

การพัฒนาเมมเบรนเพื่อจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอสซอร์ปชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of composite membrane for CO₂ capture via a membrane gas absorption process



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเมมเบรนเพื่อจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย กระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชัน
โดย	น.ส.สุพิชญา ศรีสคไส
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลิดา คล้ายโสม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลิดา คล้ายโสม)	
.....	กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร มณีอินทร์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ)	

ศุพิชญา ศรีศศิไส : การพัฒนาเมมเบรนเพื่อจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย
กระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชัน. (Development of composite membrane for
CO₂ capture via a membrane gas absorption process) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ชลิดา
คล้ายโสม

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยในการขึ้นรูปของเมมเบรนชนิดแผ่นเรียบด้วยวิธีการ
เปลี่ยนวัฏภาคเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการเมม
เบรนแก๊สแอบซอร์ปชันซึ่งในกระบวนการดังกล่าวมักพบปัญหาสำคัญที่เกิดจากการใช้งานคือ
การเปื่อยของเมมเบรน ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อเมมเบรนและประสิทธิภาพของเมมเบรนใน
การจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดน้อยลง โดยในงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำสาร 2 ประเภทคือ
แอลกอฮอล์ (เมทานอลและเอทานอล) และคาร์บอนแบล็คมาใช้เป็นสารเติมแต่งให้กับสารละลาย
พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์เพื่อปรับ โครงสร้างพื้นฐานวิทยาและคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของ
เมมเบรน ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งประเภทแอลกอฮอล์แล้ว สามารถช่วยเพิ่มขนาด
ของรูพรุนและความพรุนบนพื้นผิวเมมเบรนได้ โดยเมื่อเติมสารเติมแต่งเมทานอลกับคาร์บอน
แบล็ค 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักสามารถลดขนาดรูพรุนเฉลี่ยได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 192.5 นาโนเมตร
เนื่องจากสามารถลดค่าความเข้ากันได้ของตัวทำละลายและตัวไม่ละลาย (น้ำ) ที่มีผลต่อการ
เปลี่ยนวัฏภาคของเมมเบรนให้ช้าลงและเมื่อเพิ่มปริมาณของคาร์บอนแบล็คที่ความเข้มข้น
แตกต่างกัน (2.5, 5, 7.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) ทำให้เพิ่มค่ามุมสัมผัสของความไม่ชอบน้ำของ
เมมเบรนจาก 79 องศาเป็น 88 องศาและความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อ
นำไปทดสอบด้วยกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชัน โดยใช้โมโนเอทานอลามีน 3 โมลาร์
เป็นสารดูดซึม ได้ค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ที่ 3.57 ± 1.1 มิลลิโมลต่อ
ตารางเมตรต่อวินาที

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070357221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: carbon black/PVDF membrane, phase inversion, membrane gas absorption,
carbon dioxide capture

Suphitchaya Srisodsai : Development of composite membrane for CO₂ capture via a
membrane gas absorption process. Advisor: CHALIDA KLAYSOM, Ph.D.

This research focus on effect preparation parameters of the formation of flat sheet membrane was prepared by a phase inversion technique for explain the CO₂ removal performance via a membrane gas absorption. So, Problem in membrane gas absorption process is membrane wetting, causing membrane damages and low performance test. In this thesis concerned about using 2 types of substances, alcohol (methanol and ethanol) and carbon black, as the additives was incorporated in polyvinylidene fluoride (PVDF) to improve the membrane morphology and hydrophobicity of membrane. The results showed that adding alcohol species effect to highly pore size and surface porosity of membrane. When filled methanol and concentration of carbon black was 5 %by weight impact on pore size become lower 192.5 nm as the methanol was reduce the miscibility area of the system between solvent and non-solvent affect to decrease precipitation rate of the solutions. The effect of different concentration of carbon black (2.5, 5, 7.5 %by weight) found that enhanced the water contact angle from 79° to 88° and surface porosity of membranes. An absorbent used 3M of monoethanolamine (MEA) for membrane gas absorption give CO₂ absorption flux at 3.57±1.1 mmol/m²s.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลายท่าน ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชลิตา คล้ายโสม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงสำหรับการให้ความรู้และคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ตรวจสอบช่วยชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาระหว่างการทำวิจัยและเพิ่มเติมรายละเอียดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นและผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ดร. ธนิตพร นาคกุล (นาโนเทค) สำหรับความช่วยเหลือในการวัดประสิทธิภาพและการตรวจวัดคุณสมบัติ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. กษิธิศ หนูทอง ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติกร มณีอินทร์ และ ดร. ขจรศักดิ์ เพ็ญนวกิจ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและเพิ่มเติมรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนุภาคและกระบวนการวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในการสนับสนุนการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

และท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ครูและคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทความรู้ และผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนและรุ่นน้องทุกคนที่ช่วยเหลือ สนับสนุน และให้กำลังใจตลอดมา หากวิทยานิพนธ์นี้มีข้อผิดพลาดประการใดผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้

สุพิชญา ศรีศศิไส

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
บทที่ 2	5
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 เมมเบรนแก๊สแอมบอร์ปชั่น	5
2.1.2 การถ่ายเทมวลในเมมเบรน	6
<u>สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม</u>	8
2.1.3 การเตรียมเมมเบรนด้วยวิธีการเปลี่ยนวัฏภาค (Phase inversion).....	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3	17
การทดลองและการตรวจวิเคราะห์วัสดุ	17

3.1 สารเคมี.....	17
3.2 วิธีการเตรียมเมมเบรน	17
3.3 การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติ.....	19
3.3.1 ลักษณะสัณฐานวิทยา.....	19
3.3.2 ขนาดรูพรุน และความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรน (Surface porosity).....	19
3.3.3 ความพรุนของโครงสร้างเมมเบรน (Structure porosity)	19
3.3.4 ค่าความไม่ชอบน้ำ	20
3.3.5 ความเสถียรทางความร้อน	20
3.3.6 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์.....	20
3.4 การวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	20
บทที่ 4	22
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	22
4.1 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์.....	22
4.1.1 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาและขนาดของรูพรุน.....	22
4.1.2 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ต่อค่าความไม่ชอบน้ำ.....	23
4.1.3 แผนภาพวัฏภาคที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิด	24
4.2 ผลของการเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล/เมทานอล/คาร์บอนแบล็ค)	25
4.2.1 ผลของการเติมสารเติมแต่งต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาและขนาดของรูพรุน	25
4.2.2 ผลของการเติมสารเติมแต่งต่อค่าความไม่ชอบน้ำ.....	31
4.2.3 แผนภาพวัฏภาคที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิด	32
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค).....	34
4.3.1 ผลของความเข้มข้นของคาร์บอนแบล็คต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาและขนาดของรูพรุน	34

4.3.2 ผลของความเข้มข้นคาร์บอนแบล็คต่อค่าความไม่ชอบน้ำ.....	37
4.3.3 ค่าเสถียรทางความร้อนของวัสดุ	38
4.2 การวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	39
4.2.1 คุณสมบัติของเมมเบรนหลังใช้งาน	40
บทที่ 5	45
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	45
5.1.1 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์.....	45
5.1.2 ผลของการเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล/เมทานอล/คาร์บอนแบล็ค).....	45
5.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค).....	46
5.1.4 การวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก ก.....	52
สัณฐานวิทยาและขนาดของรูพรุน	52
ภาคผนวก ข.....	53
การดูซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	53
ภาคผนวก ค.....	54
อิมเมจเจ (Image processing).....	54
บรรณานุกรม	56
ประวัติผู้เขียน	58

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	2
ตารางที่ 2 ปัจจัยในการเตรียมเมมเบรน	4
ตารางที่ 3 เครื่องมือการวิเคราะห์คุณสมบัติของเมมเบรน	4
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของเมมเบรนที่พัฒนาขึ้นสำหรับกระบวนการ MGA	13
ตารางที่ 5 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	17
ตารางที่ 6 องค์ประกอบของสารละลายพอลิเมอร์	18
ตารางที่ 7 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์	22

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1 โหมมดการดำเนินการของเมมเบรนและรูปแบบการเป็ยกของผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว (ก) กรณีเมมเบรนไม่เป็ยก (ข) กรณีเมมเบรนเป็ยก (ค) กรณีเมมเบรนเป็ยกบางส่วน [14]..6	
รูปที่ 2 กระบวนการการถ่ายเทมวลในเมมเบรน [19].....8	
รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ MGA.....21	
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของ PVDF แตกต่างกัน 15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก-ข) 15%โดยน้ำหนัก (ค-ง) 17.5%โดยน้ำหนัก (จ-ฉ) 20%โดยน้ำหนัก23	
รูปที่ 5 แสดงค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก24	
รูปที่ 6 แสดงแผนภาพภูมิภาคที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิดของสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันโดยมีความเข้มข้นระหว่าง 15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก25	
รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างและสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์แตกต่างกัน 15, 17.5, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับและเติมสารเติมแต่ง (ก-ค) ไม่เติมสารเติมแต่ง (ง-ฉ) เอทานอล (ช-ฉ) เมทานอล (ญ-ฎ) คาร์บอนแบล็ค27	
รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างและสัณฐานวิทยาบริเวณภาพตัดขวางของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์แตกต่างกัน 15, 17.5, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับและเติมสารเติมแต่ง (ก-ค) ไม่เติมสารเติมแต่ง (ง-ฉ) เอทานอล (ช-ฉ) เมทานอล (ญ-ฎ) คาร์บอนแบล็ค27	
รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างและสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์แตกต่างกัน 15, 17.5, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับและเติมสารเติมแต่งระหว่างเอทานอลและเมทานอลผสมกับคาร์บอนแบล็ค (ก-ค) เอทานอลผสมคาร์บอนแบล็ค (ง-ฉ) เมทานอลผสมคาร์บอนแบล็ค28	
รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างและสัณฐานวิทยาบริเวณภาพตัดขวางของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์แตกต่างกัน 15, 17.5, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับและเติมสารเติมแต่งระหว่างเอทานอลและเมทานอลผสมกับคาร์บอนแบล็ค (ก-ค) เอทานอลผสมคาร์บอนแบล็ค (ง-ฉ) เมทานอลผสมคาร์บอนแบล็ค.....29	

