



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเมมเบรนเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ
แก๊สชีวภาพเป็นไบโอมีเทน

โดย

อาทิตย์ อัสวสุชี และคณะ

ธันวาคม 2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาเมมเบรนเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ
แก๊สชีวภาพเป็นไบโอมีเทน

คณะผู้วิจัย	สังกัด
อาทิตย์ อัครสุชี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ชลลดา ฤตวิรุพห์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สุภารัตน์ รักชลธิ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตะวัน สุขน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

การนำแก๊สชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการหมักไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม หรือวิสาหกิจชุมชนขนาดใหญ่ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ การผลิตกระแสไฟฟ้า หรืออุตสาหกรรมที่ต้องการความร้อนสูง ไม่สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากแก๊สชีวภาพมีปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากทำให้มีค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำ จึงจำเป็นที่จะต้องมีความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพ เพื่อผลิตเป็นไบโอมีเทนสำหรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์ เทคโนโลยีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง มีขั้นตอนการทำงานไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการบำรุงรักษา ใช้พลังงานต่ำ ได้แก่ เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน อย่างไรก็ตามประเทศไทยมีการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนสำหรับการแยกแก๊สในเชิงพาณิชย์ไม่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากไม่สามารถผลิตเมมเบรนได้เอง อีกทั้งระบบการแยกแก๊สชีวภาพด้วยเมมเบรนยังต้องดำเนินการภายใต้ความดันสูง มีประสิทธิภาพต่ำ มีการสูญเสียแก๊สมีเทนค่อนข้างสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาเมมเบรนที่มีราคาถูก มีการเลือกสรรแก๊สมีเทนสูง รวมถึงสามารถดำเนินการแยกแก๊สชีวภาพได้ด้วยความดันต่ำลง และสามารถนำเทคโนโลยีที่ได้ไปใช้พัฒนาพลังงานทดแทนจากแก๊สชีวภาพเพื่อใช้ในภาคอุตสาหกรรม หรือวิสาหกิจชุมชนขนาดใหญ่อย่างยั่งยืน นอกจากนี้ยังทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเมมเบรนโดยการเติมสารเติมแต่งซิลิกาเพื่อเพิ่มการผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และเพิ่มการเลือกสรรการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากมีเทน โดยซิลิกาที่ใช้เป็นสารเติมแต่งนี้สามารถเตรียมได้จากเถ้าลอยถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้ที่ได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : RDG61D0001
 ชื่อโครงการ : การพัฒนาเมมเบรนเพื่อการปรับปรุงคุณภาพ
 แก๊สชีวภาพเป็นไบโอมีเทน
 ชื่อนักวิจัย : อาทิตย์ อัสวสุชี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
 จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
 ชลลดา ฤตวิรุฬห์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สุภารัตน์ รักชลธี
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ตะวัน สุขน้อย
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 E-mail Address : ausavasukhi@gmail.com

ระยะเวลาโครงการ : 1 ปี

งานวิจัยนี้ศึกษาการซึมผ่านเมมเบรนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนเพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตไบโอมีเทนระดับชุมชน พอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์เมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยคือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีน-เอทิลอะคริเลต (EEA) และพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต (EVA) นอกจากนี้ยังศึกษาผลของปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตต และปริมาณสารตัวเติมซิลิกาที่ส่งผลต่อการแยกแก๊ส และวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของเมมเบรน เช่น หมู่ฟังก์ชัน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล มุมสัมผัสหยดน้ำ และฐานฐานวิทยา ผลการทดลองพบว่าเมมเบรนชนิดที่มีขั้วจะมีความสามารถในการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีแต่จะซึมผ่านแก๊สมีเทนได้ลดลง ปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตตที่เป็นองค์ประกอบในโคพอลิเมอร์เมมเบรน จะมีผลทำให้ปริมาณผลึกของเมมเบรนลดลง และส่งเสริมให้การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีขึ้น โดย EVA33 มีค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 318 กรัมต่อตารางเมตรวัน และมีค่าการเลือกสรรแก๊สเท่ากับ 13.28 และเมื่อเติมซิลิกาผสมในเมมเบรน พบว่าซิลิกาจะไม่รบกวนการเกิดผลึกของโคพอลิเมอร์ และไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเมมเบรน แต่สามารถเพิ่มความมีขั้วของเมมเบรนได้ และช่วยส่งเสริมให้การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีขึ้น โดยเมมเบรนชนิด EVA33 ที่ได้รับการเติมแต่งซิลิกาจำนวน 2 ส่วนในร้อยละมีค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดเท่ากับ 939 กรัมต่อตารางเมตรวัน และมีค่าการเลือกสรรแก๊สเท่ากับ 31.75

คำสำคัญ: เมมเบรน, การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ, ไบโอมีเทน

Abstract

Project Code : RDG61D0001

Project Title : Development of membrane for biogas upgrading to biomethane

Investigator : Artit Ausavasukhi
 Rajamangala University of Technology Isan
 Jittiwat Nithikarnjanatharn
 Rajamangala University of Technology Isan
 Chonlada Ritvirulh
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Suparat Rukchonlatee
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Tawan Sooknoi
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

E-mail Address : ausavasukhi@gmail.com

Project Period : 1 year

The permeability of carbon dioxide and methane gas using membranes were investigated to develop and apply in the production of biomethane gas at the community biogas plant. LDPE polymer, EEA and EVA copolymers were selected as the membrane matrix in the research. Effects of vinyl acetate groups and amount of silica fillers that affect to gas separation were also studied. Physical and chemical properties of the membranes such as functional groups, thermal properties, mechanical properties, water droplets contact angle as well as morphology were characterized. The results showed that the polar type membrane has the ability to permeate carbon dioxide well, but the permeability of methane has decreased. The amount of vinyl acetate in the membrane copolymer resulted in a decrease in degree of crystallinity of the membrane, leading to high carbon dioxide permeability. For the pure membranes, EVA33 gave the highest flux of carbon dioxide as 318 g/m²·day and gas selectivity (CO₂/CH₄) was 13.28. Silica particles did not interfere the crystallization of copolymer as well as not affect the mechanical properties of the membrane. But it can increase the polarity of the membrane and promote the carbon dioxide permeability. EVA33/2.0SiO₂ resulted the highest flux of carbon dioxide as 939 g/m²·day and gas selectivity (CO₂/CH₄) was 31.75.

Keywords: Membrane, Biogas upgrading, Biomethane

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาเรื่องพลังงานเป็นปัญหาสำคัญของโลก และมีผลกระทบรุนแรงต่อมวลมนุษยชาติมากขึ้นทุกทีเนื่องจากพลังงานฟอสซิลมีปริมาณลดลง แต่มีราคาสูงขึ้น การร่วมหาหนทางแก้ไขทั้งจากหน่วยงานของภาครัฐ และภาคเอกชนหลายแห่งได้ริเริ่มโครงการการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อใช้ในชุมชน และในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามการนำแก๊สชีวภาพเพื่อไปผลิตเป็นไบโอมีเทนจำเป็นต้องมีกระบวนการแยกแก๊สสิ่งเจือปน เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกเสียก่อนเพื่อให้ได้ไบโอมีเทนที่มีค่าความร้อนสูง และไม่มีมลทินที่รบกวนระบบการผลิต การศึกษาการจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการดูดซับโดยใช้วัสดุจากธรรมชาติซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (วัสดุสีเขียว) มาใช้เป็นตัวดูดซับ ได้แก่ ลีโอนาร์ไดต์ (Leonardite) และดินแดง (Red clay) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีมูลค่าต่ำที่ได้จากการทำเหมืองแร่ลิกไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และวัสดุนี้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจนกลายเป็นปัญหาในการจัดการ มากไปกว่านั้นตัวดูดซับนี้ยังมีโลหะทรานซิชัน (Transition metal) เช่น เหล็ก เป็นส่วนประกอบ รวมถึงมีสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูง ทำให้ลีโอนาร์ไดต์และดินแดงมีศักยภาพในการใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ [1] อย่างไรก็ตามการจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับทำได้ยากเนื่องจากมีปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบในแก๊สชีวภาพเป็นจำนวนมาก (มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์) จึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure swing adsorption) โดยตัวดูดซับจะต้องสามารถคืนสภาพได้โดยง่ายเพียงการคายซับออกด้วยการลดความดัน เพื่อให้ตัวดูดซับพร้อมสำหรับการกำจัดแก๊สโดยการดูดซับในรอบต่อไป [2] อย่างไรก็ตามการติดตั้งกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันจะมีค่าใช้จ่ายสูง และการดำเนินการทำได้ยาก ในขณะที่กระบวนการดักจับด้วยน้ำ (Water scrubbing) จำเป็นที่ต้องใช้น้ำในกระบวนการในปริมาณมาก มีน้ำเสียเกิดขึ้น และมีการสูญเสียแก๊สมีเทนในปริมาณมาก เทคโนโลยีที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูง มีขั้นตอนการทำงานไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการบำรุงรักษา และใช้พลังงานต่ำ ได้แก่ เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน [3] โดยแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชีวภาพ และแก๊สธรรมชาติโดยใช้กระบวนการเมมเบรนคอนแทคเตอร์ ซึ่งเป็นกระบวนการดูดซึมแก๊สโดยใช้เมมเบรนเป็นตัวกั้นระหว่างเฟสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแก๊สมีเทนหรือลดปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทนด้วยเมมเบรนหลายชนิด เช่น เซลลูโลส อะซิเตต (Cellulose acetate) [4-5] แอล-อาร์จินีน (L-arginine) และโพแทสเซียม แอล-อาร์จินิเนต (Potassium L-argininate) [6] พอลิเอไมด์ (Polyamide) [5, 7] พอลิเอทรีลอีเทอร์-คีโตน-คีโตน (Polyarylether-ketone-ketone) [5] อีพอกซี-เอมีนจากไอออนเจล (Epoxy-amine-based ion gel) [8] พอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ 1,3-ไซโคลเฮกเซนบิส-เมทิลามีน (1,3-Cyclohexanebis-methylamine) และไตรเมโทซิล คลอไรด์

(Trimesoyl chloride) [9] พอลิไดเมทิลซิลลอกเซน (Polydimethylsiloxane) [10-11] พอลิอีไมด์ (Polyimide) [12] เมมเบรนผสมระหว่างเมทัลลอร์แกนิกเฟรมเวิร์ค (Metal organic frameworks) กับพอลิซัลโฟน (Polysulfone) และพอลิอีไมด์ (Polyimide) [13] คอมโพสิตเมมเบรนของพอลิ (อีเทอร์-บี-เอไมด์) (Poly(ether-b-amide; Pebax11657) กับ พอลิอะคริโลไนไตรล์ (Polyacrylonitrile) [14] พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) [15] และซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 [16] แม้ว่าจะมีการศึกษาการเตรียมเมมเบรนเพื่อใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทนด้วยพอลิเมอร์หลายชนิด และวัสดุที่มีรูพรุน อย่างไรก็ตามการเตรียมเมมเบรนด้วยวิธีการดังกล่าวมีวิธีการเตรียมที่ยุ่งยาก อีกทั้งพอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมเมมเบรนยังเป็นพอลิเมอร์ที่มีราคาแพง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาเมมเบรนที่มีราคาถูก โดยใช้พอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตต (Polyethylene-vinyl acetate; EVA) โดยศึกษาปริมาณของไวนิลอะซิเตตต่อประสิทธิภาพการแยกแก๊ส รวมถึงเตรียมเมมเบรนให้เป็นวัสดุคอมโพสิตโดยการเติมแต่งซิลิกาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกแก๊ส [17] โดยซิลิกานี้สามารถเตรียมได้จากเถ้าลอยถ่านหิน (Coal fly ash) ซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เหมืองลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การนำวัสดุพลอยได้ที่มีอยู่มาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดเป็นแนวทางหนึ่งในการทำให้ผู้ประกอบการมีรายได้สูงขึ้น ดังนั้นโครงการ “การพัฒนาเมมเบรนเพื่อการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพเป็นไบโอมีเทน” จะช่วยให้การพัฒนาพลังงานทดแทนจากแก๊สชีวภาพเป็นไปอย่างยั่งยืน และสามารถเพิ่มมูลค่าของเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการขึ้นรูปเมมเบรน

2.2 เพื่อเข้าใจคุณลักษณะและสมบัติของเมมเบรนที่เหมาะสมสำหรับการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทน

2.3 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อผลิตไบโอมีเทนคุณภาพสูง

3. วิธีทดลอง

3.1 การทดลองในระบบเซลล์ทดสอบ

3.1.1 การเตรียมคอมโพสิตซิลิกา/โคพอลิเมอร์เมมเบรน

ผสมผงซิลิกา (SiO_2) กับพอลิเมอร์ที่ต้องการ โดยใช้เทคนิคการผสมพอลิเมอร์และผงซิลิกาด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว (Melt mixing technique) ในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ขนาด 50 กรัม ดังรูปที่ 1 สภาวะที่ใช้ในการผสม คือ ใช้อุณหภูมิผสม 130 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของใบพัดตัวหมุนตั้งไว้ที่ 100 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการผสมคือ 30 นาที

