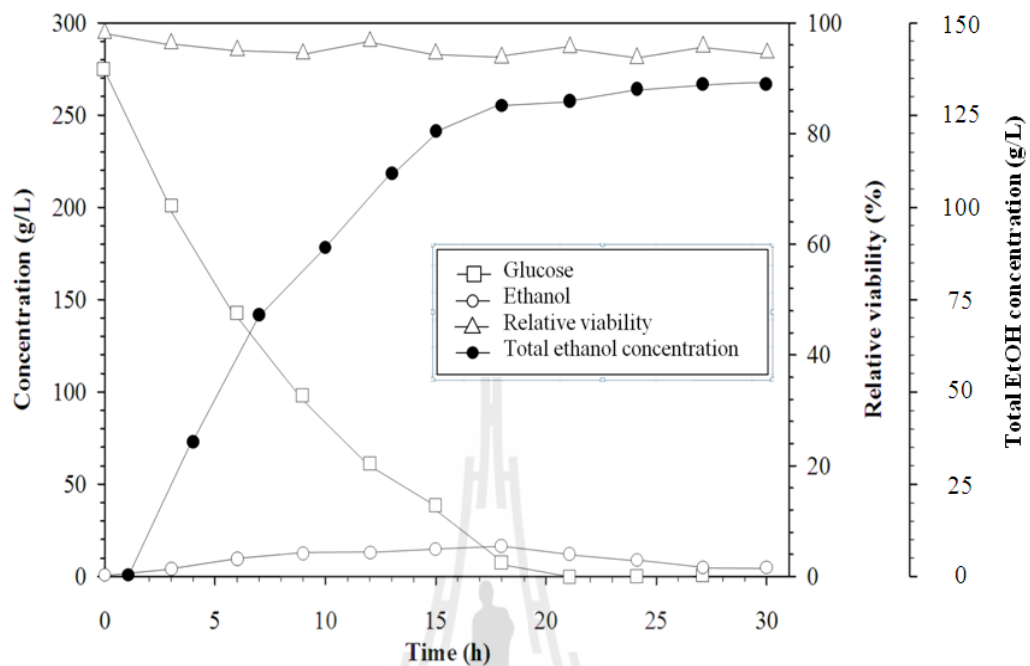


รูปภาพ 21 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการหมักเอทานอลแบบกะ (□) น้ำตาลกลูโคส, (○) เอทานอล, และ (Δ) การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ยีสต์

รูปภาพ 21 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระหว่างกระบวนการหมักแบบกะเช่น น้ำตาลกลูโคส, เอทานอล, และ การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ยีสต์ เป็นต้น ซึ่งค่าหลังนี้จะเป็นการวัดอัตราส่วนจำนวนเซลล์ยีสต์ที่ยังมีชีวิตและที่ตายแล้ว โดยทำการย้อมสีด้วย

methylene blue ซึ่งเซลล์ยีสต์ที่ยังมีชีวิตจะมีกลไกในการยับยั้งสารดังกล่าวเข้าสู่ด้านในของเซลล์ ในขณะที่ยีสต์ที่ตายแล้วจะยอมให้สารดังกล่าวเข้าไปในเซลล์ได้โดยง่าย เมื่อทำการย้อมสีดังกล่าวในตัวอย่างแล้วนำไปส่องใต้กล้องจุลทรรศน์ จะพบว่าเซลล์ยีสต์ที่ยังมีชีวิตอยู่จะยังคงมีลักษณะที่ใส ในขณะที่ยีสต์ที่ตายแล้วจะย้อมติดสีน้ำเงิน โดยผลการทดลองการหมักแบบกะนั้น พบว่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสลดลงในช่วง 12 ชั่วโมงแรกของกระบวนการหมัก จากนั้นอัตราการลดลงของกลูโคสจะค่อย ๆ ช้าลง และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดลองพบว่าน้ำตาลกลูโคสยังหลงเหลืออยู่ที่ 30 กรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเชื้อยีสต์ใช้น้ำตาลในกระบวนการหมักไม่สมบูรณ์ ซึ่งสาเหตุนี้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของเอทานอลในน้ำหมัก โดยในช่วง 10 ชั่วโมงแรกของการหมักนั้น ความเข้มข้นของเอทานอลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในอัตรา 6.20 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นอัตราการผลิตดังกล่าวจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 3.1.1 ที่กล่าวว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นในระบบ ประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลของเชื้อยีสต์จะลดลงเนื่องจากเกิดการยับยั้งจากผลิตภัณฑ์นั่นเอง และอัตราการเพิ่มขึ้นของเอทานอลจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่า 70 กรัมต่อลิตร โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าความเข้มข้นสูงสุดของเอทานอลที่ได้คือ 119.7 กรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการทดลองกิจกรรมต่าง ๆ ของเซลล์ยีสต์ได้สิ้นสุดลง ไม่มีการใช้น้ำตาล และไม่มีการผลิตเอทานอลเพิ่มขึ้นอีก และที่สำคัญก็คือเซลล์ยีสต์ทั้งหมดได้ตายลง โดยสังเกตได้จากเซลล์ทั้งหมดถูกย้อมติดสีน้ำเงินของ methylene blue

รูปภาพ 22 เป็นผลการทดลองการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ ซึ่งสภาวะเริ่มต้นของการทดลองจะเหมือนกับการหมักแบบกะทุกประการ แต่เมื่อกระบวนการหมักดำเนินไปประมาณ 3 ชั่วโมง การกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศก็ได้เริ่มต้นขึ้น โดยค่อย ๆ ทำการลดความดันบรรยากาศในอัตรา 200 มิลลิบาร์ต่อนาทีลงให้เหลือประมาณ 65 มิลลิบาร์ ซึ่งจะทำให้น้ำหมักเกิดการเดือดอย่างรุนแรง ไอของเอทานอลที่ลอยขึ้นมาก็จะถูกกลั่นลำดับส่วนออกจากระบบก่อนที่จะถูกควบแน่นที่อุณหภูมิ -25 องศาเซลเซียสต่อไป ซึ่งผลการทดลองการผลิตเอทานอลด้วยระบบนี้นั้นพบว่าดีกว่าระบบการหมักแบบกะเป็นอย่างมาก อัตราการใช้น้ำตาลกลูโคสมีค่าสูงอย่างต่อเนื่อง และน้ำตาลกลูโคสได้ถูกใช้จนหมดไปภายใน 21 ชั่วโมง นอกจากนี้อัตราการผลิตเอทานอลสามารถคำนวณได้ที่ประมาณ 12.5 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง โดยอัตรานี้มีค่าค่อนข้างที่จะคงที่จนถึงประมาณชั่วโมงที่ 16 ก่อนที่ความชันจะมีค่าลดลง ซึ่งการลดลงของความชันนี้ไม่เกี่ยวข้องกับเอทานอลแต่อย่างใด ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักอยู่ที่ไม่เกินร้อยละ 2 ตลอดช่วงเวลาของการทดลอง ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อเซลล์ยีสต์แต่อย่างใด สำหรับไอของส่วนกลั่นเอทานอลนั้น เมื่อหลุดออกจากระบบแล้วจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 90 ดังแสดงในรูป 23

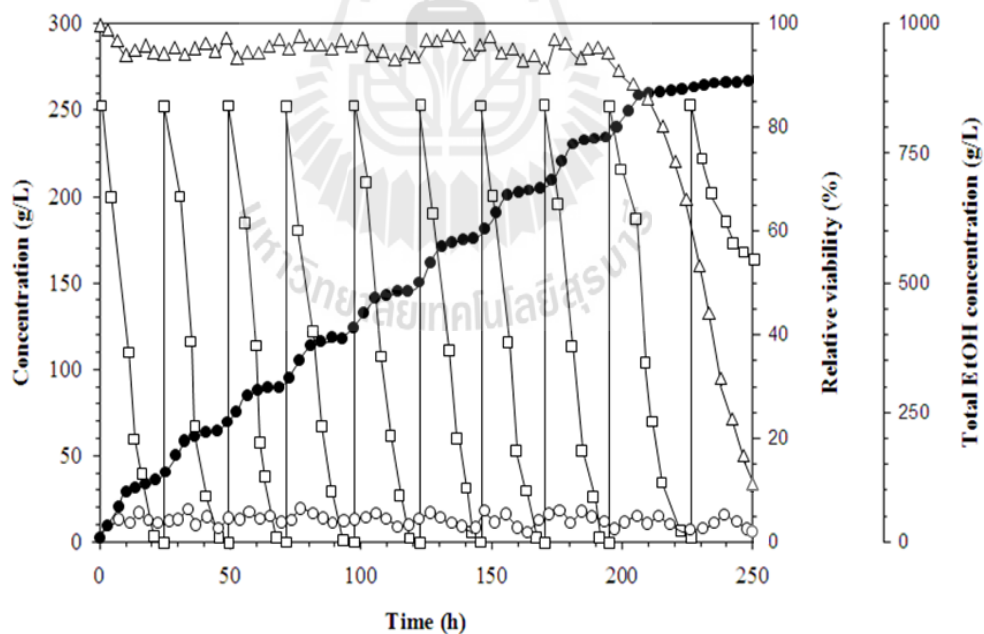


รูปภาพ 22 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระหว่างการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ (\square) น้ำตาลกลูโคส, (\circ) เอทานอล, และ (Δ) การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ยีสต์ (บน) การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ยีสต์ภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการหมักโดยใช้เทคนิคการย้อมสีด้วย methylene blue (ล่าง)