รูปที่ 11 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนของเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล, เมทานอล และ คาร์บอนแบล็ค)	30
รูปที่ 12 แสดงค่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล, เมทานอล และ คาร์บอนแบล็ค)	30
รูปที่ 13 แสดงค่าความพรุนของโครงสร้างเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล, เมทานอล และ คาร์บอนแบล็ค)	31
รูปที่ 14 แสดงค่ามุมสัมผัสของความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนที่เติมสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน.....	32
รูปที่ 15 แสดงแผนภาพวิถีภาคที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิดของสารละลายพอลิไวนิลลิตินที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันเมื่อเติมเอทานอล.....	33
รูปที่ 16 แสดงแผนภาพวิถีภาคที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิดของสารละลายพอลิไวนิลลิตินที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันเมื่อเติมเมทานอล	33
รูปที่ 17 แสดงโครงสร้างและสัญญาณวิทยาของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลลิตินฟลูออไรด์ 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสารเติมแต่งเมทานอล และเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็คที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (ก-ข) 17.5%โดยน้ำหนัก (ค-ง) 17.5%โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็ค 2.5% (จ-ฉ) 17.5%โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็ค 5% (ช-ซ) 17.5%โดย น้ำหนักและเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็ค 7.5%.....	35
รูปที่ 18 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนของเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)	36
รูปที่ 19 แสดงค่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)	36
รูปที่ 20 แสดงค่าความพรุนของโครงสร้างเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค).....	37
รูปที่ 21 แสดงค่ามุมสัมผัสของความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนที่เติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)	38
รูปที่ 22 แสดงค่าความต้านทานความร้อนของเบรน	39
รูปที่ 23 แสดงค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ absorption flux).....	40
รูปที่ 24 แสดงลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของเมมเบรนที่เตรียมจากพอลิไวนิลลิตินฟลูออไรด์ 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารเติมแต่งเมทานอล และคาร์บอนแบล็คที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันก่อนใช้งาน (ซ้าย) และหลังใช้งาน (ขวา); (ก-ง) ไม่มีสารเติมแต่ง, (จ-ช) เติมเมทานอล, (ฉ-ฎ) เติม	

เมทานอลร่วมกับคาร์บอนแบล็ค (2.5 %), (ฐ-ณ) เติมเมทานอลร่วมกับคาร์บอนแบล็ค (5%), (ด-ท) เติมเมทานอลร่วมกับคาร์บอนแบล็ค (7.5%).....41

รูปที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนก่อนวัดประสิทธิภาพของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และหลังวัดประสิทธิภาพของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....42

รูปที่ 26 แสดงค่าจากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ที่ความเข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันก่อนวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....43

รูปที่ 27 แสดงค่าจากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ที่ความเข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันหลังวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....44



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนสำคัญของปัญหาแก๊สเรือนกระจก ซึ่งถูกปล่อยออกมาจากแหล่งพลังงานหลายแห่ง อาทิเช่น การเผาไหม้ฟอสซิล, โรงงานพลังงานไฟฟ้า, แหล่งอุตสาหกรรม, การขนส่งและการใช้งานภายในครัวเรือน เป็นต้น [1] เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในปัจจุบันคิดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานโลกจึงส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกพิจารณาให้เป็นปัญหาหลักของภาวะโลกร้อนและปัญหาสิ่งแวดล้อม [2]

ปัจจุบันกระบวนการที่ใช้สำหรับการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สธรรมชาติ ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพและทางเคมี, กระบวนการดูดซึม และกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน กระบวนการทั่วไปที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ กระบวนการดูดซึม ซึ่งกระบวนการดูดซึมมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี [2] อย่างไรก็ตาม กระบวนการดูดซึมยังมีข้อเสียหลายประการ เช่น สภาวะการท่วม (flooding), การกัดกร่อน, การสลายตัวของตัวทำละลาย เป็นต้น กระบวนการดูดซับเป็นอีกกระบวนการที่น่าสนใจสำหรับการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีค่าการเลือกเกิดสูง (selectivity) แม้ว่าจะต้องบำบัดแก๊สเสียก่อนที่จะถูกป้อนเข้าสู่ระบบ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับด้วยสารดูดซับประเภทของแข็งบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับแม้ว่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าต่ำ ซึ่งสารดูดซับที่ถูกใช้งานแล้วจะสามารถนำไปใช้อีกครั้งหลังจากผ่านกระบวนการคายซับ โดยกระบวนการดังกล่าวจะต้องใช้พลังงานจำนวนมากและใช้เวลานานในการนำกลับสารดูดซับเพื่อนำมาใช้ใหม่ [3, 4] ส่วนกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนเริ่มถูกนำมาใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนจากแก๊สธรรมชาติ [5] ซึ่งจุดเด่นของกระบวนการเมมเบรน คือ มีขนาดกะทัดรัดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดซึมและกระบวนการดูดซับ แต่กระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนจะมีข้อจำกัดจากสถานะของแก๊ส เช่น การปนเปื้อนของแก๊ส ความเข้มข้นของแก๊ส และความดันของแก๊ส ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดก่อนนำไปใช้ในกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน [6] สำหรับข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการ สรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การดูดซึม (Absorption)	ประสิทธิภาพสูง สารดูดซึมสามารถคืนสภาพได้ด้วยการให้ความร้อนและ/หรือลดความดัน	ขึ้นกับชนิดของสารดูดซึมที่เลือกใช้ อาจเกิดการสูญเสียตัวทำลายจากการระเหย การกัดกร่อน
การดูดซับ (Adsorption)	สารดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ค่าการเลือกเกิดสูงเมื่อความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ	ต้องมีอุปกรณ์การบำบัดแก๊สก่อนนำแก๊สเข้าสู่กระบวนการ
การแยกแก๊สด้วยเมมเบรน (Membrane gas separation)	ค่าการเลือกเกิดสูง อุปกรณ์มีขนาดกะทัดรัด	ปัญหาในการดำเนินการคือ ฟลักซ์ต่ำ

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบแบบใหม่ที่เป็นความร่วมมือระหว่างกระบวนการดูดซึมและกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนเพื่อใช้ในการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเรียกว่า กระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชัน (Membrane gas absorption, MGA) [7] โดยในกระบวนการดังกล่าวจะมีเมมเบรนกั้นระหว่างสองวัฏภาคเพื่อไม่ให้วัฏภาคของแก๊สรวมกับวัฏภาคของของเหลว ดังนั้นจึงสามารถปรับอัตราการไหลของแก๊สและของเหลวให้เกิดความสมดุลกันโดยปราศจากการเกิดการท่วมและการเกิดฟอง (foaming) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ MGA จะใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยและใช้พลังงานน้อย [8] โดยเมมเบรนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชันควรมีคุณสมบัติของ ดังนี้ เมมเบรนต้องมีรูพรุนขนาดเล็ก, มีความพรุนบนพื้นผิวมาก, มีความแข็งแรงเชิงกล และมีความไม่ชอบน้ำที่สูง [7] ทั้งนี้ในกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชันมีข้อจำกัดที่สำคัญอันเกี่ยวเนื่องจากคุณสมบัติของเมมเบรนที่มีอยู่ในปัจจุบัน คือ ปัญหาการเปื่อยของเมมเบรนที่เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งจะทำให้เมมเบรนบวมและทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนลดลง [9]

การลดการเปื่อยของเมมเบรนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปรับสัณฐานวิทยาของเมมเบรน [10], การเติมสารเติมแต่งที่มีความไม่ชอบน้ำ [1], และการปรับพื้นผิวของเมมเบรน [11] ซึ่ง