จากนั้นชั่งเม็ดพลาสติก 40 กรัม แล้วใส่ในห้องผสม เมื่อเม็ดพลาสติกหลอมแล้ว ใส่ผงซิลิกาลงไป โดยควบคุมปริมาณของซิลิกาให้ได้สัดส่วนเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 เมื่อเทียบกับน้ำหนักพอลิเมอร์ 100 กรัม (phr) จากนั้นทำการผสมจนครบตามเวลาที่กำหนด



รูปที่ 1 เครื่องผสมระบบปิด

3.1.2 การขึ้นรูปเมมเบรนพอลิเมอร์

ขึ้นรูปเมมเบรนโดยใช้เครื่องขึ้นรูปด้วยการกดอัด (Compression molding machine) ดังรูปที่ 2 โดยใช้ปริมาณพอลิเมอร์ในการขึ้นรูปแต่ละครั้งประมาณ 0.40 กรัม สำหรับการขึ้นรูปแต่ละครั้งจะใช้แผ่นเทปลอนที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร รองรับสารตัวอย่างในขณะที่กดอัด จะได้เมมเบรนที่มีความหนาประมาณ 40-60 ไมโครเมตร โดยที่สภาวะที่ในการขึ้นรูปเป็นดังนี้

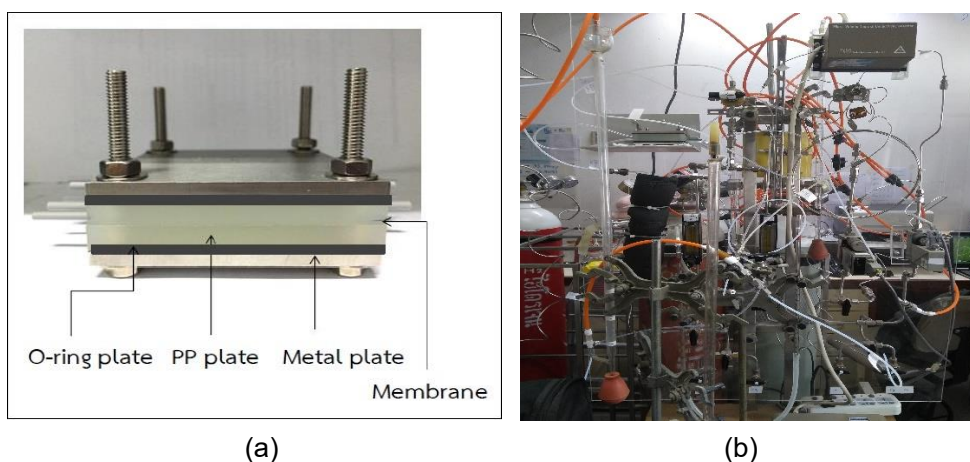
อุณหภูมิในการกดอัด	170 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในการหล่อเย็น	12 องศาเซลเซียส
เวลาที่ใช้ในการอุ่นสารตัวอย่าง	10 นาที
เวลาที่ใช้ในการกดอัด	10 นาที
เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น	10 นาที



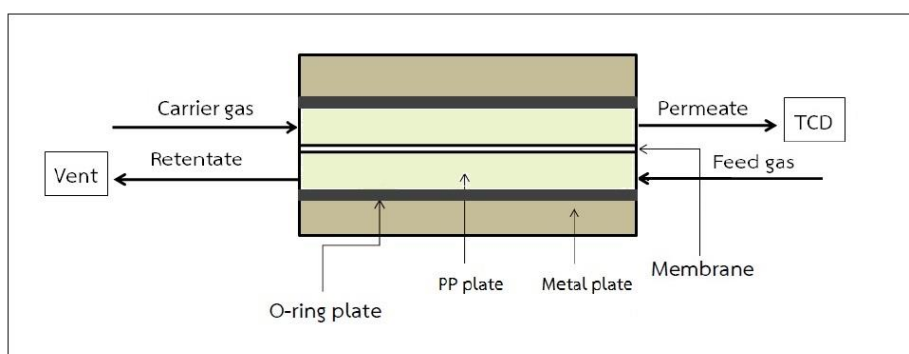
รูปที่ 2 เครื่องขึ้นรูปด้วยการกดอัด

3.1.3 การทดสอบการซึมผ่านแก๊ส

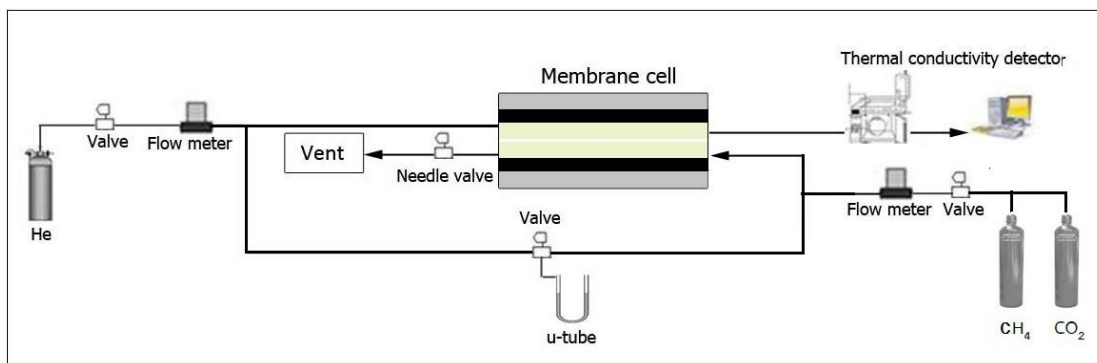
การทดสอบการซึมผ่านแก๊ส เริ่มจากตัดแผ่นเมมเบรนตัวอย่างให้ได้ขนาด 6x6 ตารางเซนติเมตร จากนั้นใส่แผ่นเมมเบรนในเซลล์ทดสอบ (รูปที่ 3a) ประกอบเซลล์ทดสอบให้แน่น แล้วต่อเซลล์ทดสอบเข้ากับแผงทดสอบ ดังรูปที่ 3b จากนั้นผ่านแก๊สที่จะทดสอบเข้าด้านล่างของเซลล์ที่ตำแหน่ง แก๊สป้อน (Feed gas) ดังรูปที่ 4 ด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที แก๊สบางส่วนที่สามารถซึมผ่านเมมเบรนได้ (Permeated gas) จะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนขึ้นสู่ด้านบนของเมมเบรน แก๊สที่ไม่สามารถซึมผ่านเมมเบรนได้ จะออกจากเซลล์ทดสอบที่ตำแหน่งทางออก (Vent) จะถูกเรียกว่า Retentate gas ในขณะเดียวกัน Permeated gas จะถูกแก๊สตัวพา (Carrier gas) คือฮีเลียม (He) พาเข้าสู่เครื่องตรวจจับปริมาณแก๊ส ด้วยด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที ตามระบบแผงทดสอบ (รูปที่ 5)



รูปที่ 3 (a) เซลล์ทดสอบสำหรับใส่เมมเบรน และ (b) แผงทดสอบการซึมผ่านแก๊ส



รูปที่ 4 ทิศทางการไหลของแก๊สภายในเซลล์ทดสอบ



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงแนวทดสอบการทดสอบการซึมผ่านแก๊ส

คำนวณหาฟลักซ์ของแก๊สที่ซึมผ่านเมมเบรนโดยใช้สมการ

$$\text{ฟลักซ์ของแก๊ส (Flux)} = \frac{(A_s/A_{\text{std}}) \times P \times M_w \times F \times 1440}{R \times T \times A}$$

$$\text{การคัดสรรแก๊ส (selectivity)} = \frac{\text{CO}_2 \text{ flux}}{\text{CH}_4 \text{ flux}}$$

เมื่อ

Flux = ฟลักซ์ของแก๊ส ($\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$)

A_s = พื้นที่ใต้พีคสัญญาณของแก๊สตัวอย่าง

A_{std} = พื้นที่ใต้พีคสัญญาณของแก๊สมาตรฐาน

P = ความดัน (atm)

M_w = น้ำหนักโมเลกุลแก๊สตัวอย่าง (g/mol)

F = อัตราการไหลของแก๊ส (L/min)

R = ค่าคงที่แก๊ส ($\text{L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol}$)

T = อุณหภูมิ (K)

A = พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน (m^2)

3.2 การทดลองในระบบโมดูล

3.2.1 การขึ้นรูปเมมเบรน

ในขั้นตอนแรกจะทำการขึ้นรูปเมมเบรนให้มีลักษณะเป็นท่อยาว โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film extrusion technique) อุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 6 โดยในขั้นตอนการทดลองนี้เลือกใช้พอลิเอทิลีนสามชนิดในการทดลอง คือ HDPE, LDPE และ EVA27.5 โดยตั้งสภาวะของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวที่ต่อกับเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มที่ใช้ตายประเภทวงแหวน (Annular die) ดังนี้

สภาวะเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว เพื่อควบคุมความหนาของฟิล์ม 30-40 ไมครอน

สภาวะเครื่องขึ้นรูปฟิล์ม	HDPE	LDPE	EVA27.5
- อุณหภูมิ			
Feed zone	190 °C	160 °C	140 °C
Compression zone	200 °C	160 °C	140 °C
Metering zone	200 °C	160 °C	140 °C
Screw speed	10 rpm	60 rpm	50 rpm
- สภาวะเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม			
Blowing zone	200 °C	150 °C	120 °C
Upper zone	200 °C	150 °C	120 °C
Lower zone	200 °C	150 °C	120 °C
ขนาดปั๊มลมที่ใช้	5 bar	5 bar	5 bar
ความเร็วลูกกลิ้งที่1	1.0-1.6 rpm	0.35 rpm	0.25 rpm
ความเร็วลูกกลิ้งที่2	1.0-1.6 rpm	0.35 rpm	0.25 rpm



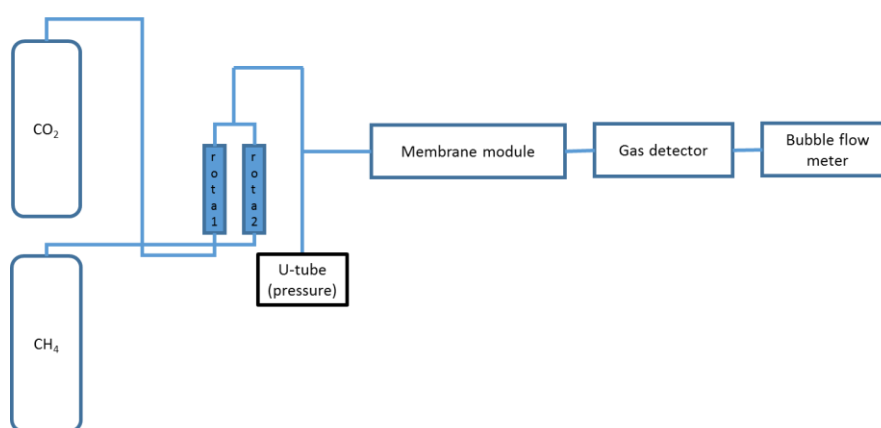
รูปที่ 6 เครื่องขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า

3.2.2 การทดสอบการซึมผ่านแก๊สในระบบโมดูล

นำท่อเมมเบรนที่มีความยาวประมาณ 4 เมตร ประกอบเข้าในชุดอุปกรณ์ทดสอบ (Module) ที่มีลักษณะเป็นซี่ ดังรูปที่ 7 จากนั้น ประกอบโมดูลเข้ากับแผงการทดสอบการซึมผ่านแก๊ส ดังรูปที่ 8 เมื่อประกอบทุกส่วนประกอบแล้ว ในขั้นตอนการทดสอบจะทำการผ่านแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน ในอัตราส่วน 50:50 เข้าไปยังระบบทดสอบ แล้วตรวจวัดชนิดของแก๊สและสัดส่วนแก๊สที่ไหลผ่านโมดูลออกมาด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส Biogas 5000 ตรวจวัดอัตราการไหลของแก๊สด้วย Bubble flow meter จากนั้นนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ค่าการซึมผ่านแก๊ส และการคัตสรรแก๊ส



รูปที่ 7 การประกอบท่อเมมเบรนพอลิเมอร์ในโมดูล



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงแผงทดสอบการทดสอบการซึมผ่านแก๊สในระบบโมดูล

3.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของเมมเบรน

ตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเมมเบรน โดยใช้เครื่องมืออินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectrometer; IR) รุ่น IRTracer-100 (Shimadzu) ตรวจวิเคราะห์เมมเบรนในช่วงเลขคลื่น 650-4000 เซนติเมตร⁻¹

ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของเมมเบรนโดยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter; DSC) รุ่น DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch) ทำการตรวจสอบในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -50-150 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้งประมาณ 10 มิลลิกรัม

ทดสอบความต้านทานแรงดึงของเมมเบรนโดยใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลเทสติง (Universal testing machine; UTM) รุ่น LR-5K (LLOYD) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D882-10 ขนาดของชิ้นงาน 1.5x8x0.01 cm³ ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ใช้อัตราเร็วในการทดสอบ 10 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้โหลดเซลล์ 100 นิวตัน