รูปภาพ 23 ลักษณะของผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ควบแน่นได้จากการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ

3.1.4 การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักในแบบกะซ้ำ (Extractive fermentation of ethanol in repeated-batch mode)



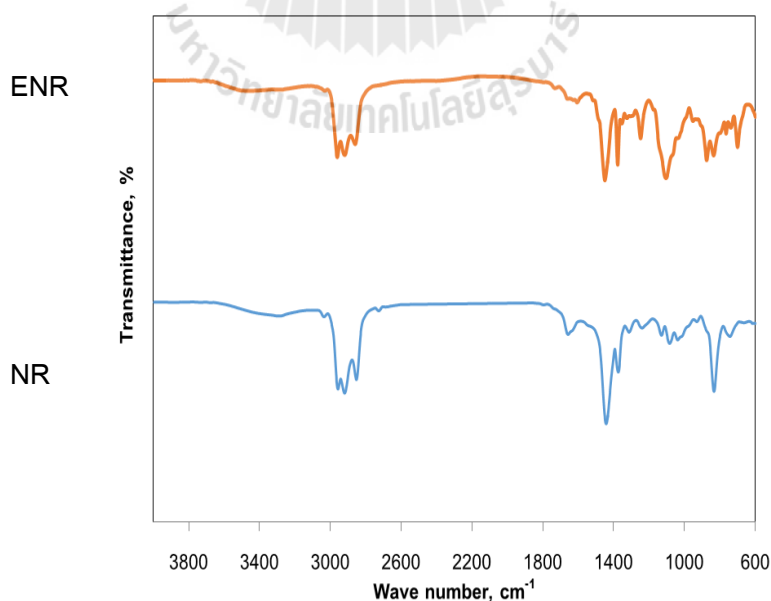
รูปภาพ 24 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระหว่างการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศในแบบกะซ้ำ (□) น้ำตาลกลูโคส, (○) เอทานอลในน้ำหมัก, (●) เอทานอลในส่วนควบแน่น และ (Δ) การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ยีสต์

จากการทดลองการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศนั้น พบว่าได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ โดยสามารถแยกเอทานอลบริสุทธิ์ออกจากน้ำหมักได้เกือบ 100% เมื่อเทียบกับปริมาณที่ระบบผลิตได้ โดยผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ควบแน่นได้นั้นจะมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 90 และสามารถนำเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเอทานอลได้โดยตรงและไม่ต้องผ่านขั้นตอนการกลั่นซ้ำใด ๆ อีก และที่สำคัญอย่างยิ่งคือเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักแล้ว เชื้อยีสต์ยังมีชีวิตอยู่ในอัตราที่สูงกว่าร้อยละ 90 ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกเอทานอลออกจากระบบอยู่ตลอดเวลาในตัวเอง ซึ่งจากการที่เชื้อยีสต์ยังมีชีวิตอยู่นี้ จึงทำให้สามารถเติมน้ำตาลกลูโคสเข้าไปในระบบได้อีก ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการเติมน้ำตาลกลูโคสลงไปเป็นครั้ง ๆ หรือที่เรียกว่า repeated-batch mode ซึ่งในแต่ละครั้งจะทำการเติมน้ำตาลกลูโคสให้ได้ความเข้มข้น 250 กรัมต่อลิตร โดยผลการทดลองแสดงในรูปภาพ 24 ซึ่งหลังจากที่ทำการหมักไปประมาณ 3 ชั่วโมง ก็ได้เริ่มทำการแยกเอทานอลออก โดยพบว่าน้ำตาลกลูโคสถูกใช้อย่างรวดเร็วภายใน 15 ชั่วโมงหลังจากเริ่มกระบวนการหมักและหมดไปภายใน 24 ชั่วโมง นอกจากนี้เอทานอลบริสุทธิ์ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 90 ได้ถูกแยกออกจากระบบอยู่ตลอดเวลาในอัตรา 25 กรัมต่อชั่วโมง โดยเหลือความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักไม่เกิน 25 กรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลลดลง อัตราการผลิตเอทานอลก็จะลดลงด้วย และเมื่อน้ำตาลในน้ำหมักถูกใช้จนหมด น้ำหมักก็จะได้รับการเติมน้ำตาลครั้งใหม่ ซึ่งการเติมน้ำตาลนี้จะทำการปิดระบบสุญญากาศก่อน และเทน้ำตาลลงไปให้ได้ความเข้มข้น 250 กรัมต่อลิตร จากนั้นทำการเปิดระบบสุญญากาศอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถทำการเติมน้ำตาลได้อีกเป็นจำนวน 8 ครั้ง และระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องถึง 230 ชั่วโมง โดยน้ำหมัก 2 ลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้ 1992 มิลลิลิตร ซึ่งคำนวณเป็นความเข้มข้นได้ที่ 995.2 กรัมต่อลิตร แต่อย่างไรก็ตามหลังจากที่ทำการเติมน้ำตาลครั้งที่ 9 แล้วพบว่าระบบไม่สามารถทำการผลิตเอทานอลได้อีก และไม่เกิดการใช้น้ำตาลอีก ซึ่งจากการวิเคราะห์ตัวอย่างในน้ำหมักด้วยเครื่อง HPLC พบว่า มีปริมาณของกรดอินทรีย์โดยเฉพาะกรดแล็กติกอยู่ประมาณ 70 กรัมต่อลิตร ซึ่งกรดแล็กติกนี้เป็นผลพลอยได้อย่างหนึ่งของกระบวนการหมักเอทานอล และมีความเป็นพิษต่อเซลล์ยีสต์สูงเช่นกัน (Chovau *et al.*, 2011) กล่าวโดยสรุปแล้วระบบนี้สามารถลดต้นทุนการผลิตเอทานอลได้โดยมีต้นทุนค่าก่อสร้างที่ต่ำ หลีกเลี่ยงการใช้หอกลั่นแบบชั้นที่มีราคาแพงได้ และการเติมแหล่งคาร์บอนแบบกะข้านี้ จะช่วยทำให้ประหยัดน้ำที่จะต้องใช้ในการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามเมื่อทำการหมักซ้ำครั้งที่ 8 แล้วควรเริ่มระบบใหม่อีกครั้งหนึ่ง อย่างไรก็ตามกรดแล็กติกสามารถที่จะนำมาผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์และนำไปจำหน่ายได้อีก จึงถือเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับผู้ประกอบการอีกทางหนึ่งด้วย

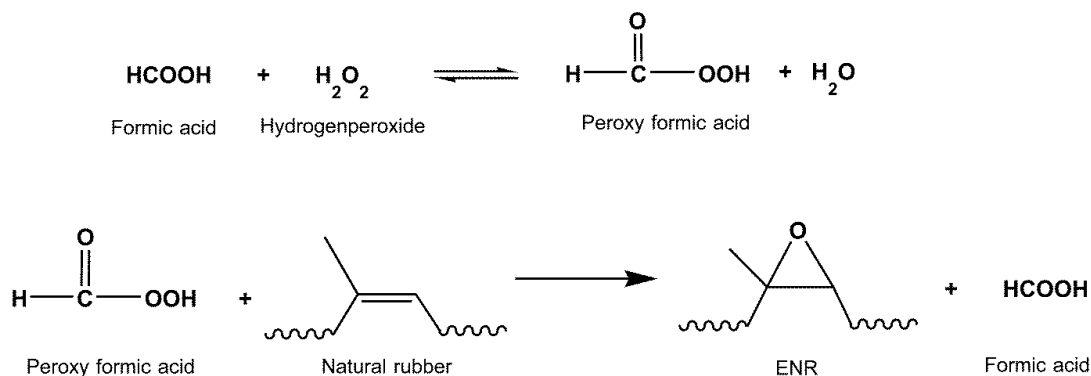
3.2 การศึกษา Proton Exchange Membrane (PEM)