วิธีการดังกล่าวนี้จะช่วยให้เมมเบรนมีคุณสมบัติของความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการผลิตเมมเบรนสำหรับกระบวนการ MGA เป็นชนิดที่มีความไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP), พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE), พอลิเททระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE), พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride; PVDF) ซึ่งพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าความไม่ชอบน้ำสูงและมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเททระฟลูออโรเอทิลีนและพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ [12] นอกจากนี้ ยังสามารถปรับแต่งคุณสมบัติให้มีความไม่ชอบน้ำขึ้นได้อีกหลากหลายวิธี อาทิเช่น การเติมสารเติมแต่งลงในพอลิเมอร์ การเติมสารเติมแต่งในพอลิเมอร์นอกจากจะสามารถเพิ่มค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนแล้วยังทำให้พื้นผิวของเมมเบรนและโครงสร้างของรูพรุนของเมมเบรนเปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย ซึ่งคาร์บอนแบล็ค (Carbon black) เป็นสารเติมแต่งที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากคาร์บอนแบล็คมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี, มีความหนาแน่นต่ำ, มีความเสถียรทางความร้อน, และมีค่าความไม่ชอบน้ำที่สูง [13, 14] และเนื่องด้วยปัจจัยในการเปลี่ยนวัฏภาคของเมมเบรนที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของเมมเบรนโดยมีการเติมสารเติมแต่งประเภทตัวทำละลายร่วม (weak co-solvent) เพื่อช่วยลดอัตราเร็วในการแลกเปลี่ยนระหว่างตัวทำละลาย (solvent) และตัวไม่ละลาย (non-solvent) [15] อย่างไรก็ตามมีความจำเป็นต้องศึกษาปริมาณการเติมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของเมมเบรนที่เหมาะสมกับกระบวนการ MGA ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการเติมคาร์บอนแบล็คในพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ ให้ได้เมมเบรนที่มีความพรุนสูงและความไม่ชอบน้ำ เพื่อลดปัญหาการเปียกของเมมเบรน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยในการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดแผ่นเรียบด้วยวิธีการเปลี่ยนวัฏภาคที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติการเปียกของเมมเบรน
- 1.2.2 เพื่อทดสอบการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอสซอร์ปชัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การเตรียมเมมเบรน

เมมเบรนชนิดแผ่นเรียบจะถูกเตรียมจากโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ด้วยวิธีการเปลี่ยนวัฏภาค โดยศึกษาปัจจัยในการเตรียมดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ปัจจัยในการเตรียมเมมเบรน

ปัจจัยในการเตรียมเมมเบรน	ตัวแปรที่ศึกษา
ตัวทำละลาย	ไดเมทิลฟอร์มามิเด (DMF)
ความเข้มข้นของพอลิเมอร์	15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ชนิดของสารเติมแต่ง	คาร์บอนแบล็ค, เมทานอล, เอทานอล

1.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติ

ตารางที่ 3 เครื่องมือการวิเคราะห์คุณสมบัติของเมมเบรน

คุณสมบัติ	เทคนิค/เครื่องมือวิเคราะห์
โครงสร้างและสัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
ขนาดของรูพรุน	โปรแกรมอิมเมจเจ (image j programming)
ค่าความไม่ชอบน้ำ	เครื่องวัดมุมสัมผัส (Water contact angle)
ความเสถียรของวัสดุ	กระบวนการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric analysis)
วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
การจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	กระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชัน (Membrane Gas Absorption)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

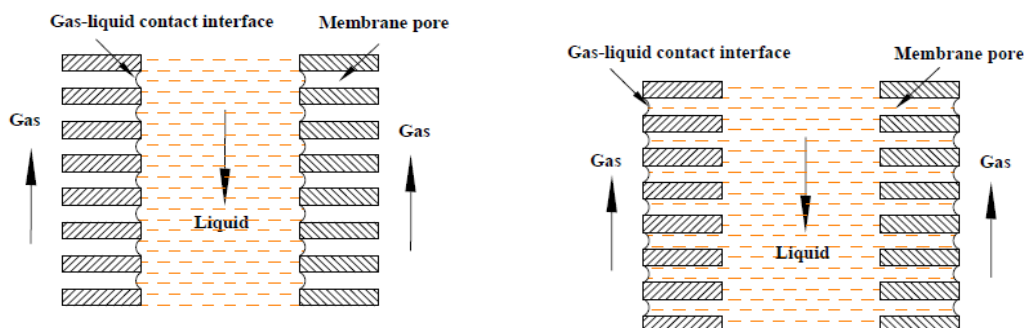
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 เมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชัน

กระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชัน (Membrane gas absorption, MGA) เป็นการผสมผสานระหว่างกระบวนการดูดซึมและเทคนิคการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน [7] กระบวนการ MGA มีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดซึม ตัวอย่างเช่น เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทมวล, อุปกรณ์มีขนาดกะทัดรัด, มีความยืดหยุ่นในการใช้งานและสามารถขยายขนาดจากการทดลองเป็นขนาดอุตสาหกรรมได้ง่าย [16] นอกจากนี้กระบวนการ MGA สามารถควบคุมอัตราการไหลของวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคแก๊สได้อย่างอิสระและป้องกันการเกิดการท่วม (flooding) และการเกิดฟอง (foaming) [8] แม้ว่ากระบวนการ MGA จะมีประโยชน์มากกว่ากระบวนการดูดซึม แต่ก็ทำให้ค่าความต้านทานการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น ในทางทฤษฎีแก๊สจะแพร่ผ่านรูพรุนของเมมเบรนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของเมมเบรนเพื่อที่จะถูกดูดซึมด้วยสารดูดซึมซึ่งเมมเบรนจะมีด้วยกันสามประเภทคือ 1) เมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำ รูพรุนของเมมเบรนอาจถูกเติมด้วยแก๊สซึ่งเป็นการดำเนินการแบบแห้ง 2) เมมเบรนที่มีความชอบน้ำ รูพรุนของเมมเบรนอาจถูกเติมด้วยของเหลว 3) แบบผสมระหว่างความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำจะมีลักษณะรวมทั้งความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ [17]

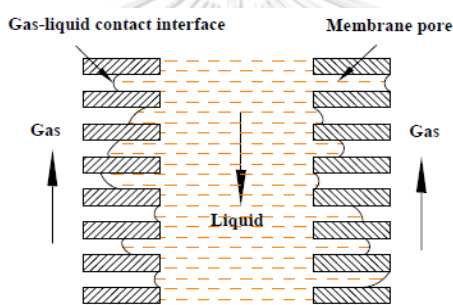
โดยทั่วไปการดำเนินการของเมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำควรเป็นการดำเนินการแบบแห้ง และจะมีการปรับให้ความดันของสองวัฏภาคให้ต่างกันเล็กน้อย เพื่อให้สารละลายไม่เข้าไปในรูพรุนของเมมเบรน โดยทั่วไปจะมีการปรับความดันด้านวัฏภาคของเหลวให้สูงกว่าด้านแก๊สเล็กน้อยเพื่อป้องกันการเกิดฟองแก๊ส (รูปที่ 1 ก) สำหรับเมมเบรนที่ชอบน้ำการดำเนินการจะเป็นแบบเปียก ซึ่งรูพรุนของเมมเบรนจะมีของเหลวเข้าไปจนเต็ม (รูปที่ 1 ข) แต่อย่างไรก็ตาม จากผลการวิจัยพบว่าการใช้เมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำ อาจทำให้เมมเบรนเกิดการเปียกเพียงบางส่วนได้ ซึ่งขึ้นกับเหตุผล

หลายประการ เช่น ค่าแรงตึงผิวของสารละลาย ค่ามุมสัมผัสของเมมเบรน เป็นต้น (รูปที่ 1 ค) แสดงการเปียกเพียงบางส่วนของเมมเบรน คือการมีของเหลวเข้าไปในรูพรุนของเมมเบรน [18]



(ก) กรณีเมมเบรนไม่เปียก

(ข) กรณีเมมเบรนเปียก



(ค) กรณีเมมเบรนเปียกบางส่วน

รูปที่ 1 โหมดการดำเนินการของเมมเบรนและรูปแบบการเปียกของผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว (ก) กรณีเมมเบรนไม่เปียก (ข) กรณีเมมเบรนเปียก (ค) กรณีเมมเบรนเปียกบางส่วน [14]

2.1.2 การถ่ายเทมวลในเมมเบรน

เมมเบรนจะเป็นกำแพงกั้นระหว่างวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคของแก๊ส ซึ่งในกรณีที่เมมเบรนมีรูพรุนแก๊สจะแพร่กระจายผ่านรูพรุนและถูกดูดซึมโดยสารดูดซึมในวัฏภาคของเหลวและในกรณีที่เมมเบรนไม่มีรูพรุนแก๊สจะละลายเข้าไปในเมมเบรนและแพร่ผ่านเมมเบรน โดยไม่ขึ้นกับอัตราการไหลของแก๊สและของเหลว การจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกำหนดโดยสารดูดซึม การดูดซึมในวัฏภาคของเหลวจะขึ้นกับลักษณะทางกายภาพหรือปฏิกิริยาทางเคมี [19] กระบวนการโดยรวมประกอบด้วยสามขั้นตอน [20] ดังแสดงในรูปที่ 2

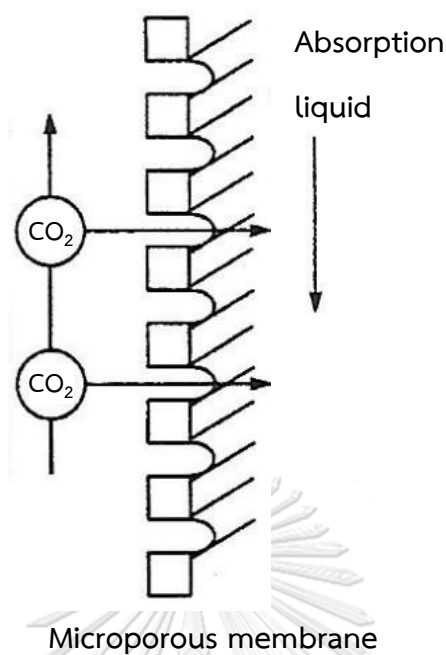
(1) การถ่ายเทมวลจากวัฏภาคแก๊สไปยังผิวของเมมเบรน

(2) การถ่ายเทมวลผ่านรูพรุนของเมมเบรน

(3) การถ่ายเทมวลจากผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับเมมเบรนไปยังวัฏภาคของเหลว

ในกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชัน แก๊สจะสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนจากด้านแก๊สไปยังด้านของเหลวตามกฎการแพร่ของฟิกส์ (Fick's law) เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้น และถูกดูดซึมด้วยสารดูดซึม จากขั้นตอนการถ่ายเทมวลจากผิวสัมผัสของเมมเบรนไปยังของเหลว ในกรณีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถแพร่ผ่านรูพรุนของเมมเบรนได้โดยกลไกการแพร่ของนูดเซน (Knudsen diffusion) หากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่าระยะเฉลี่ยที่โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน (Mean free path) โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีขนาด 0.33 นาโนเมตร (ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ) โดยการเคลื่อนที่ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านเมมเบรนหากเมมเบรนมีโครงสร้างลักษณะคล้ายนิ้ว (Finger-liked Structure) แก๊สจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ในขณะที่เมมเบรนมีโครงสร้างแบบฟองน้ำ (Sponge-liked structure) แก๊สจะเคลื่อนที่แบบคดเคี้ยว (Tortuous) ซึ่งความพรุน (Porosity, ϵ) และความคดเคี้ยว (Tortuosity, τ) เป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (k_m) [21]

ในกรณีแผ่นฟิล์มบาง (Thin film layer) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะแพร่โดยใช้กลไกความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) [21] ดังนั้น เพื่อลดความต้านทานของเมมเบรนจึงควรลดความหนาของเมมเบรน และเมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการ MGA ควรจะมีปริมาณรูพรุนบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนในปริมาณที่มาก



รูปที่ 2 กระบวนการการถ่ายเทมวลในเมมเบรน [19]

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 [22];

$$K_i (m/s) = \frac{Q_g (C_{g,in} - C_{g,out})}{A_m (\Delta C_m)} \quad (5)$$

- โดย K_i คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม
 Q_g คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส
 A_m คือพื้นที่ของเมมเบรน
 ΔC_m คือค่า logarithmic mean ของความเข้มข้นวัฏภาคแก๊ส คำนวณจาก [22];

$$\Delta C_m = \frac{(HC_{g,in} - C_{l,out}) - HC_{g,out}}{\ln[(HC_{g,in} - C_{l,out}) / (HC_{g,out})]} \quad (6)$$

- โดย $C_{g,in}$ คือความเข้มข้นของแก๊สขาเข้า
 $C_{g,out}$ คือความเข้มข้นของแก๊สขาออก
 $C_{l,out}$ คือความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในของเหลวขาออก
 H คือค่าคงที่เฮนรี่ (Henry's constant)

ค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 absorption flux) มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 7 [10, 22];

$$J_{CO_2} = K_i(c_g - c_l^*) \quad (7)$$

โดย	J_{CO_2}	คือค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{mol/m}^2\text{s}$)
	K	คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (m/s)
	c_g	คือความเข้มข้นในวัฏภาคแก๊ส (mol/m^3)
	c_l^*	คือความเข้มข้นของวัฏภาคแก๊สที่สมดุลกับวัฏภาคของเหลว (mol/m^3)

นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 8 [10];

$$\eta = \frac{C_{g,in} - C_{g,out}}{C_{g,in}} \times 100 \quad (8)$$

พารามิเตอร์ในการดำเนินการที่ส่งผลต่อการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ อัตราการไหลของแก๊สและของเหลว ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สจะทำให้สามารถลดความต้านทานของการแพร่กระจาย [23] แต่อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของแก๊สที่สูงเกินไปจะทำให้ระยะเวลา (Residence time) ของสารที่อยู่ในโมดูลสั้นลง ส่งผลให้การกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงด้วย [24] นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวจะนำไปสู่ขอบเขตความหนาของชั้นฟิล์มเหลวบางลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมและค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น [25] ดังนั้นสำหรับการดำเนินการแต่ละครั้งควรปรับอัตราการไหลของแก๊สและของเหลวให้พอเหมาะเพื่อรักษาระยะเวลาของสารและค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เหมาะสม

โดยปกติสำหรับกระบวนการ MGA ควรใช้เมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำเพื่อให้ของเหลวไหลไปตามพื้นผิวของเมมเบรนแทนที่จะถูกเติมลงในรูพรุนของเมมเบรนจะส่งผลให้เมมเบรนเกิดการเปียก เมื่อรูพรุนของเมมเบรนเต็มและเปียกจะทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนลดน้อยลง สารดูดซึมสามารถจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เฉพาะบริเวณรูพรุนและทำให้ความต้านทานการถ่ายเทมวลของเมมเบรนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง [8] ยิ่งไปกว่านั้นจะทำให้เมมเบรนได้รับความเสียหายจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างเมมเบรนและสารดูดซึมจึงทำให้มีความแข็งแรงเชิงกลน้อยลง [26] โดยของเหลวที่ใช้เป็นสารดูดซึมมีหลากหลายชนิด เช่น น้ำ, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, โพลีเอทิลีนไกลคอล, เอมีน, และกรดเกลืออะมิโน เป็นต้น ซึ่งเกณฑ์ในการเลือกสารดูดซึมมีดังนี้

- เกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี

เมื่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สัมผัสกับของเหลวในรูพรุนของเมมเบรนแล้ว เกิดปฏิกิริยาได้ดีจะส่งผลให้มีอัตราการดูดซึมที่สูง [8]

- แรงตึงผิวสูง

โดยปกติเมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอสซอร์ปชันมักจะเป็นเมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำ โดยของเหลวที่มีแรงตึงผิวน้อยจะมีแนวโน้มในการซึมผ่านรูพรุนได้มากกว่าทำให้เกิดการเปียกได้ง่าย จึงควรหลีกเลี่ยงตัวทำละลายที่มีแรงตึงผิวน้อย [8]

- ความเข้ากันได้ทางเคมีกับวัสดุพอลิเมอร์

การทำให้เมมเบรนเปียกอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารดูดซึมกับเมมเบรน จะนำไปสู่พื้นผิวของเมมเบรนและรูพรุนของเมมเบรนที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งความเข้ากันได้จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดเสถียรภาพในการดำเนินการระยะยาว [8]

- แรงดันไอต่ำและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี

หากสารดูดซึมระเหยง่ายจะทำให้ไอของสารสูญเสียบ้างวิฤภาคของแก๊ส ดังนั้นจึงควรเลือกสารดูดซึมที่มีแรงดันไอต่ำและมีความเสถียรทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง เพื่อหลีกเลี่ยงการสลายตัวทางความร้อน [8]

- การนำกลับมาใช้ใหม่

สารดูดซึมที่เลือกใช้ควรสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย เนื่องจากต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของสารดูดซึมและความประหยัดในการดำเนินการ [8]

สารดูดซึมที่ใช้กันทั่วไปในเชิงพาณิชย์สำหรับการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีแรงตึงผิวดำ [9] โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) ซึ่งสามารถดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี เมื่อความเข้มข้นของโมโนเอทานอลามีนมากขึ้น แม้จะสามารถจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น แต่จะทำให้เกิดการสร้างแรงตึงผิวที่น้อยลงซึ่งทำให้โมโนเอทานอลามีนสามารถแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของเมมเบรนได้ง่ายขึ้นด้วย ดังนั้นการเลือกเมมเบรนที่ไม่ชอบน้ำและการปรับค่าพารามิเตอร์ในการดำเนินการที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ลดการเปียกและเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรน [8]

2.1.3 การเตรียมเมมเบรนด้วยวิธีการเปลี่ยนวัฏภาค (Phase inversion)

วิธีการเปลี่ยนวัฏภาค (Phase inversion) เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในการผลิตเมมเบรน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนวัฏภาคของพอลิเมอร์ในสถานะของเหลวเป็นของแข็ง โดยเริ่มจากเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปขึ้นรูปบนแผ่นกระจกโดยควบคุมความหนาแล้วนำเมมเบรนแช่ลงในถังตกตะกอนเพื่อให้เมมเบรนเปลี่ยนวัฏภาคจากของเหลวเป็นของแข็ง ในระหว่างกระบวนการเปลี่ยนวัฏภาคของเมมเบรนจะมีการสร้างรูพรุนภายในเมมเบรนขึ้นด้วยผลของอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic) และผลของจลนศาสตร์ (kinetic) โดยสารละลายพอลิเมอร์จะเกิดการแยกออกเป็น 2 วัฏภาค คือ (1) วัฏภาคที่มีความเข้มข้นของพอลิเมอร์สูง (polymer-rich phase) ซึ่งจะเปลี่ยนเนื้อผนังเมมเบรน และ (2) วัฏภาคที่มีความเข้มข้นของพอลิเมอร์ต่ำ (polymer-lean phase) ซึ่งจะกลายเป็นโพรงรูพรุน (macrovoids) ภายในโครงสร้างของเมมเบรน เมื่อมีอัตราการเปลี่ยนวัฏภาคที่เร็วโครงสร้างของเมมเบรนที่ได้จะมีรูพรุนขนาดใหญ่คล้ายนิ้วมือ ในขณะที่เมื่อมีอัตราการเปลี่ยนวัฏภาคที่ช้าลงมักได้โครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กกว่าคล้ายฟองน้ำ [27] โดยปัจจัยในการขึ้นรูปที่ส่งผลต่อโครงสร้างของเมมเบรนประกอบไปด้วย [28, 29]