ตรวจสอบมุมสัมผัสของเมมเบรน โดยเครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle) รุ่น OCA 20 (DATAPHYSICS) ปริมาณหยดน้ำที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 2.00 ไมโครลิตร วัดมุมสัมผัสที่บริเวณภาคตัดขวาง (cross section) ของเมมเบรน เตรียมชิ้นงานตัวอย่างขนาด 4x1x0.2 cm³ แช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วหักชิ้นงาน

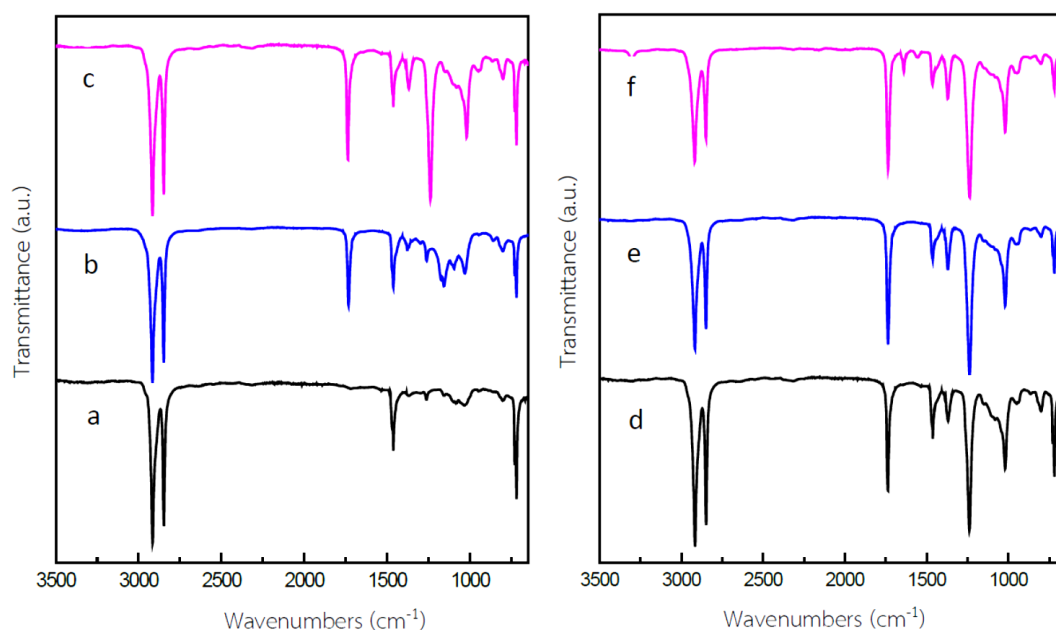
ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของเมมเบรนและการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในเมมเบรน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope; SEM) รุ่น JSM-5410LV (JOEL) ทำการเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนการวิเคราะห์ ใช้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ โดยใช้กำลังขยาย 5000 เท่า

4. ผลการทดลองและอภิปราย

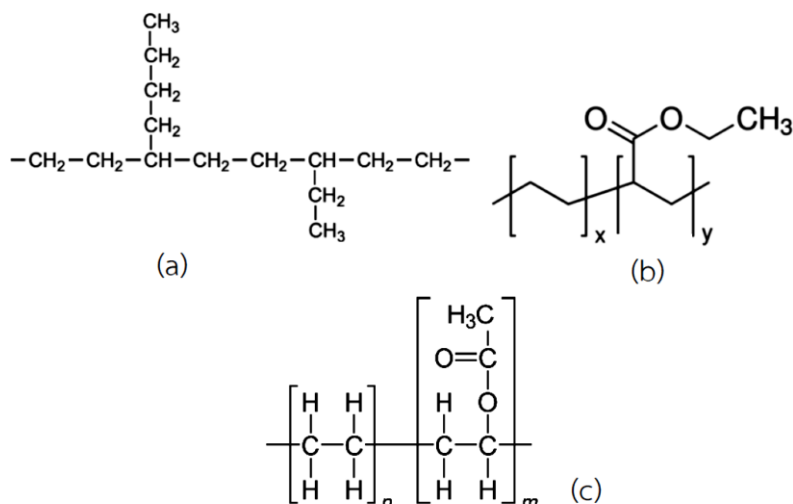
4.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์เมมเบรน

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์เมมเบรนให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 9(a) ซึ่งเมมเบรนชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะปรากฏพีคของการดูดกลืนที่สำคัญที่ตำแหน่ง 2870 และ 2947 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะแบบยืด (Stretching) ของหมู่เมทิลีน (Methylene; CH₂) แบบสมมาตร (Symmetric) และอสมมาตร (Asymmetric) ตามลำดับ และที่ตำแหน่งการดูดกลืนที่ 1467 เซนติเมตร⁻¹ คือการสั่นของแบบงอ (Bending) ของเมทิลีน [18] ในขณะที่เมมเบรนพอลิเอทิลีน-เอทิลอะคริเลต (Polyethylene-ethylacrylate; EEA) และพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตต (EVA) (รูปที่ 9(b-c)) จะปรากฏตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ คือ คาร์บอนิล (C=O) ที่ตำแหน่ง 1735 เซนติเมตร⁻¹ [19] ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างของโคพอลิเมอร์ในรูปที่ 10 ที่มีหมู่คาร์บอนิลเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ส่วนสเปกตรัมดังรูปที่ 9(d-f) แสดงการดูดกลืนของพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตตที่มีเปอร์เซ็นต์ของหมู่ไวนิลอะซิเตตที่แตกต่างกัน ได้แก่ EVA18,

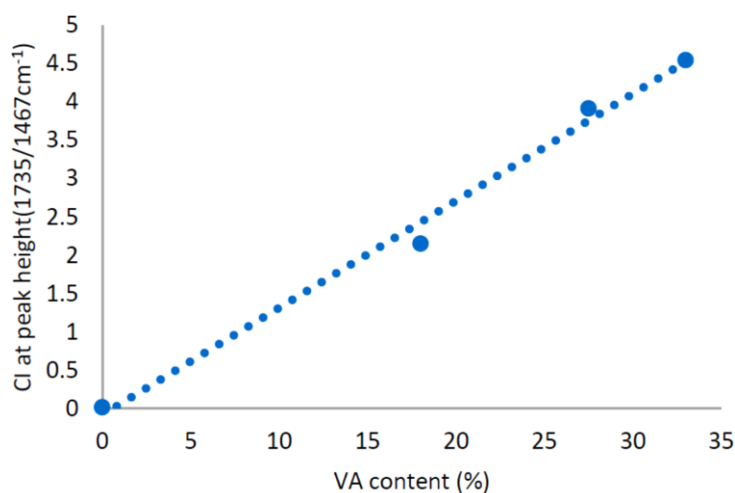
27.5 และ 33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยพบว่าสเปกตรากของการดูดกลืนมีลักษณะเหมือนกันตลอดทุกเลขคลื่น แต่จะมีปริมาณการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1735 เซนติเมตร⁻¹ แตกต่างกัน โดยเมื่อเทียบกับตำแหน่งการสั่นแบบงอของหมู่เมทิลีน พบว่าปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตตจะเพิ่มขึ้น เมื่อเมมเบรนมีปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตตเพิ่มขึ้น จะมีการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1735 เซนติเมตร⁻¹ เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาดัชนีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl index; CI) (ความสูงของพีคที่เลขคลื่น 1735 เซนติเมตร⁻¹/ความสูงของพีคที่เลขคลื่น 1467 เซนติเมตร⁻¹) ของ EVA เมมเบรน จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหมู่คาร์บอนิล และเปอร์เซ็นต์ไวนิลอะซีเตต ดังรูปที่ 11



รูปที่ 9 อินฟราเรดสเปกตรากของ (a) LDPE, (b) EEA, (c) EVA, (D) EVA18, (e) EVA27.5 และ (f) EVA33

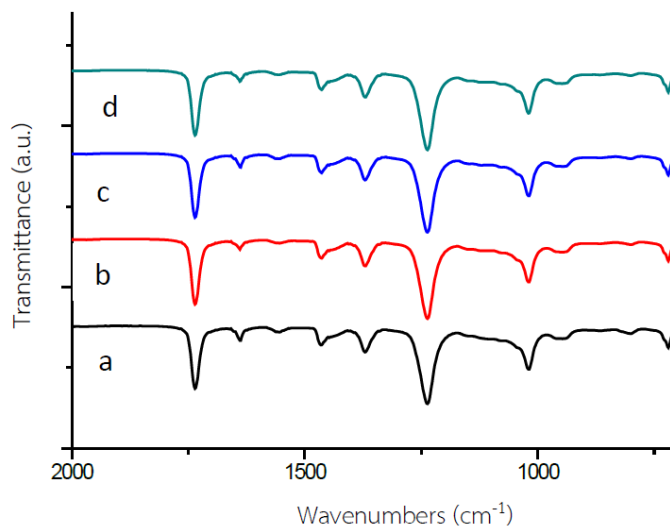


รูปที่ 10 โครงสร้างทางเคมีของเมมเบรน (a) LDPE, (b) EEA และ (c) EVA



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของปริมาณเปอร์เซ็นต์ไวนิลอะซีเตตกับค่าดัชนีหมู่คาร์บอนิล

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของเมมเบรน EVA33 ที่ได้รับการเติมแต่งซิลิกา (EVA33/SiO₂) ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่างๆ แสดงในรูปที่ 12 พบว่าสเปกตรัมของคอมโพสิตเมมเบรนมีลักษณะเหมือนกับสเปกตรัมของ EVA33 ในทุกๆ อัตราส่วนของซิลิกาซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคของซิลิกาที่เติมแต่งลงไปไนโคพอลิเมอร์ไม่มีการเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของ EVA33 โดยปกติถ้าอนุภาคซิลิกาสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอนิลได้ จะปรากฏการเลื่อนตำแหน่งของพีค 1735 เซนติเมตร⁻¹ ตามงานวิจัยของ Hossein และคณะ [19]



รูปที่ 12 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) EVA33, (b) EVA33/0.5SiO₂, (c) EVA33/1.0SiO₂ และ (d) EVA33/2.0SiO₂

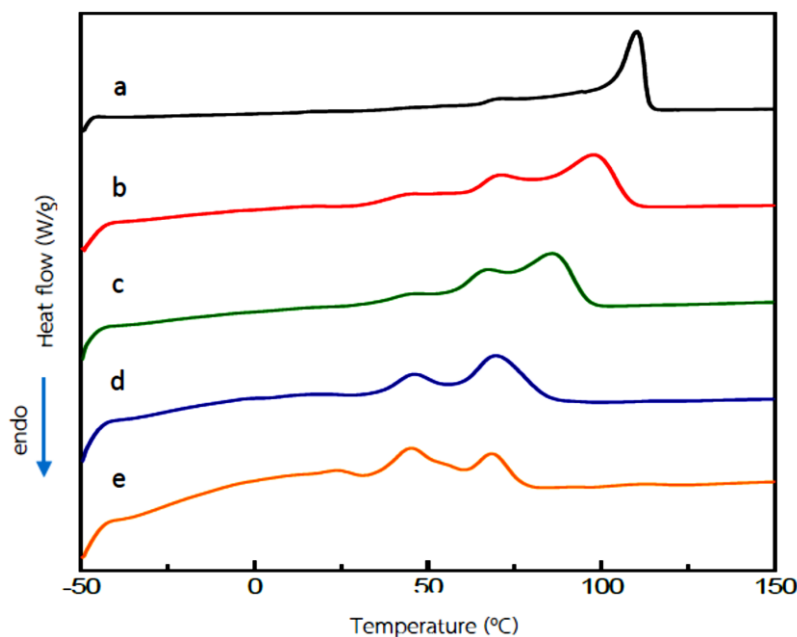
4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของเมมเบรน

เทอร์โมแกรมจากเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริเมตรี (DSC) ของพอลิเมอร์ และโคพอลิเมอร์ เมมเบรนแสดงดังรูปที่ 13 และ 14 และผลการวิเคราะห์แสดงเพิ่มเติมในตารางที่ 1 จากผลการทดลองพบว่าพลังงานในการหลอมผลึกของเมมเบรนชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีค่าสูงกว่าเมมเบรนพอลิเอทิลีน-เอทิลอะคริเลต (EEA) และพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต (EVA) และเมื่อพิจารณาเมมเบรนพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต (EVA) พบว่าพลังงานในการหลอมผลึกจะลดลงเมื่อปริมาณไวนิลอะซีเตตเพิ่มขึ้น โดยที่เมมเบรนชนิด EVA33 จะมีพลังงานในการหลอมผลึกน้อยที่สุด จากข้อมูลพลังงานในการหลอมผลึก สามารถนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (Crystalline percentage; X_c) ได้จากสมการต่อไปนี้