3.2.1 การศึกษาโครงสร้างของยาง ENR

การศึกษาระบวนการเตรียมเมมเบรนจากไคโตซาน น้ำยาง ENR และน้ำยาง ENR ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยไคโตซาน โดยการสังเคราะห์น้ำยาง ENR และน้ำยาง ENR ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยไคโตซานแล้วขึ้นรูปเป็นเมมเบรนชนิดแผ่นด้วยกระบวนการ casting จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางเคมี สมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงฟิสิกส์ รวมทั้งศึกษาค่าการนำประจุและสมบัติทางไฟฟ้าของเมมเบรนที่เตรียมได้ การนำน้ำยางธรรมชาติมาตัดแปรโครงสร้างทางเคมีด้วยกระบวนการ epoxidation ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติตรงตำแหน่งพันธะคู่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมโดยจะมีหมู่ออกซิเจนเข้าแทนที่พันธะคู่ โดยสามารถยืนยันได้ด้วยการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ ATR-FTIR ของยางธรรมชาติก่อนการตัดแปรและหลังการตัดแปร ซึ่งยืนยันได้ว่าหลังทำการ ตัดแปรโมเลกุลยางธรรมชาติโดยผ่านกระบวนการ epoxidation ดังรูปภาพ 25 เกิดพีคที่ตำแหน่ง 875 cm^{-1} , 1105 cm^{-1} และ 1248 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการยึดของออกซิเจนในวงแหวน oxirane (วัชรินทร์และคณะ, 2544) เมื่อสายโซ่โมเลกุลของ *cis*-1,4-polyisoprene เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างของ *cis*-epoxy (Nicholas, 1993) และการลดลงของหมู่ $R_1R_2C=CHR_3$ ที่ตำแหน่ง 3030 และการลดลงของยึดของหมู่ $=CH-$ ที่ตำแหน่ง 835 cm^{-1} (Noor *et al.*, 2010) ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดหมู่ epoxide นั้นแสดงไว้ดังรูปภาพ 26



รูปภาพ 25 ATR-FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติ (NR) ก่อนการตัดแปรโมเลกุลและหลังการตัดแปรโมเลกุลเป็นยาง ENR

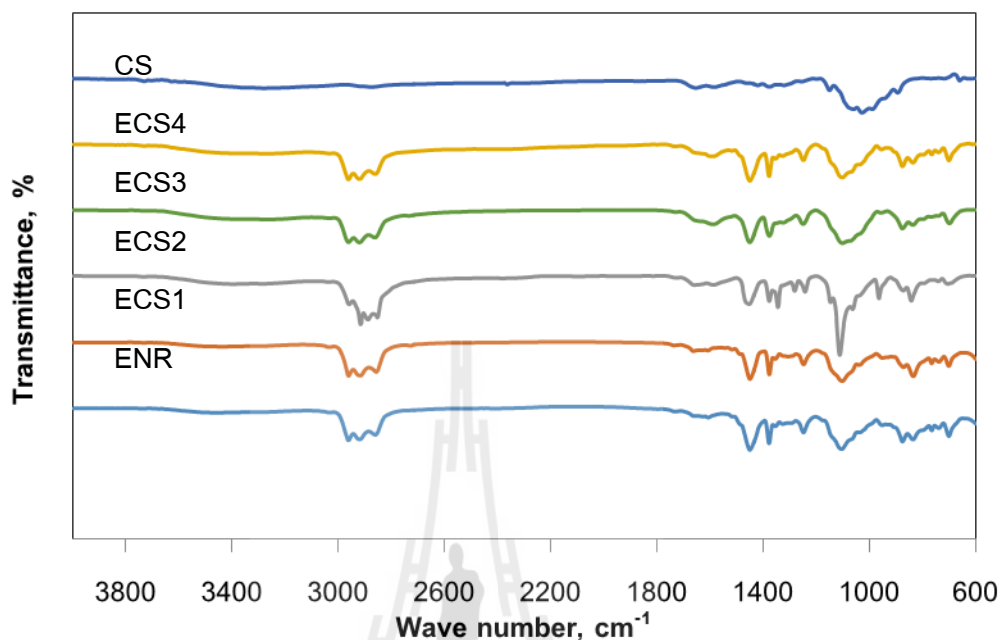


รูปภาพ 26 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ยาง ENR จากยางธรรมชาติ (Gan,1986)

3.2.2 การศึกษาโครงสร้างของยาง ENR ที่ผสมด้วยไคโตซาน

จากรูปภาพ 25 ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่าสำหรับไคโตซานนั้น แสดงพีคหลักของหมู่เอมีน และหมู่เอไมด์ ($\text{O}=\text{CR}-\text{NH}$ ที่เป็นลักษณะที่แสดงถึงหน่วยไคติน) ที่ตำแหน่ง 1581 cm^{-1} และ 1652 cm^{-1} ตามลำดับ ส่วนการสั่นยืดของหมู่ OH และ NH_2 เกิดที่ตำแหน่ง 3356 cm^{-1} (O-H stretching) และ 3277 cm^{-1} (N-H stretching) โดยหมู่ O-H นั้นเป็นไปได้ว่าเป็นของ C ตำแหน่งที่ 3 และ 6 ในโมเลกุลของไคโตซาน ขณะที่การเกิดพีคที่ตำแหน่ง 2874 และ 1420 cm^{-1} นั้นแสดงถึงการสั่นของหมู่ CH_2 stretching และ OH/CH ในวงแหวน pyranose ตามลำดับ ส่วนพีคที่ตำแหน่งอื่นๆ ได้แก่ 1150 , 1059 และ 1027 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของ C-O-C ของ glycosidic linkage ในโมเลกุลไคโตซาน

เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางเคมีของยาง ENR ที่ผสมไคโตซาน ในสัดส่วนปริมาณของไคโตซานร้อยละ 3 (ECS1), 5 (ECS2), 8 (ECS3) และ 10 (ECS4) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม กล่าวคือเกิดการเปลี่ยนแปลงในตำแหน่งของหมู่ epoxy ในยาง ENR ตรงตำแหน่ง 875 cm^{-1} ไปเป็น 871 , 872 , 875 , 875 cm^{-1} ในสูตร ECS1, ECS2, ECS3, ECS4 ตามลำดับและเมื่อพิจารณาในส่วนของโมเลกุลไคโตซานยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งที่สำคัญเช่นกันตรงตำแหน่ง 3356 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่ OH ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็น 3461 , 3400 , 3390 , 3400 ในสูตร ECS1, ECS2, ECS3, ECS4 ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่แสดงหมู่ N-H จาก 3277 cm^{-1} ไปเป็น 3275 , 3276 , 3270 , 3273 cm^{-1} ในสูตร ECS1, ECS2, ECS3, ECS4 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจึงยืนยันได้ว่ามีความเป็นไปได้ว่า ไคโตซานเกิดปฏิกิริยากับยาง ENR ระหว่างการสังเคราะห์ซึ่งเกิดเชื่อมโยงระหว่างหมู่ epoxy ของยาง ENR กับหมู่ CH_2OH ของไคโตซาน



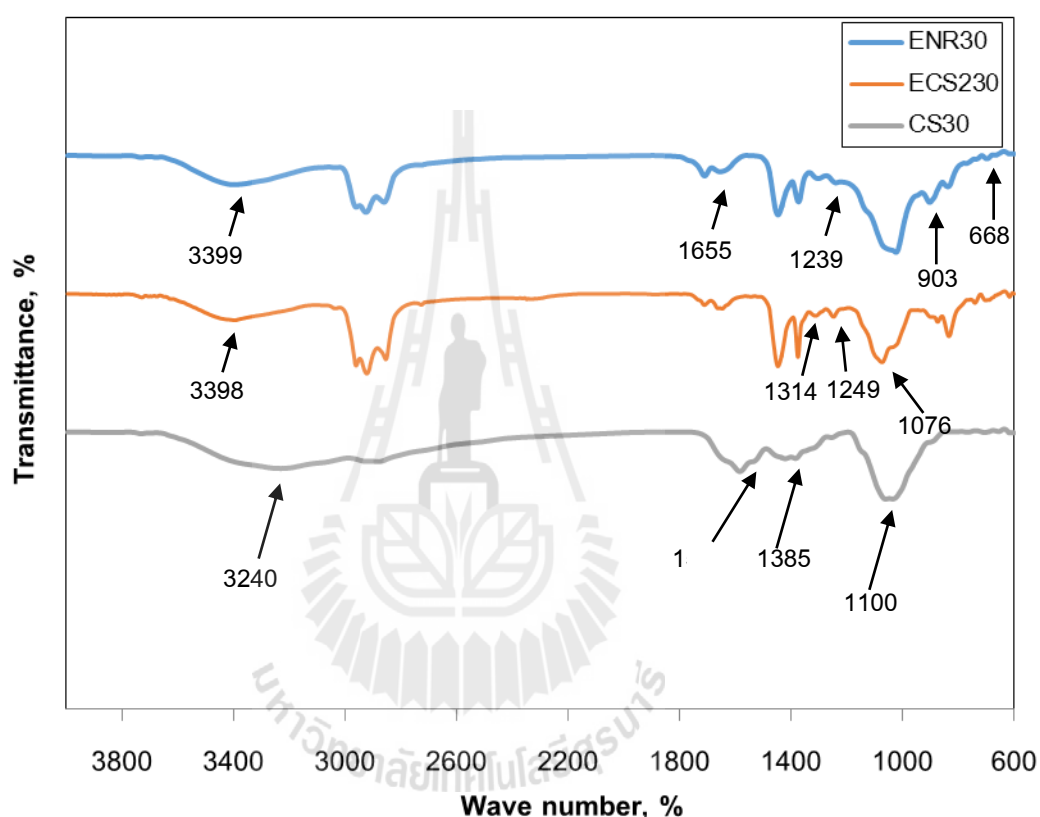
รูปภาพ 27 ATR-FTIR สเปกตรัมของยาง ENR, ยาง ENR ผสมไคโตซานที่ปริมาณ 3% (ECS1), 5%(ECS2), 8%(ECS3), 10%(ECS4) และไคโตซาน (CS)