- ประเภทและความเข้มข้นของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ขนาดรูพรุนและความพรุนของเมมเบรนจะลดลง [28]
- ประเภทของสารเติมแต่งและปริมาณการไหลของสารเติมแต่ง สารเติมแต่งสามารถใช้ในการปรับแต่งสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของเมมเบรน เช่น การเติมฟลูออรีนเตซิลิกา (fluorinated silica) ลงบนพอลิเอทีเออร์ไอไมด์ (PEI) ทำให้ความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้น [28] และการเติมสารเติมแต่ง SMM (Surface modifying macromolecules) ลงในพอลิซัลโฟน (PSF) จะสามารถปรับขนาดรูพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น [30]
- ประเภทและปริมาณของตัวทำละลายและตัวไม่ละลาย การเลือกตัวทำละลายและตัวไม่ละลายที่เหมาะสมมีผลอย่างมากต่อสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของเมมเบรน หากพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายในปริมาณน้อยเมมเบรนที่เกิดขึ้นจะไม่มีรูพรุนและเมื่อความสามารถในตัวทำละลายของพอลิเมอร์มีค่ามากจะทำให้เมมเบรนที่ได้มีความพรุนมากขึ้น [28]
- อุณหภูมิและความชื้น โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของถังตกตะกอนจะทำให้ขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นแต่เมื่อค่าความชื้นในบรรยากาศสูงจะทำให้การระเหยตัวของตัวทำละลายใน

สารละลายพอลิเมอร์ระเหยได้ข้างส่งผลให้ผิวของเมมเบรนจะบางและมีขนาดรูพรุนเล็กลง [28]

- เวลาในการตกตะกอน เมื่อความเร็วในการตกตะกอนเพิ่มขึ้นจะทำให้เมมเบรนมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น [15]
- อุณหภูมิของตัวไม่ละลายในถังตกตะกอน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของตัวไม่ละลายจะทำให้ขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น [31]

ในการขึ้นรูปเมมเบรนด้วยวิธีการเปลี่ยนวัฏภาค สามารถขึ้นรูปเมมเบรนได้ทั้งชนิดแผ่นเรียบและเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง [29] ซึ่งโครงสร้างของเมมเบรนที่มีลักษณะเฉพาะทั้งโครงสร้างแบบสมมาตรและโครงสร้างแบบไม่สมมาตร ส่วนมากจะมาจากการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ โดยมีการปรับพารามิเตอร์ของการเปลี่ยนวัฏภาค [32]



2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของเมมเบรนที่พัฒนาขึ้นสำหรับกระบวนการ MGA

Polymer	สารเติมแต่ง	Water Contact Angle (°)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	ความพรุน (%)	สถานะในการทดสอบ	CO ₂ Absorption Flux (mol/m ² s)	ที่มา
PVDF	-	85	305	56	Gas : CO ₂ /N ₂ : 20/80 QL = 2500ml QG = 3600 ml/min	420	[22]
PVDF	-	127.2	35	90	Gas : CO ₂ /N ₂ : 20/80 QL : 1500 ml/min QG : 3600 ml/min	-	[10]
PVDF	1 wt% SMM	92	385	-	Gas : CO ₂ /water QL : 300 ml/min QG : 100 ml/min	7x10 ⁻⁴	[1]
PVDF	2 wt% SMIM	96.2	200	-	Gas : CO ₂ /water QL : 80 ml/min QG : 100 ml/min	4.5x10 ⁻⁴	[33]
PVDF	6 wt% SMM	99	654	85	Gas : CO ₂ /water QL : 300 ml/min QG : 100 ml/min	5.4x10 ⁻³	[34]
PVDF	1 wt% MMT	90	28.7	-	Gas : CO ₂ /water VL : 3.1 m/s	1x10 ⁻³	[35]

Polymer	สารเติมแต่ง	Water Contact Angle (°)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	ความพรุน (%)	สถานะในการทดสอบ	CO ₂ Absorption Flux (mol/m ² s)	ที่มา
					QG : 100 ml/min		
PVDF	5 wt% MMT	99	21	-	Gas : CO ₂ /water QL : 200 ml/min QG : 100 ml/min	1.6x10 ⁻³	[36]
PEI	Fluorinated Silica	124	40	81	Gas : CO ₂ /water VL : 0.3 m/s QG : 100 ml/min	1.6x10 ⁻³	[11]
PEI	1 wt% MMT	86	79	-	Gas : CO ₂ /water VL : 0.3 m/s	1.09x10 ⁻³	[37]
PSF	1 wt% SMM	73	568	83	Gas : CO ₂ /water QL : 300 ml/min QG : 100 ml/min	5.8x10 ⁻⁴	[30]

Remark:

[Poly] = ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ (Polymer Concentration)

QL = อัตราไหลของเหลว (Liquid flow rate)

QG = อัตราไหลของแก๊ส (Gas flow rate)

VL = ความเร็วของเหลว (Liquid velocity)

ในกระบวนการ MGA สำหรับการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นิยมใช้เมมเบรนควรมีความไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE, มีค่ามุมสัมผัส 109.4 องศา), พอลิไวนิลลิดีน ฟลูออไรด์ (PVDF, มีค่ามุมสัมผัส 86 องศา), พอลิอีเทอร์อีไมด์ (PEI, มีค่ามุมสัมผัส 76.5 องศา), และ พอลิซัลโฟน (PSF, มีค่ามุมสัมผัส 75 องศา) ตารางที่ 4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเมมเบรนที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อกระบวนการ MGA

คุณสมบัติด้านค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญ ที่จะส่งผลต่ออายุการใช้งาน ในขณะที่ขนาดรูพรุนและความพรุนของเมมเบรนจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นในกระบวนการ MGA เมมเบรนควรมีขนาดรูพรุนที่เล็กแต่มีความพรุนบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนที่สูงเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสของแก๊สกับสารดูดซับและช่วยลดโอกาสในการที่เมมเบรนจะเปียกจากการสัมผัสกับสารดูดซับ [22] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของพื้นผิวของเมมเบรน เช่น ความพรุน, ขนาดรูพรุน, ความขรุขระของพื้นผิวและคุณสมบัติทางเคมีของเมมเบรน ดังนั้นจึงมีวิธีการทั่วไปสามวิธีในการปรับปรุงเมมเบรนให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นดังนี้ 1) การปรับความพรุนของเมมเบรน 2) การปรับเปลี่ยนพื้นผิวของเมมเบรน 3) การปรับคุณสมบัติทางเคมีของเมมเบรน [8]

การปรับความพรุนของเมมเบรน

การเติมสารเติมแต่งที่ไม่ใช่ตัวทำละลาย เช่น เอทานอล (ethanol), เอ็น-เมทิล-2-ไพโรลิโดน (NMP) โดยจะเติมลงในสารละลายพอลิเมอร์ในระหว่างขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับวิธีการเปลี่ยนภูมิภาคและการปรับความพรุนของเมมเบรนด้วยการเติมสารเติมแต่งที่ไม่ใช่ตัวทำละลายลงในถังตกตะกอนผสมกับน้ำ จากงานวิจัยของ A.L. Ahmad ซึ่งได้ทำการเตรียมเมมเบรนแบบแผ่นเรียบโดยการนำเมมเบรนลงไปตกตะกอนในถังตกตะกอนที่มีความแตกต่างของความเข้มข้นของเอทานอล (0, 25, 50, 75 เปอร์เซ็นต์) ในน้ำเพื่อศึกษาผลกระทบของเอทานอลที่มีผลต่อคุณสมบัติของเมมเบรน ซึ่งผลการทดลองพบว่าเมมเบรนที่เตรียมได้มีรูพรุนขนาดเล็กและมีค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวเมมเบรนเพิ่มขึ้น (ไม่ชอบน้ำมากขึ้น) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลโดยค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 85 เป็น 127.2 องศา [10, 22]

การปรับเปลี่ยนพื้นผิวของเมมเบรน

การปรับเปลี่ยนพื้นผิวของเมมเบรนสามารถทำได้โดยการปรับสภาวะในการขึ้นรูปแบบเปลี่ยนวัสดุ เช่น การเติมสารฟลูออรีเนตซิลิกา (fluorinated silica) ลงบนพอลิอีเทอร์อิมิด (PEI) ในการเพิ่มความขรุขระของเมมเบรนเพื่อปรับปรุงค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรน ซึ่งผลการวิจัยพบว่าค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 66.7 เป็น 124.8 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างพอลิอีเทอร์อิมิดและฟลูออรีเนตซิลิกาทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซนแบบพันธะเดี่ยวบนพื้นผิวของเมมเบรน (Si-O-Si or Si-O-R; Siloxane group ซึ่ง R คือไฮโดรคาร์บอน เช่น $-\text{CH}_2\text{CH}_3$) [11, 38] และจากการทบทวนวรรณกรรมก่อนหน้าของ Su-Hsia Linc ศึกษากระบวนการพลาสมาทรีทเมนต์ (Plasma treatment) โดยการเติมฟลูออโรคาร์บอนลงบนพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ซึ่งพบว่ามีการทำปฏิกิริยากันจนเกิดพันธะ C-F บนพื้นผิวของเมมเบรนและส่งผลให้ค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนเพิ่มขึ้นเป็น 155 องศา [23]