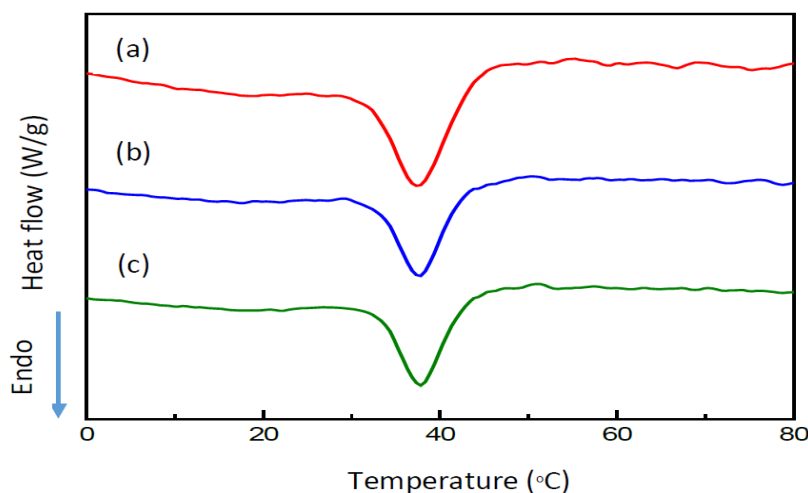
$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^*} \times 100$$

เมื่อ ΔH_f และ ΔH_f^* หมายถึง เอนทาลปีการหลอมเหลวของตัวอย่างและของพอลิเอทิลีน (PE) ที่มีผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งค่า ΔH_f^* ของ PE ที่มีผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 293 จูลต่อกรัม [20-21] ผลการคำนวณปริมาณผลึกของเมมเบรนแสดงดังตารางที่ 1 โดยที่เมมเบรนชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีปริมาณผลึกมากที่สุด 23 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาเฉพาะ EVA เมมเบรน พบว่าปริมาณผลึกลดลง เมื่อปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตตเพิ่มขึ้น โดยที่ EVA33 มีปริมาณผลึกน้อยที่สุดคือ 6 เปอร์เซ็นต์ อาจเนื่องมาจากหมู่ไวนิลอะซีเตตที่เพิ่มขึ้น ไปขัดขวางการเกิดผลึกของส่วนพอลิเอทิลีนที่เป็นองค์ประกอบหลักของโคพอลิเมอร์

เมื่อศึกษาผลของปริมาณซิลิกาพบว่าซิลิกาที่เติมลงไปใน EVA33 ทำให้คอมพอสิตมีค่าปริมาณผลึกใกล้เคียงกับ EVA33 และเมื่อพิจารณาถึงเทอร์โมแกรมการเย็นตัว (Cooling curve) (ดังรูป 14) พบว่าคอมพอสิตเมมเบรน มีพฤติกรรมการเกิดผลึกคล้ายกัน ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเพิ่มปริมาณซิลิกาไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการเกิดผลึก อาจเนื่องมาจากการเติมแต่งซิลิกาในปริมาณที่น้อยและซิลิกาที่เติมลงไปไม่ได้เกิดอันตรกิริยากับส่วนที่มีขั้วของเมมเบรน ซึ่งสอดคล้องกับผลของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ทำให้ซิลิกาไม่ขัดขวางการเกิดผลึกของ EVA33 เมมเบรน



รูปที่ 13 เทอร์โมแกรมจากเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริเมตรีของ (a) LDPE, (b) EEA, (c) EVA18, (d) EVA27.5 และ (e) EVA33



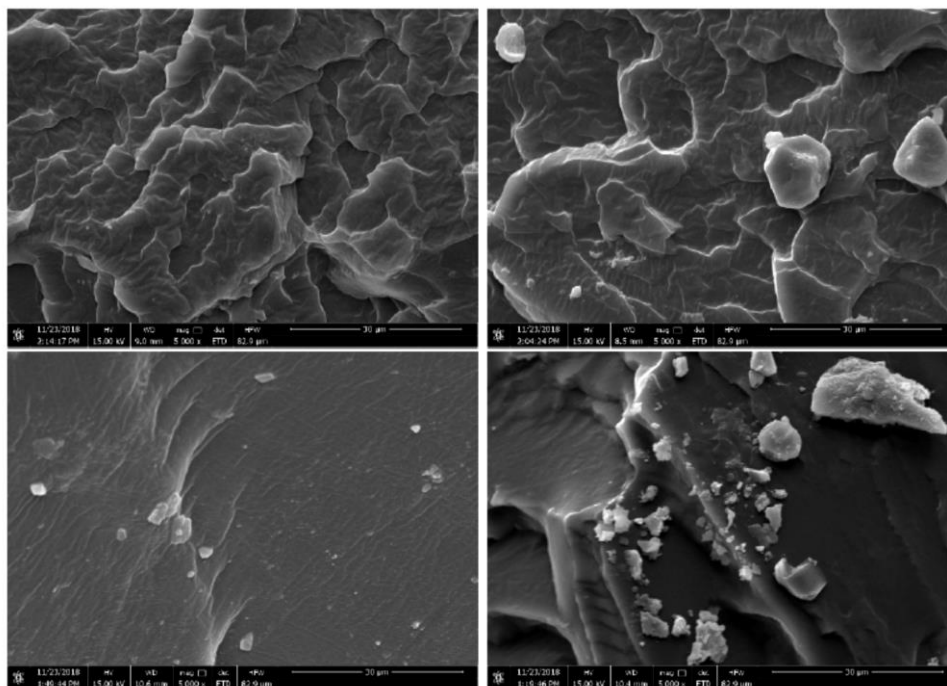
รูปที่ 14 เทอร์โมแกรมจากเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริเมตรีของการหล่อเย็นของ (a) EVA33/0.5SiO₂, (b) EVA33/1.0SiO₂ และ (c) EVA33/2.0SiO₂

ตารางที่ 1 สมบัติทางความร้อนของเมมเบรน

เมมเบรนตัวอย่าง	เอนทาลปีการ หลอมเหลว (J/g)	จุดหลอมเหลว (°C)	X _c (%)
LDPE	67.33	110	23
EEA	41.19	100	14
EVA18	49.39	88	17
EVA27.5	38.14	74	13
EVA33	16.61	62	6
EVA33/0.5SiO ₂	21.84	62	7
EVA33/1.0SiO ₂	23.10	60	8
EVA33/2.0SiO ₂	22.20	61	8

4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของเมมเบรน

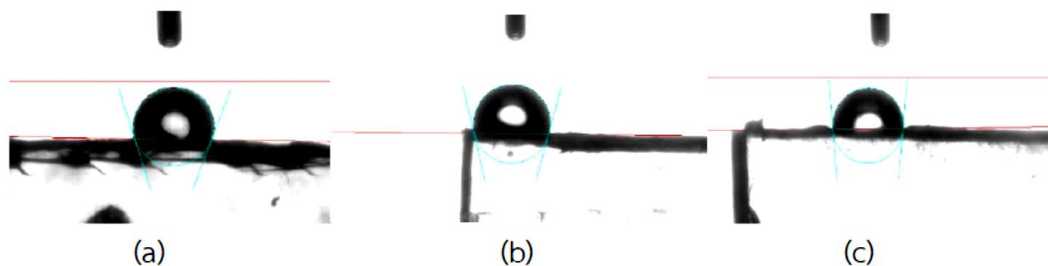
จากการวิเคราะห์พื้นผิวภาคตัดขวางของเมมเบรน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า พบว่าคอมโพสิตเมมเบรนจะปรากฏอนุภาคซิลิกากระจายอยู่ในวัฏภาคของโคพอลิเมอร์ EVA ทุกสูตร เมื่อพิจารณาจากภาพ SEM พบว่าอนุภาคซิลิกามีขนาดประมาณ 2-10 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 15 และพบว่าคอมโพสิตเมมเบรนที่มีปริมาณซิลิกาน้อย มีการกระจายตัวของซิลิกาที่ดี แต่เมื่อมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นถึง 2 ส่วนในร้อยส่วน พบว่ามีการเกาะกันของอนุภาคซิลิกาอย่างชัดเจน อาจเนื่องมาจากซิลิกาเป็นอนุภาคของแข็งที่มีขั้วสูงมาก ซึ่งไม่ชอบกระจายตัวในพอลิเมอร์ที่มีขั้วต่ำ เช่น EVA



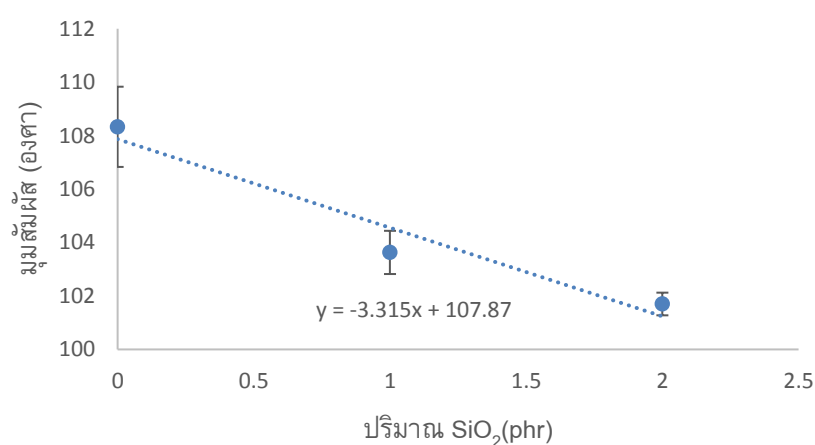
รูปที่ 15 ภาพตัดขวางของเมมเบรน (a) EVA33, (b) EVA33/0.5SiO₂, (c) EVA33/1.0SiO₂ และ (d) EVA33/2.0SiO₂ (กำลังขยาย x5000)

4.4 การศึกษามุมสัมผัสของเมมเบรน

ตรวจสอบมุมสัมผัสของเมมเบรนโดยใช้โดยเครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการพิจารณาถึงลักษณะความมีขรุขระของพื้นผิววัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษามุมสัมผัสของพื้นผิว EVA33 และคอมโพสิตของ EVA33 จากผลการทดลองพบว่า มุมสัมผัสของหยดน้ำของเมมเบรน EVA33 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 108.3 องศา ซึ่งบ่งบอกได้ว่าเป็นเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำ เนื่องจากมีค่ามุมสัมผัสมาก และเมมเบรนชนิด EVA33/1.0SiO₂ และ EVA33/2.0SiO₂ พบว่ามุมสัมผัสเท่ากับ 103.6 และ 101.7 องศาตามลำดับ ซึ่งลดลงเมื่อเทียบกับ EVA33 ดังรูปที่ 16 และ 17 จากผลการทดลองนี้บ่งบอกว่าเมมเบรนที่มีการเติมซิลิกา มีสมบัติชอบน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากผลของพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol; Si-OH) จำนวนมาก ซึ่งมีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ซึ่งชอบน้ำ จึงทำให้มุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวเมมเบรนมีค่าลดลง เมื่อนำผลของมุมสัมผัสหยดน้ำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณซิลิกาที่เติมในโคพอลิเมอร์ พบว่าได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งบอกได้ว่าปริมาณซิลิกาตัวเติมลงไปเมมเบรนส่งผลโดยตรงต่อความมีขรุขระของเมมเบรน



รูปที่ 16 การทดสอบมุมสัมผัสหยดน้ำของ (a) EVA33, (b) EVA33/1.0SiO₂ และ (c) EVA33/2.0SiO₂



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสหยดน้ำและปริมาณซิลิกา

4.5 การศึกษาสมบัติเชิงกลของเมมเบรน

สมบัติเชิงกลของเมมเบรนชนิดต่างๆ ได้ถูกทำการทดสอบและสรุปข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่าค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของเมมเบรน LDPE และ EEA มีค่าเท่ากับ 8.9 และ 9.0 เมกะพาสกาลตามลำดับ เมื่อพิจารณาเฉพาะเมมเบรน EVA พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตต โดยพบว่า EVA33 มีค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดคือ 3.9 MPa เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อมีปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตตเพิ่มขึ้น ไปขัดขวางการเกิดผลึก ส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง (โดยสอดคล้องกับผลการทดลองจาก DSC ในหัวข้อ 4.2) จึงทำให้เมมเบรนมีความสามารถในการรับแรงและความต้านทานแรงดึงลดลงไปด้วย นอกจากนี้ผลจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิด EVA33 มีค่าสูงที่สุด คือ 1061 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่ไวนิลอะซีเตตที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดสายโซ่ในโครงสร้างของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่ (Chain entanglement) มากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงค่ามอดุลัสของยัง พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงดึง โดยที่เมมเบรนชนิด LDPE มีค่าสูงที่สุด 166.7 เมกะพาสกาล

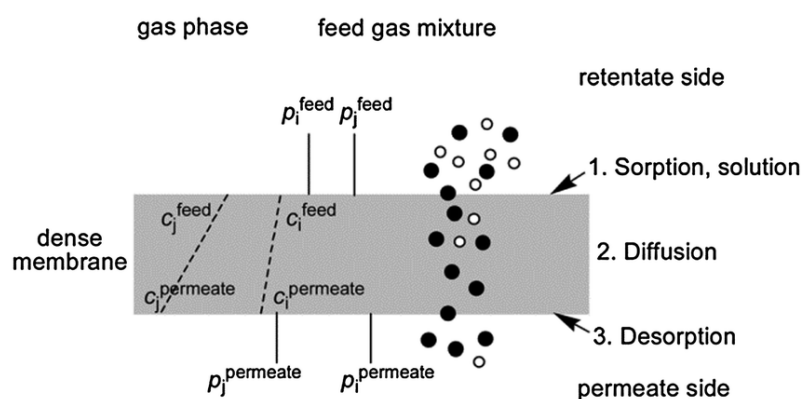
และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตตเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเมมเบรน พบว่าค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และมอดุลัสของยัง มีค่าไม่แตกต่างจาก EVA33 มากนัก ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณซิลิกาที่เติมลงไปมีปริมาณน้อย และกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในโคพอลิเมอร์ จึงทำให้ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลึกเดิมของ EVA33 (โดยสอดคล้องกับผลของการทดลองจาก DSC และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาดในหัวข้อ 4.2 และ 4.3) จึงทำให้สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเมมเบรนไม่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และมอดุลัสของยังของเมมเบรน