3.2.3 ผลของกรดซัลฟิวริกต่อโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรนที่เตรียมได้

จากรูปภาพ 28 แสดงสเปกตรัมของยาง ENR ยาง ENR ที่ผสมไคโตซานปริมาณ 5 % (ECS2) และไคโตซาน ซึ่งทั้งหมดถูกนำไปแช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10% v/v เป็นเวลา 30 นาที พบว่าสเปกตรัมของไคโตซานที่แช่กรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 30 นาที จะเกิดพีคกว้างใกล้ตำแหน่ง 3240 cm^{-1} ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเกิดกระบวนการ protonation ในหมู่ NH_2 ไปเป็น NH_3^+ และปรากฏพีคตรงตำแหน่ง 1100 cm^{-1} ซึ่งยืนยันว่ามี SO_4^{2-} (Cui *et al.*, 2008) และการเกิดพีคที่ตำแหน่ง 1529 cm^{-1} ซึ่งชี้ให้เห็นถึงอันตรกิริยาของหมู่ $-\text{NH}_2$ ของไคโตซานกับ $-\text{SO}-$ ของ SO_4^{2-} ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 1376 cm^{-1} เปลี่ยนตำแหน่งไปเป็น 1385 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นยึดของ C-N นั้นพบว่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับของไคโตซานที่ไม่ได้เชื่อมขวาง ทั้งนี้หมู่ NH_2 เกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดการเชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟิวริกโดยตรง (Kamari *et al.*, 2009)

ในส่วนของยาง ENR ที่ผ่านการแช่กรดพบว่าพีคที่ตำแหน่ง 875 cm^{-1} ซึ่งเป็นของวงแหวน oxirane หายไป และพีคที่ตำแหน่ง 1248 cm^{-1} เกิดการเลื่อนตำแหน่งไปเป็น 1239 cm^{-1} และเกิด

พีคการดูดกลืนของหมู่ OH ที่ตำแหน่ง 3399 cm^{-1} อีกทั้งพบการเกิดพีคใหม่ที่ 1655 cm^{-1} (วัชรินทร์ และคณะ, 2544) ซึ่งยืนยันว่ามีการเปิดวงของวงแหวน oxirane เกิดขึ้น (วัชรินทร์ สายน้ำใสและคณะ, 2544) ส่วนพีคที่ตำแหน่ง 668 cm^{-1} และ 903 cm^{-1} นั้นเป็นของหมู่ SO_4^{2-} ซึ่งเป็นไปได้ว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง ENR กับกรดซัลฟิวริกขึ้น

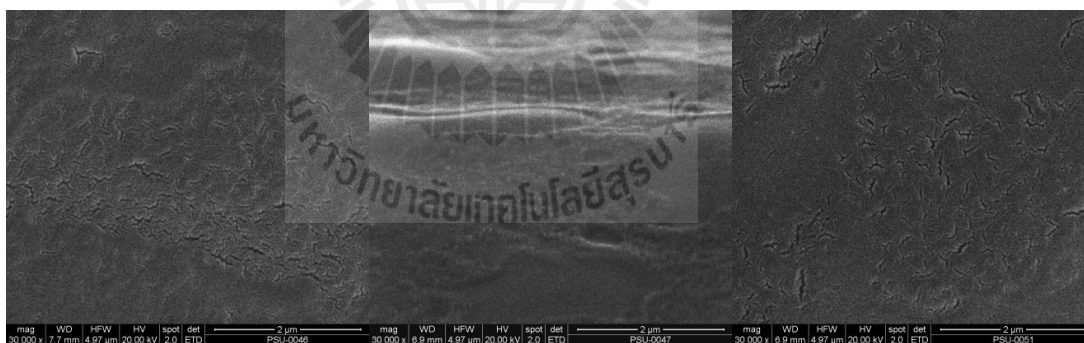


รูปภาพ 28 ATR-FTIR สเปกตรัมของยาง ENR, ยาง ENR ผสมโคโตซานที่ปริมาณ 5% (ECS2), และโคโตซาน (CS) ที่แช่กรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 30 นาที

ในกรณีของยาง ENR ที่ผสมโคโตซานนั้น (ECS2) กรดซัลฟิวริกน่าจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงทั้งสองเฟสคือระหว่างหมู่ NH_2 ของโคโตซานและผ่านการเปิดวงแหวน oxirane แล้วเกิดการเชื่อมโยงกับโมเลกุลของกรดซัลฟิวริกเกิดขึ้นซึ่งจากพีคที่ตำแหน่ง 1076 cm^{-1} และ 3398 cm^{-1} น่าจะเกิดจากหมู่ซัลเฟตและการเกิด protonation ของหมู่ NH_2 ไปเป็น NH_3^+ ในโมเลกุลโคโตซานตามลำดับและพีคที่ 1710 cm^{-1} และ 1655 cm^{-1} ซึ่งยืนยันถึงการเปิดวงแหวนของวงแหวน oxirane ในโมเลกุลยาง ENR ซึ่งการเปิดวงของวงแหวน oxirane เกิดได้ดังรูปที่ 4.10 (Gan และ NG, 1986)

3.2.4 การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา

รูปภาพ 29 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเมมเบรนยาง ENR ผสมไคโตซาน 5% (ECS2) พบว่ามีรอยแตกบริเวณผิวด้านหน้าและด้านล่างของ เมมเบรนซึ่งคาดว่า เป็นผลมาจากการระเหยของน้ำในเฟสของยาง ENR และไคโตซานที่มีอัตราการระเหยที่ต่างกัน ทั้งนี้ในกระบวนการเตรียมแผ่นเมมเบรนนั้นเมื่อได้แผ่นเมมเบรนที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะต้องนำแผ่น เมมเบรนดังกล่าวไปล้างน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสารรักษาความเสถียรในขั้นตอนการเตรียมยาง ENR ซึ่งจะ เกาะอยู่บริเวณผิวเมมเบรนให้หมดแล้วทำการอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา ประมาณ 30 นาที ก่อนจะนำเมมเบรนไปทดสอบสมบัติต่างๆ ซึ่งในขั้นตอนดังกล่าวและขั้นตอนการ เตรียมแผ่นเมมเบรนไคโตซานจะสังเกตได้ว่าการระเหยของน้ำในเมมเบรนไคโตซานจะเกิดได้รวดเร็ว กว่าเมมเบรนยาง ENR มาก ซึ่งการระเหยออกไปของน้ำ จะทำให้เกิดการหดตัวของเฟสของไคโตซาน และยาง ENR ที่แตกต่างกันด้วยจึงส่งผลให้ผิวของเมมเบรนเกิดรอยแตกขึ้น แต่ลักษณะดังกล่าวจะไม่ เกิดขึ้นในเนื้อเมมเบรนซึ่งจากรูปที่ 4.10 B. ซึ่งเป็นภาพตัดขวางของเมมเบรนพบว่าเมมเบรนที่เตรียม นั้นเป็นเมมเบรนชนิดเนื้อแน่นและไม่พบอนุภาคของไคโตซานที่เกาะกลุ่มกัน จึงแสดงให้เห็นว่าไคโต ซานกับยาง ENR มีความเข้ากันได้