การปรับคุณสมบัติทางเคมีของเมมเบรน

การเติมสารเติมแต่งที่มีค่าความไม่ชอบน้ำลงในสารละลายพอลิเมอร์โดยตรงเพื่อปรับปรุงค่าความไม่ชอบน้ำของพอลิเมอร์ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมมีการเติมสารเติมแต่งชนิด Surface modifying macromolecules (SMM) ที่เติมลงในสารละลายพอลิเมอร์พอลิซัลโฟน (PSF) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งและทำการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงด้วยวิธีการเปลี่ยนวัสดุ โดย SMM เป็นโมเลกุลที่มีทั้งขั้วที่ชอบน้ำและขั้วไม่ชอบน้ำเมื่อเติมสารเติมแต่ง SMM แล้วจะช่วยลดพลังงานพื้นผิวให้น้อยลง (Surface energy) ในกรณีนี้จะช่วยลดเวลาในการแลกเปลี่ยนระหว่างเมมเบรนกับอากาศได้ ซึ่งพบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่ง SMM (1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ทำให้เมมเบรนมีขนาดรูพรุนที่เพิ่มขึ้นจาก 251 นาโนเมตรเป็น 568 นาโนเมตรซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนวัสดุอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างของเมมเบรนมีลักษณะคล้ายนิ้ว (Finger-like) เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ต่ำ (ความหนืดต่ำ) และการใช้ตัวไม่ละลาย (น้ำ; Strong non-solvent) เป็นสารในถังตกตะกอนเพื่อใช้ในการขึ้นรูปของเมมเบรนและมีความมุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 62-63 องศาเป็น 70-73 องศา [30] และเมื่อเติมสารเติมแต่ง SMM ลงในสารละลายพอลิเมอร์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่ 17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเติมสาร SMM ที่ความเข้มข้น 1, 2, 4, และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมมเบรน

ที่เตรียมได้มีค่าขนาดของรูพรุนเล็กลงจาก 300 นาโนเมตรเป็น 200 นาโนเมตร เนื่องจากสารเติมแต่ง SMM ช่วยให้กระบวนการเปลี่ยนวัฏภาคของสารละลายพอลิเมอร์เกิดได้เร็วขึ้นทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง แต่หากใช้ความเข้มข้นของพอลิเมอร์อยู่ที่ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมมเบรนที่มีการเติมสาร SMM กลับมีรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นจาก 158 นาโนเมตรเป็น 654 นาโนเมตรเนื่องจากสารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นทำให้มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจึงทำให้การเปลี่ยนวัฏภาคของสารละลายพอลิเมอร์ช้าลงและค่ามูมสัมพัทธ์ของเมมเบรนมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 94-99 องศา [1, 33, 34] นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งอีกชนิดที่นำมาเติมเพื่อปรับค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนคือ MMT (montmorillonite) ซึ่งได้มีการเติมสารเติมแต่งที่ความเข้มข้นที่ 1, 3, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักลงบนพอลิเอทเธอร์อิมิด (PEI) จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งมากขึ้นเมมเบรนจะมีรูพรุนขนาดเล็กลงมากกว่า 331 นาโนเมตรเหลือ 44 นาโนเมตรและมูมสัมพัทธ์ของเมมเบรนมีค่าเท่ากับ 86 องศา [37] และสำหรับสารละลายพอลิเมอร์ชนิดพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) มีการเติมสารเติมแต่งความเข้มข้น 0, 1, 3, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักหลังจากการเติมสารเติมแต่งแล้วทำให้ค่ามูมสัมพัทธ์ของเมมเบรนมีค่าระหว่าง 90-99 องศา [35, 36]

เมื่อความพรุนของผิวของเมมเบรนมีค่าสูงจะทำให้ประสิทธิภาพในการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีขึ้นในขณะที่รูพรุนบนผิวของเมมเบรนมีขนาดเล็กจะสามารถป้องกันการเปื่อยของเมมเบรนได้และขนาดของรูพรุนส่งผลต่อฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในปัจจุบันวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรน โดยสารเติมแต่งที่ได้รับความนิยมมาก คือคาร์บอนแบล็คเนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงกลสูง, มีความหนาแน่นต่ำ, มีความเสถียรทางความร้อน, มีความเป็นรูพรุนมาก, และมีค่าความไม่ชอบน้ำสูง [13, 14]

บทที่ 3

การทดลองและการตรวจวิเคราะห์วัสดุ

3.1 สารเคมี

สารเคมีและคุณลักษณะจำเพาะของสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้สรุปไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	คุณลักษณะจำเพาะ	ผู้ผลิต
Polyvinylidene fluoride (PVDF)	Mw = 275,000	Sigma-Aldrich
Dimethylformamide (DMF)	99.8% extra pure	Sigma-Aldrich
Carbon black (CB)		DC fine chemical
Methanol	HPLC Grade	Honeywell
Ethanol absolute	99.9%, Grade AR	Qrec
Monoethanolamine (MEA)	99.5%	Dow chemical Company

3.2 วิธีการเตรียมเมมเบรน

เมมเบรนชนิดแผ่นเรียบเตรียมโดยวิธีการเปลี่ยนวัฏภาค โดยเริ่มจากเตรียมสารละลายพอลิเมอร์แล้วปั่นกวนจนกระทั่งเป็นสารละลายเนื้อเดียวกันที่ความเข้มข้นแตกต่างกันและองค์ประกอบแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6 โดยควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 40-50 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการปั่นกวน 200 รอบต่อนาที จากนั้นนำสารละลายไปขึ้นรูปบนแผ่นกระจกโดยควบคุมความหนาที่ 250 ไมโครเมตรแล้วแช่ลงในน้ำ เพื่อให้เมมเบรนเปลี่ยนวัฏภาคจากของเหลวเป็นของแข็ง หลังจากนั้นแช่เมมเบรนเป็นเวลา 1 คืนแล้วนำเมมเบรนไปอบด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน โดยชื่อตัวอย่างในแต่ละองค์ประกอบที่เตรียมได้แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 องค์ประกอบของสารละลายพอลิเมอร์

ความเข้มข้น ของพอลิเมอร์	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณสารเติมแต่ง (% โดยมวล)	
15%	15PVDF	-	-
	15PVDF-5CB	-	5% คาร์บอนแบล็ค
	15PVDF-EtOH	6% เอทานอล	-
	15PVDF-MeOH	6% เมทานอล	-
	15PVDF-EtOH-5CB	6% เอทานอล	5% คาร์บอนแบล็ค
	15PVDF-MeOH-5CB	6% เมทานอล	5% คาร์บอนแบล็ค
17.5%	17.5PVDF	-	-
	17.5PVDF-5CB	-	5% คาร์บอนแบล็ค
	17.5PVDF-EtOH	6% เอทานอล	-
	17.5PVDF-MeOH	6% เมทานอล	-
	17.5PVDF-EtOH-5CB	6% เอทานอล	5% คาร์บอนแบล็ค
	17.5PVDF-MeOH-5CB	6% เมทานอล	5% คาร์บอนแบล็ค
20%	20PVDF	-	-
	20PVDF-5CB	-	5% คาร์บอนแบล็ค
	20PVDF-EtOH	6% เอทานอล	-
	20PVDF-MeOH	6% เมทานอล	-
	20PVDF-EtOH-5CB	6% เอทานอล	5% คาร์บอนแบล็ค
	20PVDF-MeOH-5CB	6% เมทานอล	5% คาร์บอนแบล็ค

3.3 การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติ

3.3.1 ลักษณะสัณฐานวิทยา

โครงสร้างและสัณฐานวิทยาของเมมเบรนตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM, S-3400N, Hitachi) ทำการเตรียมตัวอย่างเป็นชิ้นนำไปหักในไนโตรเจนเหลวจากนั้นนำตัวอย่างไปเคลือบทอง (Au) ด้วยเครื่องพ่นไอออน (Ion sputter coater; Hitachi E-1010)

3.3.2 ขนาดรูพรุน และความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรน (Surface porosity)

ขนาดรูพรุนของเมมเบรน ถือเป็นหนึ่งปัจจัยสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของเมมเบรนคอนแทคเตอร์และความพรุนของเมมเบรน (พื้นผิวของเมมเบรน) ทำการหาขนาดรูพรุนและความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนได้จากการนำภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมาผ่านการประมวลผลและวิเคราะห์ภาพทางวิทยาศาสตร์ด้วยโปรแกรมอิมเมจเจ (Image j programming) โดยทำการวัดค่าขนาดรูพรุนแบบสุ่มวัด 3 ครั้ง จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการสุ่มวัดเพื่อรายงานผล (Standard deviation, SD)

3.3.3 ความพรุนของโครงสร้างเมมเบรน (Structure porosity)

ค่าความพรุนของเมมเบรนสามารถพิจารณาได้จากการแทนที่ช่องของเหลวในพื้นที่ผิวของเมมเบรน โดยการตัดเมมเบรนที่เตรียมขึ้นขนาด 3x1 เซนติเมตร ทำการบันทึกค่าน้ำหนักแห้งของตัวอย่างก่อนจะนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และทำการบันทึกค่าน้ำหนักเปียกของตัวอย่าง โดยค่าความพรุนของโครงสร้างเมมเบรนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 [10] ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{m_n/\rho_n}{m_n/\rho_n + m_p/\rho_p} \times 100\% \quad (9)$$

โดย	ε	คือค่าความพรุนของเมมเบรน
	m_p	คือมวลของเมมเบรนขณะแห้ง
	m_n	คือมวลของเมมเบรนที่ดูดซึมน้ำได้ (น้ำหนักเมมเบรนขณะเปียก - น้ำหนักเมมเบรนขณะแห้ง)
	ρ_p	คือความหนาแน่นของพอลิเมอร์ (1.78 g/cm ³)