เมมเบรน	ความแข็งแรงดึง (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสของยัง (MPa)
LDPE	8.9 (0.70)	772 (187.08)	166.7 (9.12)
EEA	9 (0.58)	1023 (63.63)	21.2 (0.57)
EVA18	8.3 (0.54)	902 (49.35)	26.1 (1.43)
EVA27.5	8.3 (0.92)	992 (59.02)	8.7 (0.86)
EVA33	3.9 (0.59)	1061 (15.52)	3.3 (0.11)
EVA33/0.5SiO ₂	4.2 (1.21)	1310 (142.71)	3.4 (0.12)
EVA33/1.0SiO ₂	4.9 (1.52)	1258 (60.30)	3.0 (0.37)
EVA33/2.0SiO ₂	3.8 (0.14)	1060 (10.21)	3.3 (0.32)

4.6 การทดสอบการซึมผ่านแก๊ส

การศึกษาการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนในงานวิจัยนี้ใช้พอลิเมอร์เมมเบรนชนิด Dense polymer membrane ซึ่งกลไกในการซึมผ่านแก๊สเกิดผ่านกลไกประเภท Solution-diffusion ดังรูปที่ 18 ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอน คือ



รูปที่ 18 กลไกการซึมผ่านแก๊สแบบ Solution-diffusion

- Sorption ในขั้นตอนนี้โมเลกุลแก๊ส จะถูกดูดซับที่บริเวณผิวของเมมเบรน โดยเมมเบรนที่มีขั้วสูง ซึ่งชอบดูดซับโมเลกุลแก๊สที่มีขั้ว ในขณะที่เดียวกันเมมเบรนชนิดที่ไม่มีขั้ว ชอบดูดซับโมเลกุลแก๊สที่ไม่มีขั้ว
- Diffusion ขั้นตอนนี้โมเลกุลแก๊สที่ถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในเนื้อเมมเบรนโดยกระบวนการแพร่ผ่าน โดยทั่วไปกลไกของการแยกด้วยเมมเบรนมี 2 แบบ คือใช้ความแตกต่างของความดัน (Pressure gradient) หรือความแตกต่างของความเข้มข้นของแก๊ส (Concentration gradient) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้กลไกของความแตกต่างของความเข้มข้นของแก๊ส
- Desorption ในขั้นตอนนี้โมเลกุลแก๊สที่แพร่ผ่านออกมาด้าน Permeate side ของเมมเบรน และแพร่ผ่านออกจากเมมเบรน

ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากมีเทน

- Kinetic diameter เมื่อพิจารณาถึงค่า Kinetic diameter พบว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 3.3 อังสตรอม ในขณะที่แก๊สมีเทนมีค่า Kinetic diameter เท่ากับ 3.8 อังสตรอม ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า Kinetic diameter ต่ำกว่าจึงบ่งบอกได้ว่าขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า จะส่งผลให้มีความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนได้ดีกว่า
- ความแตกต่างของสภาพขั้วของโมเลกุลแก๊ส พบว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีสภาพขั้วสูงกว่าแก๊สมีเทน ดังนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีความชอบในการถูกดูดซับด้วยเมมเบรนที่มีขั้วได้ดีกว่าแก๊สมีเทน ในขณะเดียวกันแก๊สมีเทนชอบถูกดูดซับกับเมมเบรนที่ไม่มีขั้วได้ดี

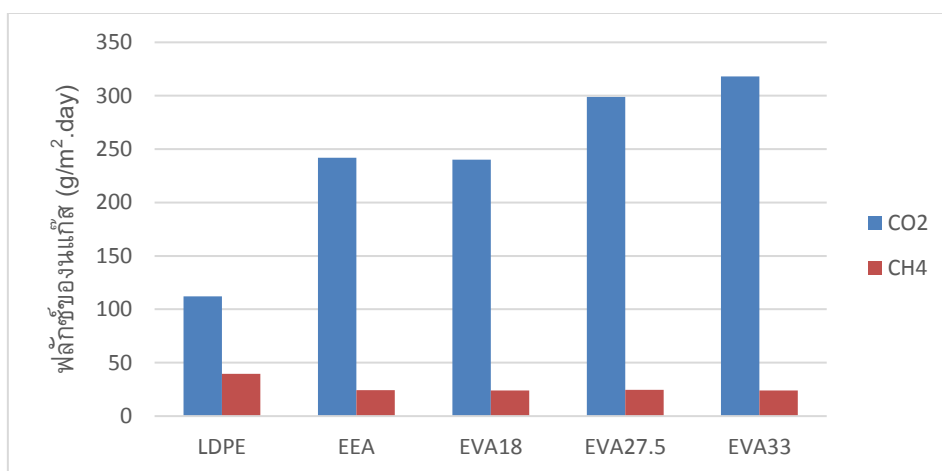
4.6.1 ผลของชนิดของพอลิเมอร์เมมเบรน

ในการทดสอบการซึมผ่านแก๊ส ทดสอบการซึมผ่านแก๊สในระบบแก๊สเดี่ยว (Single gas) โดยแก๊สที่ศึกษามีสองชนิดคือ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ซึ่งในระบบแก๊สที่ซึมผ่านเมมเบรนจะถูกแก๊สตัวพา (Carrier gas) นำเข้าสู่เครื่องตรวจวัด (Detector) แบบการวัดค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity detector; TCD) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 19 เมื่อพิจารณาการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าเมมเบรนชนิด LDPE, EEA และ EVA18 มีค่าฟลักซ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ซึมผ่านเมมเบรนเท่ากับ 112, 241 และ 240 กรัมต่อตารางเมตรวัน ($\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$) ตามลำดับ เนื่องจากเมมเบรน LDPE มีความเป็นผลึกสูง (โดยสอดคล้องกับผลการทดลองจาก DSC ในหัวข้อ 4.2) ทำให้เมมเบรนทำหน้าที่เป็นเหมือนตัวขวางกั้น (Barrier) แก๊สจึงซึมผ่านได้ยาก ในขณะที่เมมเบรนชนิด EEA และ EVA18 มีความเป็นผลึกต่ำกว่าเมมเบรน LDPE และมีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยโครงสร้างที่มีขั้ว คือ หมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี จึงทำให้มีโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับที่บริเวณผิวของเมมเบรนจำนวนมาก ทำให้มีความเข้มข้นของ

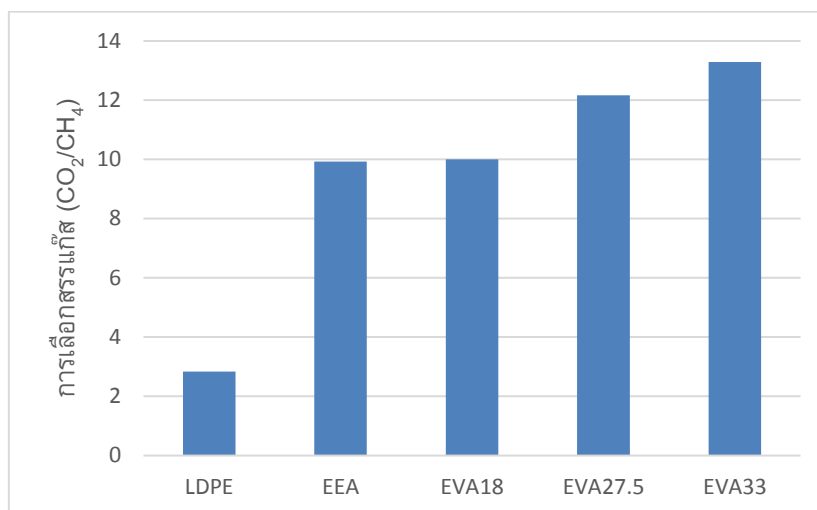
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น จากนั้นจะเกิดกระบวนการแพร่ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงเข้าไปยังเนื้อพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า (Concentration gradient) และโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยออกจากเมมเบรนอีกด้านหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่า การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ EEA และ EVA18 มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมาจากเมมเบรน EEA มีปริมาณหมู่คาร์บอนิล (C=O) ใกล้เคียงกับ EVA18 เพราะ EEA ประกอบด้วยหมู่เอทิลอะคริเลต (Ethyl acrylate) 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบการซึมผ่านแก๊สมีเทน พบว่าเมมเบรนชนิด LDPE มีค่าฟลักซ์ของแก๊สมีเทนที่ซึมผ่านเมมเบรนสูงที่สุด ประมาณ 40 กรัมต่อตารางเมตรวัน ในขณะที่เมมเบรน EVA18 และ EEA มีฟลักซ์ของแก๊สใกล้เคียงกันคือ 24 กรัมต่อตารางเมตรวัน ซึ่งการที่เมมเบรนชนิด LDPE มีการซึมผ่านแก๊สมีเทนมากกว่า เนื่องจากแก๊สมีเทนมีสมบัติที่ไม่มีขั้วทำให้มีการละลายของแก๊สมีเทนที่ผิวสัมผัสของเมมเบรนชนิดที่ไม่มีขั้วได้ดี เช่น เมมเบรน LDPE

จากค่าฟลักซ์การซึมผ่านของแก๊สทั้งสองชนิด สามารถนำมาคำนวณหาค่าการเลือกสรรแก๊ส (CO_2/CH_4) [22-23] ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 20 พบว่าเมมเบรนชนิด EVA18 และ EEA มีค่าการเลือกสรรแก๊ส CO_2/CH_4 สูงใกล้เคียงกันประมาณ 10 ซึ่งมากกว่าค่าการเลือกสรรแก๊ส CO_2/CH_4 ของเมมเบรน LDPE ที่มีค่าประมาณ 2.8 ซึ่งบ่งบอกได้ว่าเมมเบรนชนิด EVA และ EEA มีความสามารถในการแยกแก๊สทั้งสองชนิดออกจากกันได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรน LDPE



รูปที่ 19 ฟลักซ์ของแก๊สที่ซึมผ่านเมมเบรนชนิดต่างๆ



รูปที่ 20 การเลือกสรรแก๊ส (CO₂/CH₄) ของเมมเบรนชนิดต่างๆ

4.6.2 ผลของปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตต

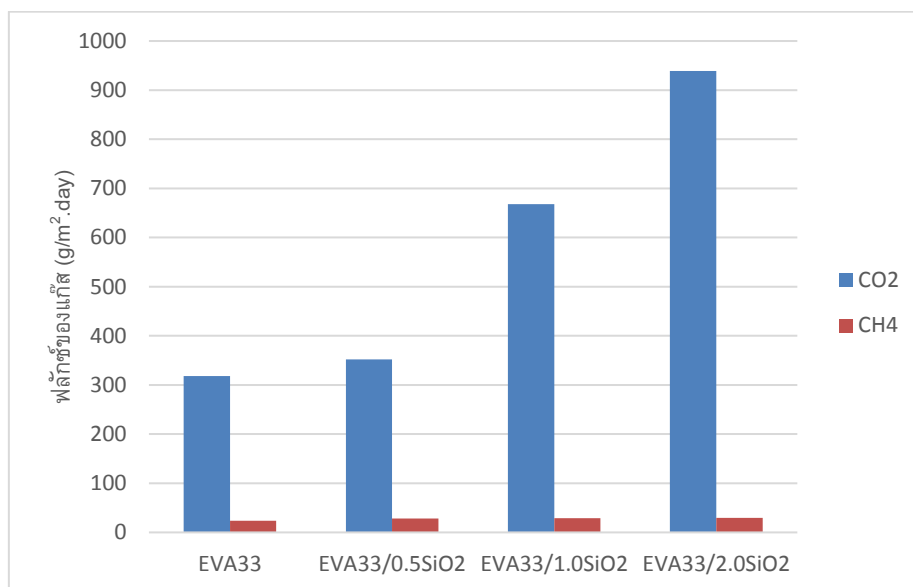
เมื่อเปรียบเทียบการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทน โดยใช้เมมเบรน EVA ที่มีปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตตแตกต่างกัน คือเมมเบรนชนิด EVA18, EVA27.5 และ EVA33 จากผลการทดลองพบว่าเมมเบรน EVA33 มีค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดเท่ากับ 318 กรัมต่อตารางเมตรวัน รองลงมาคือ EVA27.5 และ EVA18 ตามลำดับ (รูปที่ 19) ซึ่งจากผลการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมมเบรน EVA33 มีปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตตมากกว่า EVA18 และ EVA27.5 ซึ่งหมู่ไวนิลอะซีเตตมีสมบัติที่มีขั้ว จึงช่วยดูดซับโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ทำให้มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นที่บริเวณผิวเมมเบรน ช่วยส่งเสริมให้เกิดกระบวนการแพร่แบบ Concentration gradient ได้มากขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และอีกส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่เมมเบรน EVA33 มีปริมาณผลึกต่ำกว่าเมมเบรน EVA18 และ EVA27.5 (โดยสอดคล้องกับผลการทดลองจาก DSC ในหัวข้อ 4.2) ซึ่งการมีผลึกมากขึ้น ทำให้ขัดขวางการซึมผ่านแก๊สส่งผลให้แก๊สซึมผ่านได้น้อยลง ในขณะที่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการซึมผ่านแก๊สมีเทน พบว่าเมมเบรน EVA18, EVA27.5 และ EVA33 มีค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สมีเทนที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 24 กรัมต่อตารางเมตรวัน โดยสาเหตุที่ทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากแก๊สมีเทนโดยปกติมีสมบัติที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงชอบละลายในเมมเบรนชนิดที่ไม่มีขั้วด้วย เช่น LDPE ดังนั้นในกรณีของเมมเบรนที่มีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น หมู่ไวนิลอะซีเตต จึงไม่ได้ส่งเสริมให้เกิดการซึมผ่านแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น และการที่เมมเบรน EVA33 มีส่วนที่เป็นอสัณฐานอยู่มาก แต่การซึมผ่านแก๊สมีเทนไม่ได้เพิ่มขึ้นตาม อาจเนื่องจากเมมเบรนชนิดนี้ มีความมีขั้วสูงจึงเลือกให้มีการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่ามีเทน เมื่อพิจารณาการเลือกสรรแก๊ส (CO₂/CH₄) พบว่าเมมเบรน EVA33 มีค่าสูงที่สุด