A. ผิวหน้า

B. ภาพตัดขวาง

C. ผิวด้านล่าง

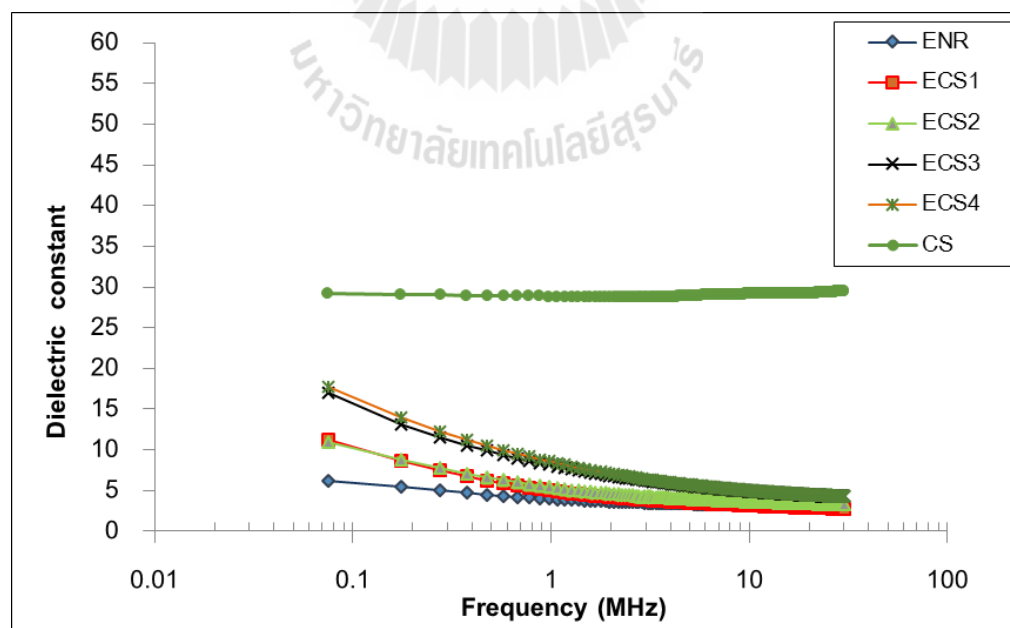
รูปภาพ 29 ลักษณะของเมมเบรนยาง ENR ผสมไคโตซาน 5% (ECS2)

3.2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของเมมเบรน

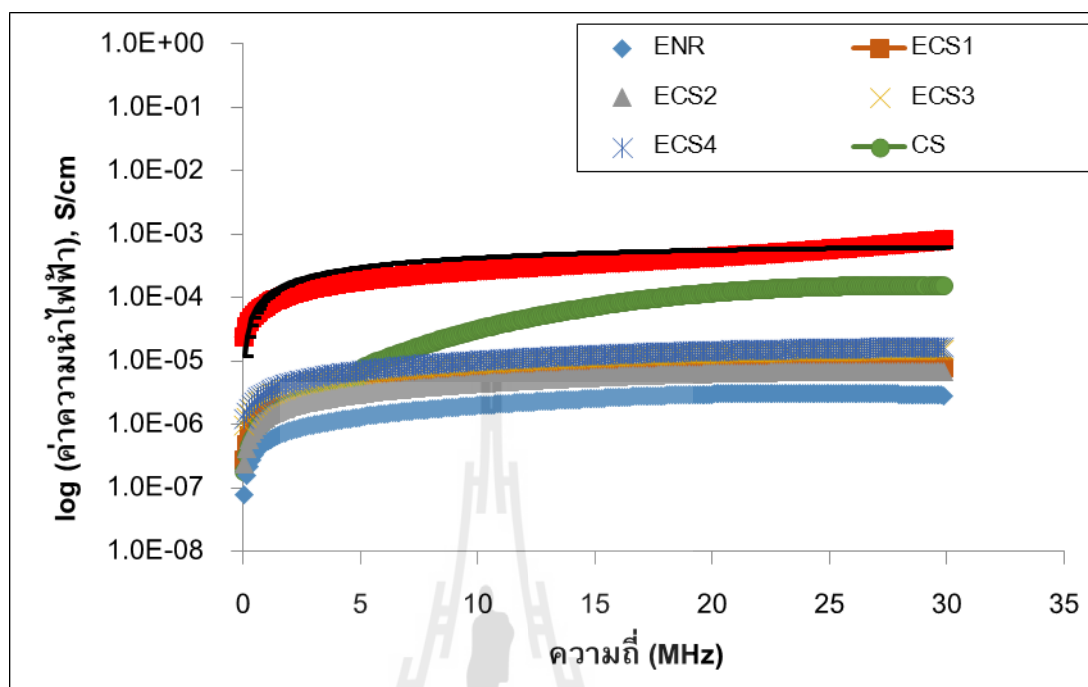
- ค่าคงไดอิเล็กทริกและการสูญเสียสภาพไดอิเล็กทริก

รูปภาพ 30 เป็นผลการทดสอบสมบัติความเป็นไดอิเล็กทริกของเมมเบรนซึ่งจากการทดลอง พบว่าเมื่อปริมาณไคโตซานเพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้การศึกษาสมบัติทาง ไฟฟ้าของเมมเบรนโดยการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้นสามารถบอกถึงความสามารถในการนำโปรตอน ได้โดยอ้อม โดยหากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงก็มีแนวโน้มที่จะมีค่าการนำโปรตอนที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งการ

เพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้น จะเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประจุพาหะ (Khar และ Arof, 2011) ในกรณีของยาง ENR นั้นจะเห็นได้ว่ามีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ เนื่องจากไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่เหนี่ยวนำได้ ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงของโคโตะซานนั้นมาจากการมีขั้วของไอออน NH_3^+ ในแผ่นฟิล์มโคโตะซาน ซึ่งเมื่อมีปริมาณของโคโตะซานสูงขึ้น จะทำให้มีหมู่ฟังก์ชันที่เหนี่ยวนำได้ของระบบพอลิเมอร์ผสมเกิดการหมุนตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าได้มากขึ้น ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของระบบที่มีโคโตะซานผสมอยู่นั้น เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปแล้วค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความมีขั้วของโมเลกุล (polarization of molecules) และจะเพิ่มขึ้นตาม polarizability ซึ่งการเกิดโพลาไรเซชันในวัสดุนั้นเกิดได้แตกต่างกันคือ 1. เกิดจาก electronic polarization 2. atomic polarization และ 3. orientation polarization ซึ่งเกิดจากการหมุนของขั้วโมเลกุลในสนามไฟฟ้า ในกรณีของโคโตะซานซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีขั้วนั้น ที่ความถี่ต่ำๆจะเกิดจาก polarization ทั้ง 3 ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นรวมกัน จึงทำให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่ความถี่ต่ำ แต่เมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น การเกิด orientation polarization ซึ่งต้องการเวลาในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้ามากกว่า electronic และ atomic polarization นั้นจะหายไป ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้น ยืนยันว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของ polarity หรือความมีขั้วของระบบพอลิเมอร์ผสม (Johns และ Nakason, 2011)



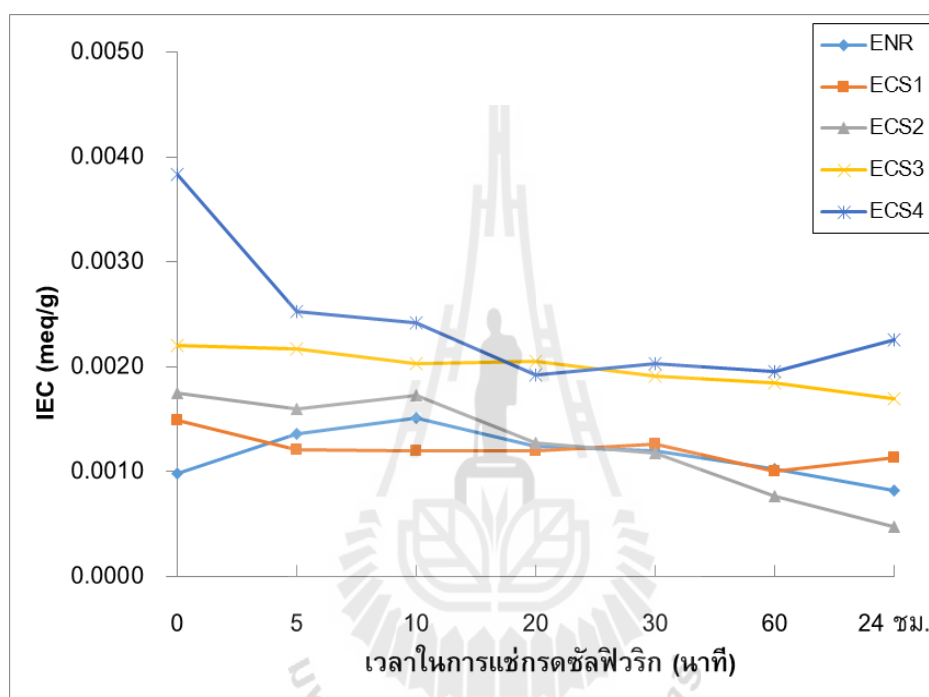
รูปภาพ 30 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเมมเบรนยาง ENR ผสมโคโตะซานปริมาณต่างๆ