ρ_n คือความหนาแน่นของน้ำ (1 g/cm³)

ในการทดลองนี้ ได้ทำการทดสอบค่าความพรุนในโครงสร้างของเมมเบรนซ้ำ 3 ครั้ง และรายงานค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้

3.3.4 ค่าความไม่ชอบน้ำ

การวัดค่าความไม่ชอบน้ำสามารถวัดค่าได้จากเครื่องวัดมุมสัมผัส (Water contact angle, PSL 250, DataPhysics) โดยทำการวัดแบบค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวของเมมเบรนแบบสุ่มวัด จำนวน 5 จุด และรายงานผลค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการสุ่มวัด (Standard deviation, SD)

3.3.5 ความเสถียรทางความร้อน

ตรวจสอบความเสถียรทางความร้อนของวัสดุด้วยกระบวนการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermalgravimetric analysis, DTG-60AH) ดำเนินการภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ความเร็ว 50 มิลลิลิตรต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 50 - 800 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.3.6 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ โดยใช้หลักการของการดูดกลืนรังสีฟูเรียร์ ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Nicolet 6700, Thermo Scientific, U.S.) ทำการวิเคราะห์ที่ช่วงเลขคลื่นที่ 4000-400 cm⁻¹ ที่อุณหภูมิห้อง

3.4 การวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

วัดประสิทธิภาพของเมมเบรนในกระบวนการ MGA ด้วยชุดอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้โมโนเอทานอลามีน (MEA) เป็นสารดูดซับแก๊ส โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ความดันบรรยากาศ เมมเบรนมอดูลประกอบด้วยช่องทางไหลของของไหลที่มีเมมเบรนกั้นอยู่ตรงกลาง ซึ่งจะป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนที่มีอัตราส่วน 20:80 เข้าเมมเบรนมอดูลที่ช่องทางไหลของแก๊สด้วยอัตราการป้อน 320 มิลลิลิตรต่อนาที และจะป้อนสารดูดซับเข้าด้านของเหลวของมอดูลผ่านที่อัตรา 157±5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยจะป้อนแบบสวนทางกัน (Counter-current) จากนั้นทำการวัดองค์ประกอบของแก๊สในสายขาออกโดยใช้วิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) เพื่อเทียบกับแก๊สขาเข้า โดยเวลาในการดำเนินการ 30 นาที

ค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ absorption flux) [39] สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$J_{CO_2} = \frac{(Q_{Gin} - Q_{Gout}) \times RT}{A_m} \quad (9)$$

โดย J_{CO_2} คือค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (mmol/m²s)

Q_{Gin} คืออัตราการไหลของแก๊สขาเข้า (mL/min)

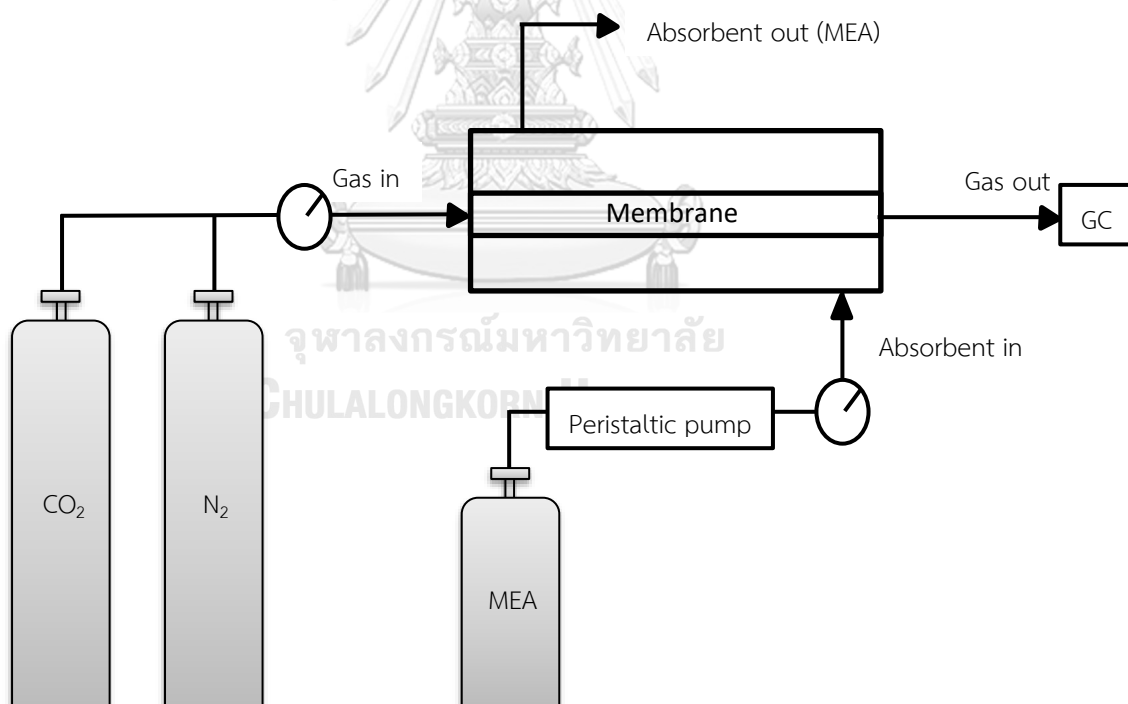
Q_{Gout} คืออัตราการไหลของแก๊สขาออก (mL/min)

R คือค่าคงที่ของแก๊ส (0.08314 L·bar/K·mol)

T คืออุณหภูมิ (K)

A_m คือพื้นที่สัมผัสของเมมเบรน (m²)

ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งเพื่อรายงานค่าเฉลี่ยและค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้



รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ MGA

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชัน (Membrane gas absorption, MGA) ที่มีเมมเบรนเป็นตัวกั้นระหว่างวัฏภาคของแก๊สและวัฏภาคของของเหลว เพื่อลดความต้านทานของเมมเบรนให้น้อยที่สุดต้องใช้เมมเบรนที่มีรูพรุนมากและขนาดรูพรุนที่เล็กเพื่อลดการเปื่อยของเมมเบรนเมื่อสัมผัสกับสารดูดซึมจะทำให้สามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทดลองนำสาร 2 ประเภท คือ แอลกอฮอล์ (เมทานอลและเอทานอล) และคาร์บอนแบล็ค มาใช้เป็นสารเติมแต่งให้แก่พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride; PVDF) เพื่อปรับพื้นฐานวิทยาและคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนให้เหมาะกับการใช้งานในระบบ MGA โดยเน้นไปที่การปรับค่าพารามิเตอร์ในการขึ้นรูปเมมเบรนด้วยวิธีการเปลี่ยนวัฏภาค เนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยตามปัจจัยที่ศึกษา คือ ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ ผลของการเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล/เมทานอล/คาร์บอนแบล็ค) และผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)

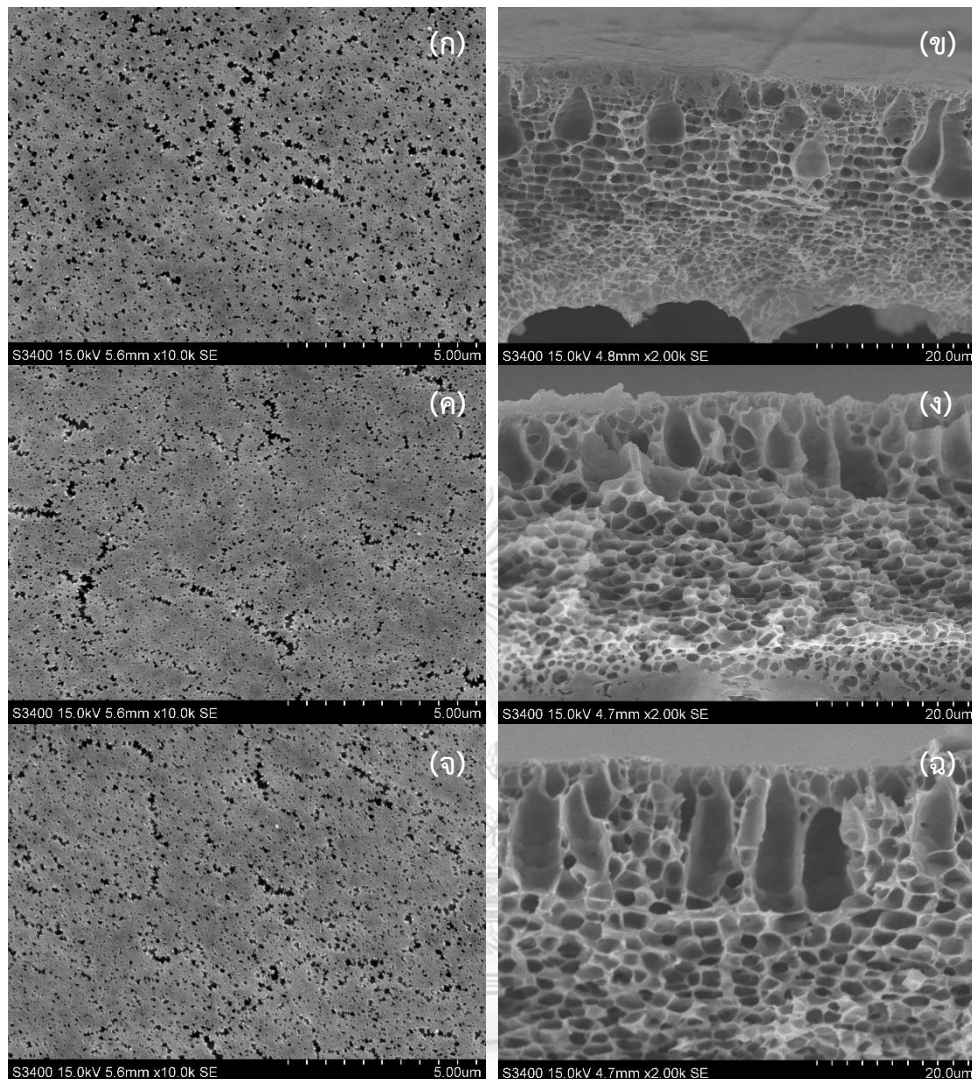
4.1 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์