เท่ากับ 13.28 กรัมต่อตารางเมตรวัน ($\text{g/m}^2\cdot\text{day}$) ซึ่งสอดคล้องกับการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสัมพันธ์กับปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตต

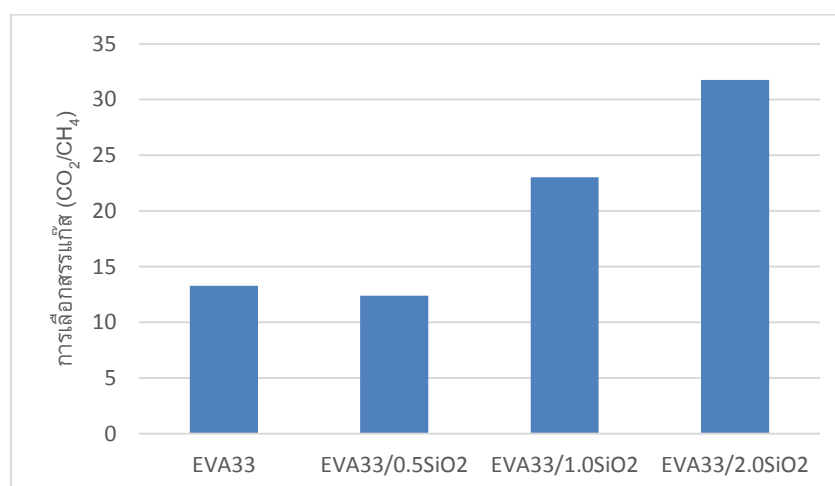
4.6.3 ผลของปริมาณซิลิกา

จากการทดสอบการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของคอมโพสิตเมมเบรนที่ผสมซิลิกา พบว่าความสามารถในการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าเมมเบรนที่ไม่ได้ดัดแปลง EVA33 โดยที่เมมเบรนชนิด EVA33/2.0SiO₂ มีค่าฟลักซ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ซึมผ่านเมมเบรนสูงที่สุด ประมาณ 939 กรัมต่อตารางเมตรวัน ดังรูปที่ 21 และจากผลการทดลองยังพบว่าฟลักซ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณซิลิกาที่เติมในโพลีเมอร์ อาจเนื่องมาจากพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) จำนวนมาก ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้ว จึงช่วยเพิ่มความมีขั้วให้กับคอมโพสิตเมมเบรนได้ (โดยสอดคล้องกับผลการทดสอบมุมสัมผัส ในหัวข้อ 4.4) ที่พบว่าเมมเบรนชนิด EVA33/2.0SiO₂ มีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำต่ำที่สุด ซึ่งบ่งบอกว่าเมมเบรนชนิดนี้มีความมีขั้วสูงกว่าเมมเบรนอื่น ซึ่งความมีขั้วที่เพิ่มขึ้นจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เมมเบรน EVA33/2.0SiO₂ มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ทำให้มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นที่บริเวณผิวเมมเบรน และส่งเสริมให้เกิดกระบวนการแพร่แบบ Concentration gradient ได้ดียิ่งขึ้น ในขณะที่การทดสอบการซึมผ่านแก๊สมีเทน เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊ส พบว่าเมมเบรน EVA33 มีฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สเท่ากับ 23.93 กรัมต่อตารางเมตรวัน และพบว่าเมมเบรนคอมโพสิตเมมเบรนมีค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สสูงกว่า EVA33 เล็กน้อย โดยที่เมมเบรน EVA33/2.0SiO₂ มีฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สเท่ากับ 29.57 กรัมต่อตารางเมตรวัน อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณซิลิกาจะส่งผลให้มีการเพิ่มช่องว่างระหว่างวัฏภาค (Interfacial voids) ซึ่งจะช่วยให้โมเลกุลแก๊สสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น

ในส่วนของการเลือกสรรแก๊ส พบว่าเมมเบรนชนิด EVA33/2.0SiO₂ มีค่าการเลือกสรรแก๊สสูงที่สุด เท่ากับ 31.75 กรัมต่อตารางเมตรวัน ($\text{g/m}^2\cdot\text{day}$) ดังรูปที่ 22 และยังพบว่าค่าการเลือกสรรแก๊ส เพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิลิกา ซึ่งทำให้ความมีขั้วของเมมเบรนสูงขึ้น จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่าสภาพขั้วของเมมเบรนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดจนค่าการเลือกสรรแก๊ส



รูปที่ 21 ฟลักซ์ของแก๊สที่ซึมผ่านคอมโพลีเมอร์เมมเบรน



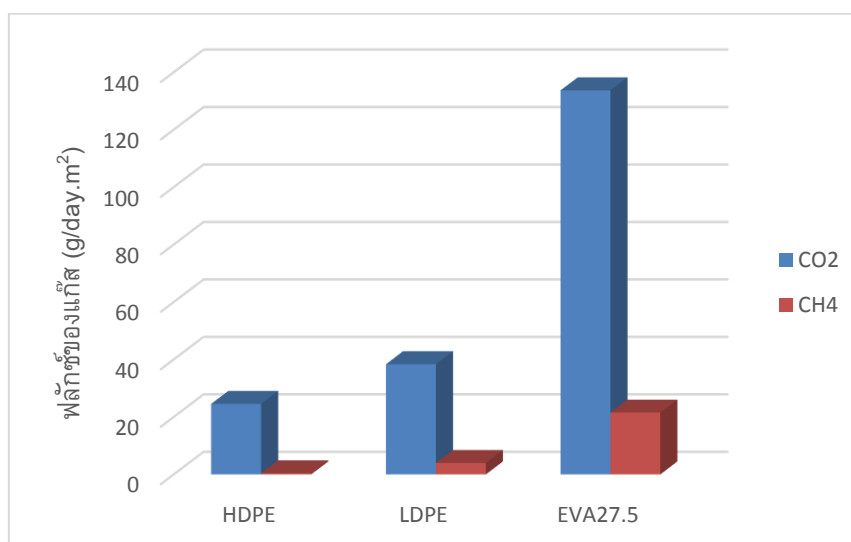
รูปที่ 22 การเลือกสรรแก๊ส (CO₂/CH₄) ของคอมโพลีเมอร์เมมเบรน

4.7 การทดสอบการซึมผ่านแก๊สในชุดอุปกรณ์ทดสอบ

4.7.1 ผลของชนิดของพอลิเมอร์เมมเบรน

ในการทดลองนี้ศึกษาการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนในระบบโมดูลของเมมเบรนสามชนิด คือ เมมเบรนชนิด HDPE, LDPE และ EVA27.5 โดยในการทดสอบใช้แก๊สป้อน (Feed gas) สองชนิด คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน ในอัตราส่วนแก๊ส 50:50 โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สป้อนเท่ากับ 1000 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองการซึมผ่านแก๊สแสดงดังรูปที่ 23 พบว่าฟลักซ์การซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากที่สุดเมื่อใช้เมมเบรนชนิด EVA27.5 รองลงมาคือเมมเบรน LDPE และ HDPE ตามลำดับ เนื่องจาก

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความเข้มข้นสูง จึงชอบซึมผ่านเมมเบรน EVA27.5 ซึ่งมีขั้วบางส่วนได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าการซึมผ่านของแก๊สมีเทน มีแนวโน้มเช่นเดียวกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากเมมเบรนชนิด HDPE มีความเป็นผลึกสูงส่งผลให้แก๊สทั้งสองชนิดซึมผ่านได้ยาก ในขณะที่เมมเบรน EVA27.5 มีค่าความเป็นผลึกต่ำที่สุดแก๊สทั้งสองชนิดจึงสามารถซึมผ่านได้ง่ายกว่า และการที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าการซึมผ่านมากกว่าแก๊สมีเทนเนื่องจาก เมมเบรนชนิด EVA27.5 ซึ่งหมู่ไวนิลอะซีเตตมีสมบัติที่มีขั้ว จึงช่วยดูดซับโมเลกุลที่มีขั้ว เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ทำให้มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นที่บริเวณผิวเมมเบรน และส่งเสริมให้เกิดกระบวนการแพร่แบบ Concentration gradient ได้มากขึ้น อีกทั้งเนื่องมาจากผลของขนาดของโมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีขนาดเล็กกว่ามีเทน จึงส่งเสริมให้สามารถซึมผ่านพอลิเมอร์เมมเบรนได้ดีกว่า

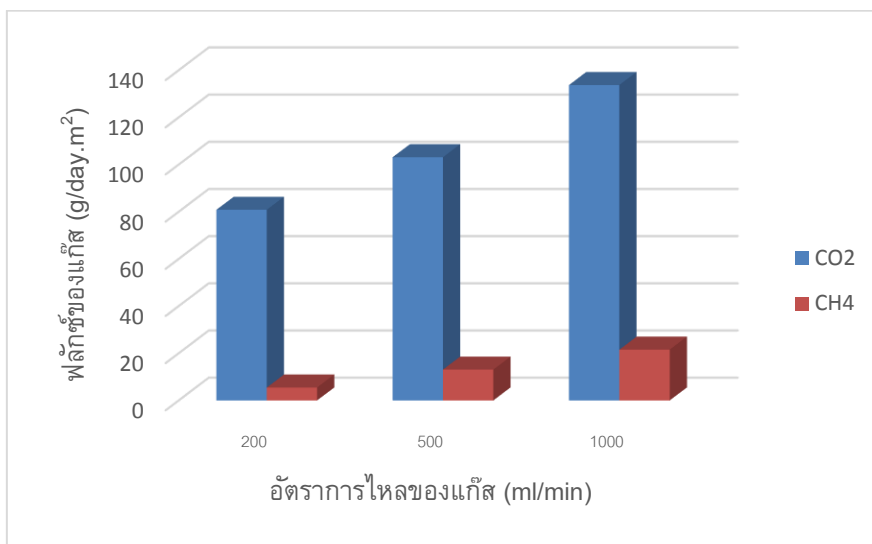


รูปที่ 23 พลักร์ของแก๊สที่ซึมผ่านเมมเบรนชนิดต่างๆ

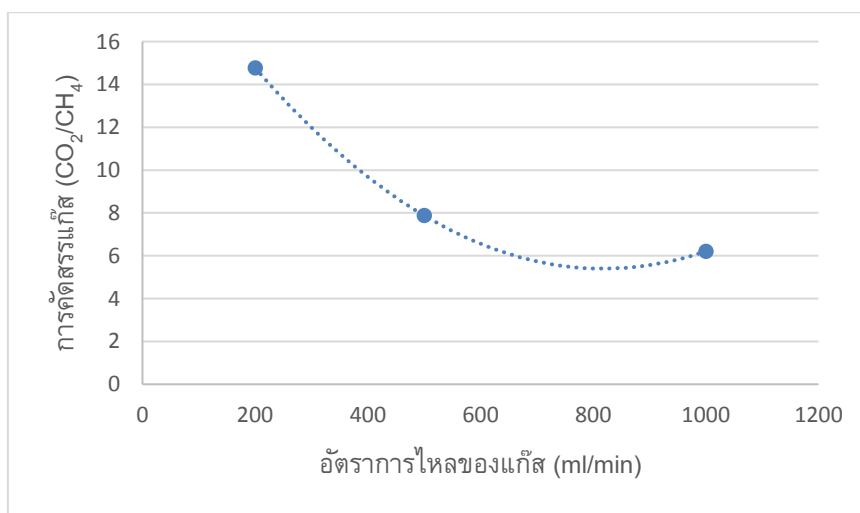
4.7.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊ส

สำหรับการศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สป้อนในระบบโมดูล เลือกใช้เมมเบรนชนิด EVA27.5 ในการทดสอบ โดยสภาวะในการทดสอบคือ อัตราส่วนแก๊สป้อนสองชนิดคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน เท่ากับ 50:50 และกำหนดอัตราการไหลของแก๊สป้อนเท่ากับ 200, 500 และ 1000 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 24 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สป้อน ทำให้พลักร์การซึมผ่านของแก๊สทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อาจเนื่องมาจาก การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สส่งผลให้ความดันภายในระบบโมดูลมีค่ามากขึ้น จึงเป็นการส่งเสริมแรงผลักดันให้แก๊สทั้งสองชนิดซึมผ่านออกมาจากท่อเมมเบรน แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าการเลือกสรรแก๊ส (CO_2/CH_4) พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สที่ต่ำ 200 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าการเลือกสรรแก๊สสูงที่สุด และพบว่าค่าการเลือกสรรแก๊สมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการ

ไหลของแก๊สดังรูปที่ 25 ซึ่งเมื่อพิจารณาทั้งฟลักซ์การซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรแก๊ส พบว่าโมดูลที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมที่ใช้งานในช่วงอัตราการไหลต่ำๆ และควรใช้พอลิเมอร์ เมมเบรนที่มีความเป็นผลึกต่ำ และมีโครงสร้างที่มีความมีขั้ว ทำให้โมดูลมีประสิทธิภาพในการ ซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง



รูปที่ 24 ฟลักซ์ของแก๊สที่ซึมผ่านเมมเบรน EVA27.5 ที่อัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 25 ค่าการเลือกสรรแก๊สของเมมเบรน EVA27.5 ในโมดูลที่อัตราการไหลต่างๆ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการซึมผ่านแก๊สกับ Hollow fiber membrane

เมมเบรน	ความดัน (atm)	P_{CO_2} (GPU)	P_{CH_4} (GPU)	$\alpha(CO_2/CH_4)$	ระบบแก๊สป้อน	อ้างอิง
6-FDA/DAM:DABA (3/2)	13.6	117	3.16	37	Mixed gas	[24]
PI-g-beta-CD/6-FDA-Durene dual layer	13.6	130	8.4	15.5	Pure gas	[25]
Silicon rubber-coated 6-FDA-Durene	2.7	373	19	19.7	Pure gas	[26]
PSF mixed matrix/silicon coating PSF-FS	2.0	103.3	3.88	32.7	Pure gas	[27]
PSF-FS	2.0	90.04	2.75	32.74	Pure gas	[28]
TR-PBO (module)	2.0	1938	137	14	Pure gas	[29]
EVA27.5 (module)	1.0012	517	96	5.38	Mixed gas	งานวิจัยนี้

$$GPU = 10^{-6} \text{cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg}$$

เมื่อนำฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สของเมมเบรนชนิด EVA27.5 ในระบบโมดูล มาคำนวณในหน่วย GPU (Gas permeation unit) พบว่ามีค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 517 GPU และการซึมผ่านแก๊สมีเทนเท่ากับ 96 GPU ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าการซึมผ่านแก๊สของระบบ Hollow fiber membrane (ตารางที่ 3) พบว่าเมมเบรน EVA27.5 มีความสามารถในการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า Hollow fiber membrane เกือบทุกชนิด (ยกเว้นเมมเบรน TR-PBO) เนื่องจากในระบบการแยกแก๊สในระบบ Hollow fiber membrane เมมเบรนที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นท่อยาวขนาดเล็กจำนวนมากมัดรวมกันไว้ ซึ่งปกติทำมาจากวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความหนาประมาณ 100-200 ไมโครเมตร ซึ่งทำให้โมเลกุลแก๊สแพร่ผ่านได้ยาก โดยกลไกการซึมผ่านแก๊สจะเกิดได้โดยใช้ความแตกต่างของความดัน (Pressure gradient) เป็นหลัก จากตารางที่ 3 พบว่าการแยกแก๊สในระบบ Hollow fiber membrane จำเป็นต้องใช้ความดันสูงมาก ประมาณ 2-14 บรรยากาศ ในขณะที่การทดสอบการแยกแก๊สในงานวิจัยนี้ใช้เมมเบรนที่มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 30-40 ไมโครเมตร จึงทำให้แก๊สเกิดการซึมผ่านได้ดีกว่า แม้ว่าจะทำการทดสอบที่ความดันต่ำ ซึ่งกลไกของการซึมผ่านในงานวิจัยนี้จะเกิดผ่านกลไก Concentration gradient เป็นหลัก และเมื่อพิจารณาถึงค่าการคัดสรรแก๊ส CO_2/CH_4 พบว่าเมมเบรน EVA27.5 มีค่าเท่ากับ 5.38 ซึ่งน้อยกว่าค่าการคัดสรรแก๊สของเมมเบรนชนิด Hollow fiber จากผลการทดลองดังกล่าว บ่งบอกได้ว่าเมมเบรนชนิด EVA27.5 ในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี แม้ว่าจะทำการทดลองที่ความดันต่ำ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับเมมเบรนชนิด Hollow fiber ทำให้ช่วย

ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการแยกแก๊ส ดังนั้นเมมเบรนในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมที่จะถูกพัฒนาต่อไป เพื่อนำไปใช้งานแยกแก๊สในระดับชุมชน

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบกระบวนการแยกแก๊สโดยวิธีต่างๆ [30]

ปัจจัย	Water absorption	Chemical absorption	Pressure swing adsorption	Polymer membrane	EVA27.5 membrane (งานวิจัยนี้)
กลไกการแยกแก๊ส	absorption	absorption	adsorption	Solution-diffusion	Solution-diffusion
อัตราการไหลของแก๊สป้อน	ต่ำ-สูง	ต่ำ-สูง	ต่ำ-สูง	กลาง	ต่ำ
ความดันระบบ	6-12 bar	1 bar	4-10 bar	20-36 bar	1.001 bar
ผลผลิต (%)	94%	90%	91%	78%	78.63%
ความบริสุทธิ์ CH ₄ (%)	98%	99%	98%	90-97%	60%
การใช้พลังงาน (kWh/Nm ³)	0.46	0.27	0.46	0.25-0.43	Not use
การสูญเสีย CH ₄ (%)	2%	0.04%	2%	0.5-20%	3.35%

จากตารางที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เมมเบรนชนิด EVA27.5 ในงานวิจัยนี้กับกระบวนการแยกแก๊สในระบบอื่นๆ พบว่า เมมเบรน EVA27.5 ในงานวิจัยนี้ใช้กลไกการแยกแบบ Solution-diffusion เช่นเดียวกับการทดลองโดยใช้เมมเบรนพอลิเมอร์อื่นๆ ในขณะที่กระบวนการ Water absorption และ Chemical absorption จะใช้กลไกแบบการดูดซึม ส่วน Pressure swing adsorption จะแยกแก๊สโดยใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กทำให้สามารถแยกขนาดโมเลกุลแก๊สได้ และเมื่อพิจารณาถึงอัตราการไหลของแก๊สป้อน พบว่าโมดูลในงานวิจัยนี้สามารถแยกแก๊สได้มีประสิทธิภาพที่อัตราการไหลต่ำๆ ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการอื่นๆ ที่สามารถใช้งานได้ทุกช่วงอัตราการไหล แต่เมื่อพิจารณาความดันในระบบ พบว่าโมดูลในงานวิจัยนี้ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ความดันเพื่อช่วยในกระบวนการแยกแก๊ส ทำให้ในขั้นตอนนี้จะไม่ต้องใช้พลังงานในกระบวนการ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นที่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในกระบวนการแยกแก๊ส และยังพบว่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของแก๊สมีเทนในชุดอุปกรณ์มีค่าสูงถึง 78.63 เปอร์เซ็นต์ใกล้เคียงกับกระบวนการแยกแก๊สโดยใช้เมมเบรนพอลิเมอร์จากงานวิจัยอื่นๆ และเปอร์เซ็นต์การสูญเสียแก๊สมีเทน 3.35 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างจากกระบวนการอื่นมากนัก ในส่วนของความบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทน พบว่ามีค่า 60 เปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วนแก๊สป้อน มีเทน:คาร์บอนไดออกไซด์ 50:50) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 10 เปอร์เซ็นต์โดยที่ความบริสุทธิ์นี้สามารถปรับปรุงได้อีก โดยการเพิ่มจำนวนของโมดูล เมื่อพิจารณาปัจจัยทั้งหมดข้างต้น พบว่าชุดอุปกรณ์แยกแก๊สในงานวิจัยนี้จึงมีประสิทธิภาพในการแยกแก๊สได้ดีใกล้เคียง

กับกระบวนการอื่นๆ แต่มีข้อดีกว่าคือไม่เสียค่าใช้จ่ายในกระบวนการแยกแก๊ส จึงมีความเหมาะสมที่จะถูกพัฒนาต่อเพื่อนำไปใช้งานแยกแก๊สในระดับชุมชน

ตารางที่ 5 ต้นทุนการสร้างอุปกรณ์โมดูล

รายการ	ราคาต่อหน่วย	ราคา (บาท)
EVA27.5 น้ำหนัก 52 กรัม	60 บาท/กิโลกรัม	3.12
พลาสติกอะคริลิก		500
ค่าใช้จ่ายในการตัดและประกอบโมดูล		500

เมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในสร้างชุดอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ (ตารางที่ 5) พบว่ามีค่าใช้จ่ายที่ไม่แพงมากนัก อีกทั้งในกระบวนการแยกแก๊สยังไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานเลย ดังนั้นการแยกแก๊สด้วยกระบวนการนี้จึงนับว่าเป็นกระบวนการที่ประหยัด มีประสิทธิภาพเหมาะสมที่จะใช้งานในโรงผลิตแก๊สชีวภาพในระดับชุมชน

ตารางที่ 6 สมบัติของแก๊สชีวภาพ [31]

แก๊สมีเทน (vol%)	60-70%
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (vol%)	30-40%
แก๊สไนโตรเจน (vol%)	1.0%
แก๊สออกซิเจน (vol%)	0.5%
แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ppmv)	0-4000
ค่าความร้อนแก๊สมีเทน (60 vol%)	21.5 Mj (5.97 kWh of electricity equivalent)
ค่าความร้อนแก๊สมีเทน (100 vol%)	35.8 Mj (9.94 kWh of electricity equivalent)

จากตารางที่ 6 แสดงองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ ตลอดจนค่าพลังงานความร้อน พบว่าแก๊สที่เป็นองค์ประกอบหลัก คือ แก๊สมีเทน ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งเป็นแก๊สที่ให้ค่าพลังงานความร้อน รองลงมาคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สเฉื่อยที่ทำให้ค่าพลังงานความร้อนของแก๊สมีเทนลดลง นอกจากนี้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อมีความชื้นจะแสดงสมบัติเป็นกรด ซึ่งสามารถกัดกร่อนอุปกรณ์ได้ โดยปกติพบว่าแก๊สชีวภาพที่มีแก๊สมีเทน 60 เปอร์เซ็นต์จะมีค่าความร้อนประมาณ 21.5 เมกกะจูล ซึ่งต่ำกว่าค่าความร้อนบริสุทธิ์ของแก๊สมีเทนมาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในชุมชนจะใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพในรูปของพลังงานความ

ร้อนเพื่อการประกอบอาหาร ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มค่าพลังงานความร้อนให้กับแก๊สชีวภาพ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกก่อนการใช้งาน

ตารางที่ 7 สมบัติของเมมเบรนชนิดพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต (EVA27.5) [32]

Vinyl acetate content	27.5 wt%
Density	0.951 g/cm ³
Melt index (190°C/2.16kg)	7.0 g/10min
Melting point	71.0 °C
Decomposition temperature	347 °C
Solubility	not soluble in any aqueous solution slight soluble in hot aromatic solvent

จากตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเมมเบรน EVA27.5 พบว่าเมมเบรนนี้มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 71.0 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงถึง 347 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถใช้งานเมมเบรนนี้ได้ที่อุณหภูมิปกติ นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อความเป็นกรดและเบสสูง มีความทนทานต่อความชื้น แต่สามารถละลายได้ในสารเคมีจำพวกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในสภาวะร้อน นอกจากนี้โคพอลิเมอร์นี้มีส่วนประกอบหลักเป็นพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความทนทานต่อสภาพอากาศและแสงแดดสูง จึงทำให้เมมเบรนนี้มีอายุการใช้งานเป็นระยะเวลานาน

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 ปริมาณหมู่ไวนิลอะซีเตตที่เป็นองค์ประกอบในโคพอลิเมอร์เมมเบรนส่งผลโดยตรงต่อค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊ส โดยที่หมู่ไวนิลอะซีเตตที่เพิ่มขึ้นจะขัดขวางการเกิดผลึกของเมมเบรน ทำให้เปอร์เซ็นต์การเกิดผลึกของเมมเบรนลดลง จึงทำให้การซึมผ่านแก๊สเกิดได้ดี ประกอบกับหมู่ไวนิลอะซีเตตเป็นหมู่ที่มีขั้ว จึงมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ทำให้ค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