รูปภาพ 31 ค่าความนำไฟฟ้าของเมมเบรนยาง ENR ผสมไคโตซานปริมาณต่างๆ

รูปภาพ 31 แสดงการวัดค่าความนำไฟฟ้าของเมมเบรนในสถานะแห้งเพื่อเปรียบเทียบและศึกษาสมบัติของความนำไฟฟ้าต่อการนำโปรตอนของเมมเบรน ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าความนำไฟฟ้าของเมมเบรนยาง ENR นั้นมีค่าต่ำมาก ทั้งนี้เพราะยางธรรมชาติมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ค่าความนำไฟฟ้าจึงต่ำ แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อผสมไคโตซานลงระหว่างการสังเคราะห์ยาง ENR เนื่องจากไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุทำให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง (Khiar, A.S.A. และ Arof, A.K., 2011) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความนำไฟฟ้าของเมมเบรน Nafion ซึ่งเป็นเมมเบรนนำโปรตอนในเชิงพาณิชย์และ Nafion ที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกเปรียบเทียบกับเมมเบรนที่เตรียมได้ พบว่าเมมเบรน Nafion นั้นมีค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่สูงมากซึ่งประจุเหล่านี้จะมีบทบาทสำคัญต่อการนำโปรตอนของเมมเบรน เนื่องจากความนำไฟฟ้าเป็นค่าที่แสดงถึงการยินยอมให้ประจุใดๆเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ โดยหากเมมเบรนหรือวัสดุที่เป็นตัวกลางมีความต้านทานต่อการไหลผ่านของประจุต่ำแสดงว่ามีค่าความนำไฟฟ้าที่สูงหรือยอมให้ประจุไหลผ่านตัวเองได้มาก แต่หากวัสดุมีความต้านทานสูง การไหลผ่านของประจุในเนื้อเมมเบรนก็จะมีค่าต่ำทำให้ค่าความนำไฟฟ้าต่ำด้วย ดังนั้นค่าการเหนี่ยวนำจะบ่งบอกถึงความสามารถในการให้ประจุไหลผ่านในเมมเบรนซึ่งรวมทั้งประจุบวกหรือโปรตอนด้วย การที่เมมเบรน Nafion มีค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกนั้นเพราะ

กระบวนการดังกล่าวจะเป็นการเพิ่มประจุให้กับเมมเบรนโดยประจุที่เกิดขึ้นคือหมู่ซัลเฟตของกรดซัลฟิวริกซึ่งจะทำหน้าที่เป็นส่วนขบบน้ำและทำให้เกิดการไหลผ่านของโปรตอนที่สะดวกขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าการนำโปรตอนสูงขึ้นไปด้วย ทั้งนี้จากค่าความนำไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่เตรียมได้มีค่าความนำไฟฟ้าระหว่าง 10^{-8} - 10^{-3} S/cm ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ semiconductors (Elias, 1997)



รูปภาพ 32 ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนที่เตรียมได้จากยาง ENR และยาง ENR ผสมไคโตซานซึ่งแช่กรดซัลฟิวริกในเวลาต่างๆ

รูปภาพ 32 แสดงให้เห็นได้ว่าค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของเมมเบรนยาง ENR จะเพิ่มขึ้นเมื่อแช่กรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 5 และ 10 นาที จากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการแช่กรดเพิ่มขึ้น แต่เมมเบรนยาง ENR ผสมไคโตซานจะมีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากไคโตซานเองมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุที่สูง แต่เมื่อนำเมมเบรนที่มีไคโตซานผสมอยู่ไปแช่กรดซัลฟิวริกที่เวลาต่างๆ พบว่าค่าการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลงซึ่งอาจเกิดจากการที่เกิดการเชื่อมขวางแบบไอออนิกขึ้นภายในเฟสของยาง ENR ทำให้หมู่ฟังก์ชันที่มีความว่องไวในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง ซึ่งแม้ว่าในเมมเบรนจะมีไคโตซานอยู่ แต่เป็นส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับยาง ENR

ตาราง 3 แสดงค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนที่ผ่านการแช่กรดที่เวลาต่างๆ

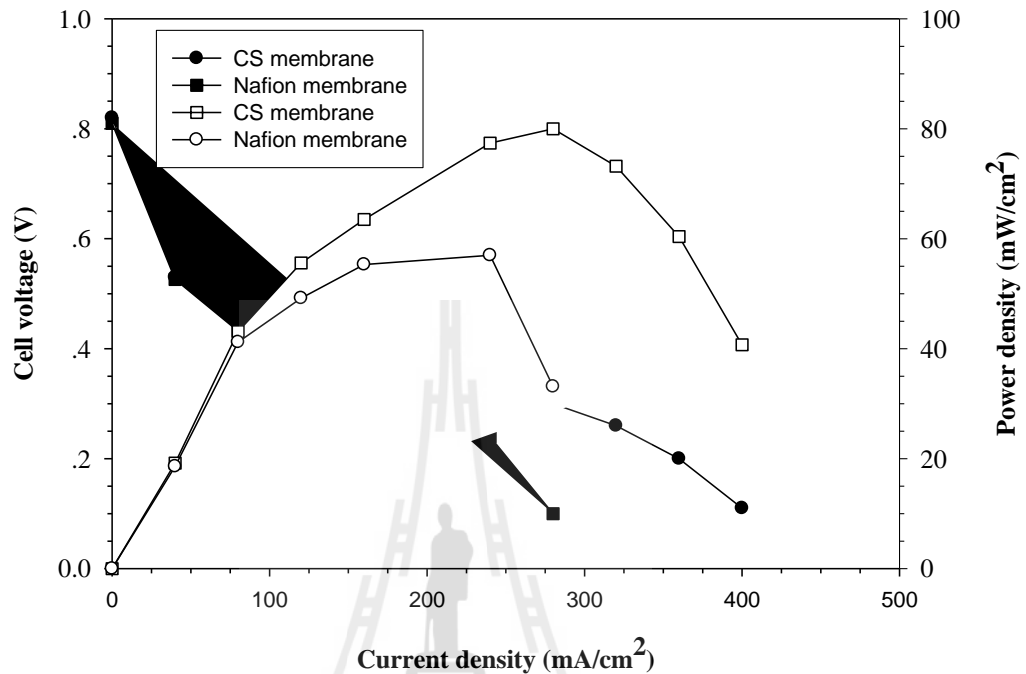
ตัวอย่าง	ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนที่ผ่านการแช่กรดที่เวลาต่างๆ, (S/cm) $\times 10^{-4}$						
	0 นาที	5 นาที	10 นาที	20 นาที	30 นาที	60 นาที	24 ชม.
ENR	0.0011	0.0013	0.0004	0.0004	0.0003	0.0007	0.0009
ECS1	0.0022	0.0004	0.0007	0.0004	0.0003	0.0003	0.0009
ECS2	0.0037	0.0011	0.0013	0.0013	0.0005	0.0005	0.0007
ECS3	0.0045	0.0004	0.0016	0.0025	0.0021	0.0007	0.0010
ECS4	0.0064	0.0010	0.0009	0.0010	0.0011	0.0018	0.0006
CS	0.0521	3.3671	1.7554	1.9498	1.8867	1.3847	1.6762
Nafion	49.7241						

ตาราง 3 เป็นค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนที่ผ่านการแช่กรดที่เวลาต่างๆ ซึ่งได้จากการวัดค่าความต้านทานของเมมเบรนจากเครื่อง LCR meter พบว่าค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณไคโตซาน โดยเมื่อไคโตซานเพิ่มมากขึ้นค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนยาง ENR ผสมไคโตซานจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่การแช่เมมเบรนในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 % v/v ที่เวลาต่างๆ ไม่ได้ทำให้ค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนยาง ENR และ ENR ผสมไคโตซานเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมมเบรนไคโตซานจะมีค่าการนำโปรตอนเพิ่มขึ้นเมื่อนำไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10% v/v โดยพบว่าที่เวลาในการแช่กรด 5 นาที จะมีค่าการนำโปรตอนสูงสุด และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำเมมเบรนเนฟิออน 117 ซึ่งเป็นเมมเบรนนำโปรตอนที่ใช้ในเชิงพาณิชย์มาวัดเปรียบเทียบกับเครื่องมือเดียวกัน พบว่าเมมเบรนเนฟิออนมีค่าการนำโปรตอนที่สูงมากเมื่อเทียบกับเมมเบรนยาง ENR ยาง ENR ผสมไคโตซานและเมมเบรนไคโตซานที่เตรียมได้ทั้งหมด และจากการศึกษาพบว่าเมมเบรนเนฟิออน 117 ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10% v/v นั้น จะมีค่าการนำโปรตอนที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นกันเมื่อเทียบกับที่ไม่แช่กรด โดยจากค่าการนำโปรตอนที่ทดสอบด้วยวิธีเดียวกันนี้แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนยาง ENR มีค่าการนำโปรตอนต่ำกว่า เมมเบรนเนฟิออน 117 ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดประมาณ 45,200 เท่า แต่เมื่อผสมไคโตซานลงไปในยาง ENR จะพบว่ามีความแตกต่างลดลงเหลือแค่ประมาณ 7,800 เท่า และ เมมเบรนที่สามารถเตรียมได้ในงานวิจัยนี้ที่มีค่าการนำโปรตอนสูงสุดคือเมมเบรนไคโตซานที่แช่กรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งมีค่าการนำโปรตอนเท่ากับ 3.3671×10^{-4} S/cm ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของเมมเบรนเนฟิ

ออนประมาณ 15 เท่า ซึ่งถือได้ว่ามีค่าที่แตกต่างกันไม่มากนัก การเพิ่มขึ้นของค่าการนำโปรตอนในเมมเบรนยาง ENR เมื่อมีปริมาณโคโตะซานเพิ่มขึ้นนั้น เพราะโคโตะซานมีสมบัติการนำโปรตอนที่สูงกว่ายาง ENR มากซึ่งเกิดจากการที่หมู่วงไวยทำปฏิกิริยาซัลโฟเนตกับกรดซัลฟิวริก (ดังรูป 4.9) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการขนถ่ายโปรตอน อีกทั้งการที่โคโตะซานมีการบวมตัวในน้ำสูง ก็มีส่วนช่วยให้การนำโปรตอนสูงกว่าเมมเบรนจากยาง ENR เช่นกัน แต่เมื่อทำการแช่เมมเบรนในกรดซัลฟิวริกที่เวลานานขึ้น ค่าการนำโปรตอนกลับลดลงทั้งนี้เพราะเป็นผลมาจากการที่มีหมู่ซัลเฟตในเนื้อเมมเบรนเพิ่มขึ้นเมื่อแช่ในกรดซัลฟิวริก ส่งผลให้สายโซ่โพลิเมอร์เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันมากขึ้น และทำให้เกิดการเชื่อมขวางขึ้นภายในเมมเบรน ส่งผลให้สายโซ่โพลิเมอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ แม้ว่าการดูดซับน้ำของเมมเบรน ยาง ENR และยาง ENR ผสมโคโตะซานมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงเมื่อเวลาในการแช่กรดนานขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีหมู่ซัลเฟตที่ผิวเมมเบรนซึ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำ ทำให้การดูดซับน้ำบริเวณผิวเมมเบรนเพิ่มขึ้น แต่ภายในเมมเบรนจะเกิดการเชื่อมขวางซึ่งเป็นการขัดขวางการแพร่ผ่านของน้ำในเมมเบรน ทำให้โมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นพาหนะในการส่งผ่านโปรตอนมีน้อยลงส่งผลให้ความสามารถในการนำโปรตอนต่ำลงด้วยเช่นกัน (นฤมล, 2549) และอีกปัจจัยหนึ่งคือยาง ENR เป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการฟอร์มตัวของไอออนคู่ควบขึ้นภายในเมมเบรนทำให้ค่าการนำโปรตอนต่ำ (Mukoma *et al.*, 2004)

3.3 เซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเอทานอลโดยตรง

จากผลการทดลองค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนที่ผ่านการแช่กรดที่เวลาต่าง ๆ ในตาราง 2 นั้น พบว่าค่าการนำโปรตอนของเมมเบรนที่เตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการนั้น มีค่าที่ต่ำกว่าเมมเบรนเนฟิออนเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการทดสอบเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับเอทานอลโดยตรงนั้น จะใช้เมมเบรนเนฟิออนในการทดสอบ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่า โดยจะใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบและได้ทำการเปรียบเทียบกับเมมเบรน CS ที่ใช้ในสารละลายกรดเป็นเวลา 20 นาที รูปภาพ 33 อธิพลความหนาแน่นของกระแสที่มีต่อความต่างศักย์ของเซลล์และความเข้มของพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระหว่างเมมเบรน CS และเมมเบรนเนฟิออนซึ่งใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างเมมเบรนเนฟิออนกับเมมเบรนที่เตรียมได้พบว่าความเข้มของพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรนเนฟิออนมีค่าเท่ากับ 80 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ณ ความหนาแน่นของกระแส 280 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่เมมเบรน CS ที่เตรียมได้มีความเข้มของพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ของเมมเบรนเนฟิออนมีค่าเท่ากับ 58 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ณ ความหนาแน่นของกระแส 210 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



รูปภาพ 33 อิทธิพลความหนาแน่นของกระแสที่มีต่อความต่างศักย์ของเซลล์และความเข้มของพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระหว่างเมมเบรน CS และเมมเบรนเนฟิออน

3.4 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอล

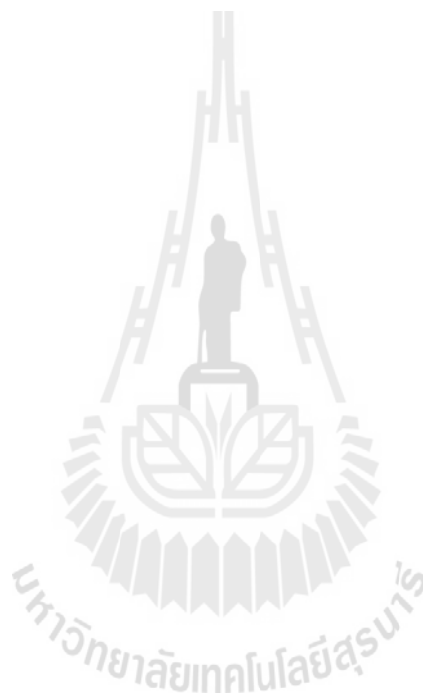
ในการทดลองสุดท้ายเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรงจากน้ำหมักที่ผ่านการกรองด้วยระบบไมโครฟิวเตรชัน ซึ่งในขั้นตอนแรกได้ทำการเลี้ยงเซลล์ในถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ เพื่อทำการผลิตเอทานอล จากนั้นเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักมีค่าประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ได้ทำการกรองผ่านเยื่อแผ่นชนิด ไมโครฟิวเตรชัน (micro-filtration, MF) เพื่อทำการกรองเซลล์ออก ก่อนที่จะนำส่วนที่กรองได้ (filtrate) มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเลย ซึ่งทั้งนี้อาจจะเกิดเนื่องจากสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำหมักไปขัดขวางการออกซิไดซ์เอทานอล ณ บริเวณขั้วไฟฟ้าอะโนด ทำให้การทดลองนี้ไม่ประสบผลสำเร็จ ดังนั้นสารละลายเอทานอลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลนั้น ควรเป็นสารละลายเอทานอลที่ได้จากกระบวนการกลั่นเท่านั้น จึงจะทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้

บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง

เทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสูญญากาศประสิทธิภาพสูงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักน้ำหมัก โดยจลนพลศาสตร์การหมักแสดงให้เห็นถึงการยับยั้งอย่างมีนัยสำคัญของผลิตภัณฑ์และความเข้มข้นวิกฤตของเอทานอลอยู่ที่ 100 กรัมต่อลิตร น้ำหมักถูกทำให้เดือดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยทำการลดความดันบรรยากาศลงถึงระดับที่ 45 มิลลิบาร์ ไอผสมของเอทานอลจะถูกกลั่นลำดับส่วนให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 94 ก่อนที่จะลอยออกจากหอกลั่นออกไป ส่งผลให้ส่วนกลั่นเอทานอลนั้น สามารถเอาเข้าสู่กระบวนการแยกน้ำได้โดยตรง โดยไม่ต้องทำการกลั่นเพิ่มเติมอีก ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักนั้นถูกจำกัดให้อยู่ในระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 25 กรัมต่อลิตร ซึ่งส่งผลทำให้ลดอิทธิพลจากการยับยั้งผลิตภัณฑ์สำหรับการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักแบบกะนั้น อัตราการใช้สารตั้งต้นอยู่ที่ 26.6 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และน้ำตาลกลูโคสจะถูกใช้หมดภายใน 21 ชั่วโมง การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักแบบกะข้านั้น สามารถเติมน้ำตาลกลูโคสเข้าไปได้ 8 ครั้ง และเอทานอลถูกผลิตได้ 8 เท่าของการหมักแบบกะ