5.2 อนุภาคซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบในคอมโพสิตเมมเบรน ช่วยเพิ่มความมีขั้วให้กับเมมเบรนเนื่องจากบริเวณพื้นผิวของซิลิกาประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก จึงช่วยส่งเสริมให้เมมเบรนมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี ทำให้ค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ตลอดจนช่วยส่งเสริมให้ค่าการเลือกสรรแก๊ส CO₂/CH₄ เพิ่มขึ้นด้วย

5.3 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการแยกแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนด้วยเมมเบรนชนิดพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตต มีค่าฟลักซ์การซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 517 GPU ซึ่งมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ การแยกแก๊สระบบ Hollow fiber membrane ดังนั้นจึงมี

ความเหมาะสมที่จะนำชุดอุปกรณ์ทดสอบไปพัฒนาและประยุกต์ใช้แยกแก๊สชีวภาพเพื่อผลิตไบโอมีเทน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] อาทิตย์ อัครสุชี, คันธพจน์ ศรีสถิตย์, ตะวัน สุขน้อย “การกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สชีวภาพด้วยตัวดูดซับลิโอนาร์ไดต์และดินแดง” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ปี 2559.
- [2] จันทรพร ผลการกุล, สัมฤทธิ์ แซ่เจียง, วิทวัส หุตะเมขลิน “การปรับปรุงคุณภาพก๊าซธรรมชาติและก๊าซชีวภาพด้วยเทคโนโลยีดูดซับแบบสลับความดัน” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ปี 2557.
- [3] รัตนา จิระรัตนานนท์ “การศึกษาหลักการพื้นฐานและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม ระยะที่ 2” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ปี 2556.
- [4] S. Hafeez, X. Fan, A. Hussain, A kinetic study of CO₂ adsorption in cellulose acetate membranes, International Journal of Environmental Science and Development, 6(10) (2015) 755-759.
- [5] C, Micale, Bio-methane generation from biogas upgrading by semipermeable membranes: An experimental, numerical and economic analysis, Energy Procedia 82 (2015) 971-977.
- [6] S. Yan, Q. He, S. Zhao, Y. Wang, P. Ai, Biogas upgrading by CO₂ removal with a highly selective natural amino acid salt in gas-liquid membrane contactor, Chemical Engineering and Processing 85 (2014) 125-135.
- [7] M. Simcik, M.C. Ruzicka, M. Karaszova, Z. Sedlakova, J. Vejrazka, M. Vesely, P. Capek, K. Friess, P. Izak, Polyamide thin-film composite membranes for potential raw biogas purification: Experiments and modeling, Separation and Purification Technology 167 (2016) 163-173.
- [8] K. Friess, M. LanČ, K. PilnáČek, V. Fíla, O. VopiČka, Z. Sedláková, M.G. Cowan, W.M. McDanel, R.D. Noble, D.L. Gin, P. Izak, CO₂/CH₄ separation performance of ionic-liquid-based epoxy-amine ion gel membranes under mixed feed conditions relevant to biogas processing, Journal of Membrane Science 528 (2017) 64-71.
- [9] E.-S. Jo, X. An, P.G. Ingole, W.-K. Choi, Y.-S. Park, H.-K. Lee, CO₂/CH₄ separation using inside coated thin film composite hollow fiber membranes prepared by interfacial polymerization, Chinese Journal of Chemical Engineering xxx (2016) xxx-xxx (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cjche.2016.07.010>).

- [10] S. Heile, S. Rosenberger, A. Parker, B. Jefferson, E.J. McAdam, Establishing the suitability of symmetric ultrathin wall polydimethylsiloxane hollow-fibre membrane contactors for enhanced CO₂ separation during biogas upgrading, *Journal of Membrane Science* 452 (2014) 37-45.
- [11] E. Tilahun, A. Bayrakdar, E. Sahinkaya, B. Çalli, Performance of polydimethylsiloxane membrane contactor process for selective hydrogen sulfide removal from biogas, *Waste Management* 61 (2017) 250-257.
- [12] F.-C. Yen, T.-C. Chang, C.C. Hu, S. Laohaprapanon, T.S. Natarajan, S.-J. You, Feasibility of combined upflow anaerobic sludge blanket-aerobic membrane bioreactor system in treating purified terephthalic acid wastewater and polyimide membrane for biogas purification, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4 (2016) 4113-4119.
- [13] T. Rodenas, M. van Dalen, P. Serra-Crespo, F. Kapteijn, J. Gascon, Mixed matrix membranes based on NH₂-functionalized MIL-type MOFs: Influence of structural and operational parameters on the CO₂/CH₄ separation performance, *Microporous and Mesoporous Materials* 192 (2014) 35-42.
- [14] E. Esposito, G. Clarizia, P. Bernardo, J.C. Jansen, Z. Sedláková, P. Izák, S. Curcio, B. de Cindio, F. Tasselli, Pebax®/PAN hollow fiber membranes for CO₂/CH₄ separation, *Chemical Engineering and Processing* 94 (2015) 53-61.
- [15] S.-J. Kim, A. Park, S.-E. Nam, Y.-I. Park, P.S. Lee, Practical designs of membrane contactors and their performances in CO₂/CH₄ separation, *Chemical Engineering Science* 155 (2016) 239-247.
- [16] L. Sandstrom, E. Sjöberg, J. Hedlund, Very high flux MFI membrane for CO₂ separation, *Journal of Membrane Science* 380 (2011) 232-240.
- [17] S. Hassanajili, E. Masoudi, G. Karimi, M. Khademi, Mixed matrix membranes based on polyetherurethane and polyesterurethane containing silica nanoparticles for separation of CO₂/CH₄ gases, *Separation and Purification Technology* 116 (2013) 1-12.
- [18] M. Zamiri, A. Kargari, H. Sanaeepur, Ethylene vinyl acetate/poly(ethylene glycol) blend membranes for CO₂/N₂ separation, *Greenhouse Gas: Science and Technology* 5 (2015) 668-681.
- [19] H. Adelnia, H. Bidsorkhi, A. Ismail, T. Matsuura, Gas permeability and permselectivity properties of ethylene vinyl acetate/sepiolite mixed matrix membranes, *Separation and Purification Technology* 146 (2015) 351-357.

- [20] A. Possemiers, S. Boone, T. De Beer, T. Quinten, L. Hoorebeke, Ethylene vinyl acetate as matrix for oral sustained release dosage forms produced via hot-melt extrusion, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 77 (2011) 297 – 305.
- [21] M. Sadeghi, G. Khanbabaie, A. Dehaghani, M. Sadeghi, M. Aravand, M. Akbarzade, S. Khatti, Gas permeation properties of ethylene vinyl acetate-silica nanocomposite membranes, *Journal of Membrane Science* 322 (2008) 423-428.
- [22] S. Mousavi, M. Sadeghi, M. Mohammad, Y. Motamed-Hashemi, M. Chenar, R. Roosta-Azad, M. Sadeghi, Study of gas separation properties of ethylene vinyl acetate (EVA) copolymer membranes prepared via phase inversion method, *Separation and Purification Technology* 62 (2008) 642-647.
- [23] A. Wolinska-Grabczyk, P. Kubica, A. Jankowski, Effect of the acetate group content on gas permeation through membranes based on poly(ethylene-co-vinyl acetate) and its blends, *Journal of Membrane Science* 443 (2013) 227-236.
- [24] C. Ma, and J. Koros, High-performance ester crosslinked hollow fiber membrane for natural gas separation, *Journal of Membrane Science* 428 (2013) 251-259.
- [25] M. Askari, T. Yang and T. Chung, Natural gas purification and olefin/paraffin separation using cross-linkable dual-layer hollow fiber membranes comprising B-Cyclodextrin, *Journal of Membrane Science* 423 (2012) 392-403.
- [26] T. Chung, W. Lin, and R. Vora, The effect of shear rates on gas separation performance of 6FDA-durene polyimide hollow fiber, *Membrane Science* 167 (2000) 55-66.
- [27] V. Magueijo, L. Anderson, A. Fletcher, Polysulfone mixed matrix gas separation hollow fiber membrane filled with polymer and carbon xerogels, *Chemical Engineering Science*, (2013) 92, 13-20.
- [28] M. Wahab, A. Ismail and S. Shilton, Studies on gas permeation performance of asymmetric polysulfone hollow fiber mixed matrix membranes using nanosized fumed silica as fillers, *Separation and Purification Technology* (2012) 86, 41-48.
- [29] S. Kim, S. Han and Y. Lee, Thermally rearranged (TR) polybenzoxazole hollow fiber membranes for CO₂ capture, *Membrane Science* (2012) 403, 169-178.
- [30] J. Niesner, D. Jecha, P. Stehlik, Biogas upgrading technologies: state of art review in European region, *Chemical Engineering Transactions* (2013) 35, 517-522.

- [31] Q. Sun, H. Li, J. Yan, L. Liu, Z. Yu, X. Yu, Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2014) 31, 846–859.
- [32] <https://www.exxonmobilchemical.com/en/chemicals/webapi/dps/v1/datasheets/150000000106/0/en>

8. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

8.1 เมมเบรนชนิดพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตเมื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มยาว และเมื่อนำมาติดตั้งกับชุดอุปกรณ์แยกแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน พบว่ามีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้แยกแก๊สชีวภาพเพื่อผลิตไบโอมีเทน อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพจากบ่อหมักในสภาวะจริงมีอัตราการไหลที่สูงกว่าสภาวะที่ใช้ในการทดสอบมาก ดังนั้นจึงควรพัฒนาการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซีเตตให้มีความหนาสูงขึ้นด้วยเทคนิคการหล่อด้วยการหลอม (Melt casting) เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพและเสถียรภาพต่อการใช้งาน และควรศึกษาการออกแบบระบบการแยกแก๊สชีวภาพให้สามารถติดตั้งโมดูลเป็นแบบขนานเพื่อแบ่งอัตราการไหลของแก๊สชีวภาพไปยังโมดูลย่อย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกแก๊สชีวภาพในสภาวะที่มีอัตราการไหลต่ำลง

8.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของความทนทานต่อสภาพการใช้งานของพอลิเมอร์เมมเบรน เพื่อที่จะได้นำมาคำนวณเรื่องความคุ้มค่าได้อย่างถูกต้อง

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.-กฟผ.

ชุดอุปกรณ์แยกแก๊สชีวภาพต้นแบบสำหรับการผลิตไบโอมีเทน

แผนกิจกรรมหลักที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ รวมทั้งผลลัพธ์ (Output) ที่คาดว่าจะได้รับ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมหลัก	กิจกรรมรอง
1. เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	1.1 รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	1.1.1 รวบรวมงานวิจัยในระดับชาติ และนานาชาติ 1.1.2 วิเคราะห์และสังเคราะห์งานวิจัย
2. เพื่อให้ได้อุปกรณ์และสารเคมีที่จำเป็นในการวิจัย	2.1 จัดซื้ออุปกรณ์ และสารเคมีที่จำเป็นต่อการเตรียมเมมเบรน และการทดสอบการแยกแก๊สชีวภาพ	2.1.1 จัดซื้ออุปกรณ์ 2.1.2 จัดซื้อสารเคมี
3. เพื่อให้ได้เทคโนโลยีการขึ้นรูปเมมเบรน และได้เมมเบรนที่มีสมบัติเหมาะสม	3.1 เตรียมเมมเบรนให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการแยกแก๊สชีวภาพ	3.1.1 เตรียมเมมเบรน 3.1.2 เตรียมคอมโพสิตเมมเบรน 3.1.3 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมมเบรน
4. เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกแก๊สชีวภาพ	4.1 ทดสอบการแก๊สชีวภาพโดยใช้เมมเบรนที่เตรียมได้ในขั้นที่ 3	4.1.1 ศึกษาผลของชนิดของเมมเบรน 4.1.2 ศึกษาผลของวัสดุคอมโพสิตเมมเบรน 4.1.3 ศึกษาผลของอัตราการไหล
5. เพื่อให้ได้งานวิจัยฉบับสมบูรณ์ และเผยแพร่ผลการศึกษา	5.1 รวบรวมข้อมูล และเขียนรายงานการวิจัย	5.1.1 รวบรวมข้อมูล 5.1.2 เขียนรายงานการวิจัย 5.1.3 เขียนงานวิจัยเพื่อการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติหรือระดับนานาชาติ

ผลที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละช่วงระยะเวลา (แบ่งเป็นราย 6 เดือน)

เดือนที่	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (outputs)
6 เดือนที่ 1	1. รวบรวมข้อมูล จัดซื้ออุปกรณ์และสารเคมี 2. เตรียมเมมเบรน 3. ทดสอบการแยกแก๊สชีวภาพด้วยเมมเบรน	1. ได้ข้อมูล อุปกรณ์และสารเคมี 2. ได้เมมเบรนที่มีสมบัติเหมาะสม 3. ได้ปัจจัยที่มีผลต่อการแยกแก๊สชีวภาพ
6 เดือนที่ 2	1. ทดสอบการแยกแก๊สชีวภาพ (ต่อ) 2. จัดทำงานวิจัยฉบับสมบูรณ์	1. ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกแก๊สชีวภาพเพื่อผลิตไบโอมีเทน 2. ได้งานวิจัยฉบับสมบูรณ์ และสามารถเผยแพร่ผลงานวิจัย