จากการเตรียมเมมเบรนยาง ENR ยาง ENR ผสมโคโตะซานและโคโตะซาน พบว่าการผสมโคโตะซานกับยาง ENR โดยการเติมสารละลายโคโตะซานลงไประหว่างการสังเคราะห์ยาง ENR นั้น พบว่าค่า Tg ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปได้ว่ายาง ENR มีความเข้ากันได้กับโคโตะซานโดยการเกิดพันธะ C-O-C ระหว่างกัน ทั้งนี้การผสม โคโตะซานร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม ทำให้ร้อยละของโมล epoxide ลดลงจาก 40% โมล เหลือ 15 % และ 25 % โมลตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณโคโตะซานเพิ่มเป็นร้อยละ 8 และ 10 จะไม่มีผลต่อร้อยละของโมล epoxide การเติมโคโตะซานลงในยาง ENR นั้น ทำให้การดูดซับน้ำ, การดูดซับเมทานอล, สมบัติทางไฟฟ้า, ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุและสมบัติการนำโปรตอนเพิ่มขึ้น การแช่เมมเบรนที่เตรียมได้ทั้งหมดในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10% v/v จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางขึ้นในเมมเบรน ซึ่งจะทำให้ค่า Tg ของเมมเบรนผสมเพิ่มขึ้น การดูดซับน้ำจะเพิ่มเล็กน้อยเมื่อแช่เมมเบรนในกรดซัลฟิวริกใน 10 นาทีแรก แต่ในกรณีของเมมเบรนโคโตะซานนั้นการแช่กรดซัลฟิวริกจะทำให้การดูดซับน้ำและเมทานอลลดลง ส่วนค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุของเมมเบรนยาง ENR และยาง ENR ผสมโคโตะซานจะมีค่าลดลงเมื่อแช่กรดนานขึ้น แต่เมมเบรนโคโตะซานพบว่าการแช่กรดจะทำให้ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงขึ้น และมีค่าสูงกว่ายาง ENR มาก เมมเบรนที่เตรียมได้นั้นจะมีประสิทธิภาพด้านการนำโปรตอนเพิ่มขึ้นตามปริมาณโคโตะซานที่เพิ่มขึ้น แต่การแช่เมมเบรนที่เตรียมได้ทั้งหมดในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10% v/v จะทำให้เมมเบรนเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติด้านการนำโปรตอนต่ำลง และมีค่าน้อยกว่าของเนฟลอนมาก แต่ทั้งนี้จากค่าความนำไฟฟ้าของเมมเบรนที่เตรียมได้

ทั้งหมดชี้ให้เห็นว่าเมมเบรนมีสมบัติเป็น semiconductors ส่วนเมมเบรนไคโตซานที่แช่กรดซัลฟิวริก เป็นเวลา 5 นาทีจะมีค่าการนำโปรตอนสูงที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรน เนฟลอนซึ่งเป็น เมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิงเชิงการค้า พบว่าเมมเบรนไคโตซานที่แช่กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10% v/v เป็น เวลา 5 นาทีจะมีค่าการนำโปรตอนใกล้เคียงกับเมมเบรนเนฟลอน



บรรณานุกรม

- Chaudhuri, S. K., and Lovley, D. R. (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. **Nature biotechnology**. 21: 1229-1232.
- McGinley, J., McHale, F. N., Hughes, P., Reid, C. N., and McHale, A. P. (2004). Production of electrical energy from carbohydrates using a transition metal-catalysed liquid alkaline fuel cell. **Biotechnology letters**. 26: 1771-1776.
- Oh, S., Min, B., and Logan, B. E. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. **Environmental science & technology**. 38: 4900-4904.
- Xin, J. Y., Cui, J. R., Niu, J. Z., Hua, S. F., Xia, C. G., Li, S. B., and Zhu, L. M. (2004). Biosynthesis of Methanol from CO₂ and CH₄ by Methanotropic Bacteria. **Biotechnology**. 3: 67-71.
- Hanson, R. S., and Hanson, E. T. (1996). Methanotropic bacteria. **Microbiol Rev**. 60: 439-471.
- Bailey, J., and Ollis, O. (1986). *Biochemical Engineering Fundamentals* (2 ed.): McGraw-Hill, New York.
- Lamy, C., Rousseau, S., Belgsir, E. M., Coutanceau, C., and Léger, J. M. (2004). Recent progress in the direct ethanol fuel cell: development of new platinum-tin electrocatalysts. **Electrochimica Acta**. 49: 3901-3908.
- Mann, J., Yao, N., and Bocarsly, A. B. (2006). Characterization and analysis of new catalysts for a direct ethanol fuel cell. **Langmuir**. 22: 10432-10436.
- Ermete, A. (2007). Catalysts for direct ethanol fuel cells. **J Power Sources**. 170: 1-12.
- Wang, H. F., and Liu, Z. P. (2008). Comprehensive mechanism and structure-sensitivity of ethanol oxidation on platinum: new transition-state searching method for resolving the complex reaction network. **Journal of the American Chemical Society**. 130: 10996-11004.

Kowal, A., Li, M., Shao, M., Sasaki, K., Vukmirovic, M. B., Zhang, J., Marinkovic, N. S., Liu, P., Frenkel, A. I., and Adzic, R. R. (2009). Ternary Pt/Rh/SnO₂ electrocatalysts for oxidizing ethanol to CO₂. **Nature materials**. 8: 325-330.



ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ : นาย อภิชาติ บุญทาวัน
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : รองศาสตราจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ
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	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การอาหาร (เกียรตินิยม)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ไทย
1990	มัธยมศึกษา ตอนปลาย	-	โรงเรียนปริญญ์รอยัลวิทยาลัย เชียงใหม่	ไทย

5. ประสบการณ์การทำงาน

- งานวิจัยหลังปริญญาเอก ASEAN-UNINET Post-doc, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเวียenna, ประเทศออสเตรเลีย (พ.ศ. 2550- เม.ย. 2551)
- อาจารย์/ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ม.ค. 2548 - ปัจจุบัน)

6. สถานะภาพงานวิจัย

หัวหน้าโครงการ

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

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

- การประยุกต์ใช้สเปกโตรสโคปีของรังสีใกล้คลื่นใต้แดงในการควบคุมการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์โดยใช้ระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ

แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

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

- การประยุกต์ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์อินทรีย์เซชันในการแยกโปรตีนเอ็นเทอร์โคเนส จากน้ำหมัก

แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

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

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

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

- การวิเคราะห์สมดุลมวลและพลังงานของการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์จากน้ำหมักในระดับโรงงาน ต้นแบบด้วยเทคนิคผสมระหว่างการกลั่น การแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น และการดูดซับ

แหล่งเงินทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

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

- การสร้างโรงงานต้นแบบการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงจากมันสำปะหลังโดยใช้เทคนิคผสมระหว่างการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

- การทำบริสุทธิ์กรดซัคซินิคจากน้ำหมักด้วยวิธีตกตะกอน เอสเทอร์ริฟิเคชันและการกลั่น

แหล่งเงินทุน: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ

537,200. บาท งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

- การทำบริสุทธิ์กรด D- และ L-แล็คติกด้วยวิธีเอสเทอร์รีฟิเคชันและการกลั่นจากน้ำหมัก
แหล่งเงินทุน: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (B10-52)
3,272,440. บาท (ธ.ค. 2552- พ.ย. 2553) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
- การออกแบบถังปฏิกรณ์แบบท่อไหลสำหรับการทำบริสุทธิ์กรด D-แล็คติก
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
683,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- การพัฒนาท่อใยกลวงเซรามิคเชิงประกอบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลด้วยระบบ
การแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่น
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

- การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการทำบริสุทธิ์กรดดีแล็คติกโดยอิงเทคโนโลยีการกลั่น
พร้อมการทำเอสเทอร์รีฟิเคชัน (สัญญา สนช-มก-มทส เลขที่ B10-52) จากน้ำหมัก
ของบริษัท มิตรผลวิจัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด
แหล่งเงินทุน: บริษัท มิตรผลวิจัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด
หัวหน้าโครงการ: ผศ.ดร. วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน
1,187,220. บาท (1 พ.ย 2553- เม.ย 2554) งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

- การพัฒนาเยื่อแผ่นเชิงประกอบจากยางธรรมชาติสำหรับการแยกเอทิลแอลกอฮอล์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันด้วยระบบเพอร์เมเอชัน
- แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- หัวหน้าโครงการ: อ.ดร. วิรัช ทวีปรีดา
- 665,000. บาท (23 ต.ค 2553- 22 ต.ค 2554) งานวิจัยเสรีจสมบурณ์

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*, 47(12): 1948-1956

- 7 Pimkaew, S., and **Boontawan, A.** (2011) Process Optimization for Motor Fuel Grade Ethanol Production using Hybrid Vapor Permeation and Pressure Swing Adsorption Technique, *Euro J of Sci Res*, 64(4): 644-657

8. **งานนำเสนอในงานประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ:**

1. **Boontawan, A.**, Schausberger, P., Bösch, P., Brinkmann, T., and Friedl, A. Dehydration of Ethanol/Water Mixture using Pervaporation and Vapor Permeation Technique. *The 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