4.1.1 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาและขนาดของรูพรุน

รูปที่ 4 แสดงเมมเบรนที่ถูกเตรียมขึ้นจากสารละลาย PVDF ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน (15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เมมเบรนที่ถูกเตรียมขึ้นมีโครงสร้างรูพรุนแบบฟองน้ำและมีโพรงรูพรุนขนาดใหญ่ (macrovoids) เป็นบางส่วน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์จาก 15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าโครงสร้างจากภาพตัดขวาง (แสดงในรูปที่ 4 (ก - ฉ)) และความพรุนในโครงสร้างของเมมเบรนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน (ตารางที่ 7) อย่างไรก็ตามขนาดของรูพรุนและค่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของพอลิเมอร์

ตารางที่ 7 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์

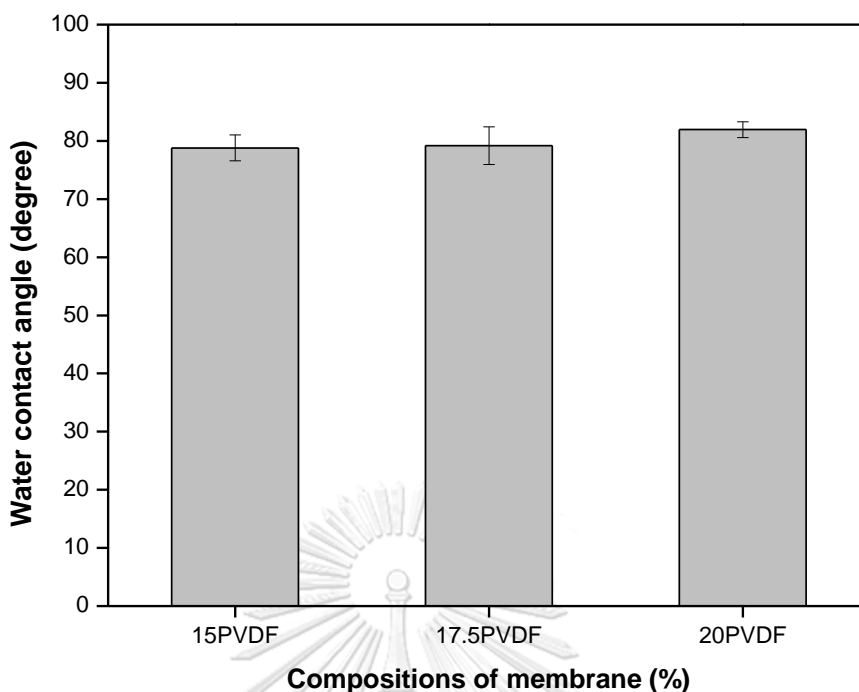
ความเข้มข้นของพอลิเมอร์	ขนาดของรูพรุน (นาโนเมตร)	ความพรุนบนพื้นผิวเมมเบรน (%)	ความพรุนของเมมเบรน (%)
15%	206.60	23.85	53.42
17.5%	199.56	22.81	53.21
20%	194.27	20.57	53.01



รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างและสัญญาณวิทยาของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของ PVDF แตกต่างกัน 15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก-ข) 15%โดยน้ำหนัก (ค-ง) 17.5%โดยน้ำหนัก (จ-ฉ) 20%โดยน้ำหนัก

4.1.2 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ต่อค่าความไม่ชอบน้ำ

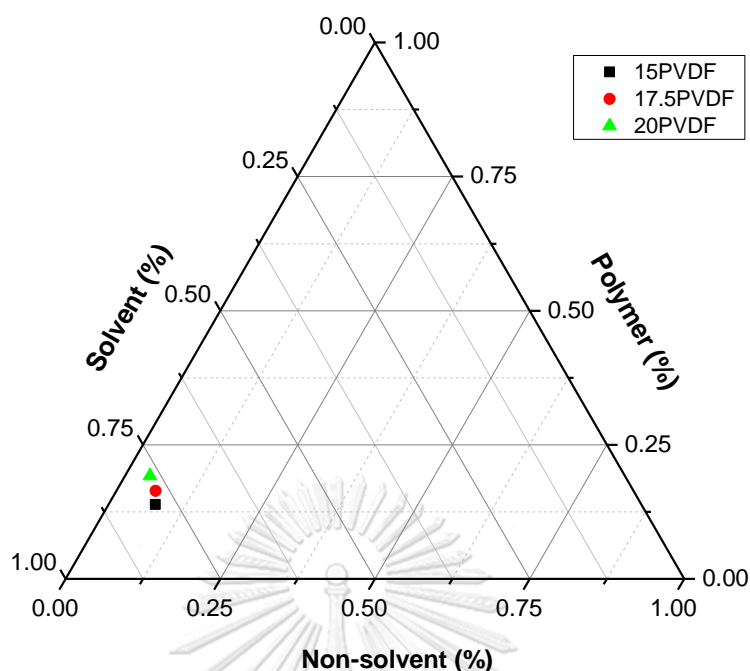
ค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนหาได้จากเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวของเมมเบรน แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นการแสดงเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) จากการวัดมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวของเมมเบรนแบบสุ่มจำนวน 5 จุดจากภาพแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ไม่ส่งผลต่อค่ามุมสัมผัสและค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนอย่างมีนัยสำคัญ โดยมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวของเมมเบรนค่าที่เตรียมได้มีค่าอยู่ระหว่าง 78–82 องศา



รูปที่ 5 แสดงค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยมีความเข้มข้นระหว่าง 15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.1.3 แผนภาพวิภูภาคที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิด

รูปที่ 6 แสดงการพัฒนา isothermal ternary phase diagram แสดงโดยจุด cloud point ที่ศึกษาสารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลิดีนแตกต่างกัน ซึ่งพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ลดลงจาก 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทำให้ค่าของจุด cloud point มีแนวโน้มจะเคลื่อนออกเรื่อยๆ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าจะต้องใช้น้ำปริมาณที่มากขึ้น (non-solvent : ตัวไม่ละลาย) เพื่อปรับสมดุลของระบบและทำให้เกิดการตกตะกอนของสารละลายพอลิเมอร์ การลดลงของความเข้มข้นของพอลิไวนิลิดีนช่วยลดความไม่แน่นอนทางอุณหพลศาสตร์ของสารละลายพอลิเมอร์เนื่องจากการลดลงของความเข้มข้นของพอลิไวนิลิดีนอาจส่งผลให้เกิดสภาวะการแยกวิภูภาคที่ช้าลง [40]



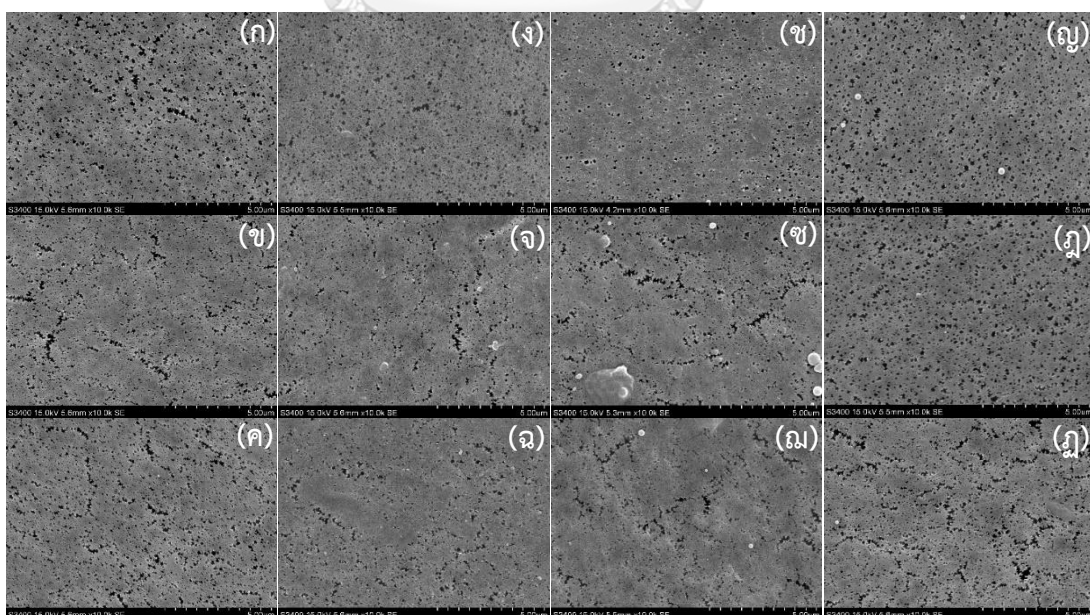
รูปที่ 6 แสดงแผนภาพสามเหลี่ยมที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิดของสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันโดยมีความเข้มข้นระหว่าง 15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.2 ผลของการเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล/เมทานอล/คาร์บอนแบล็ค)

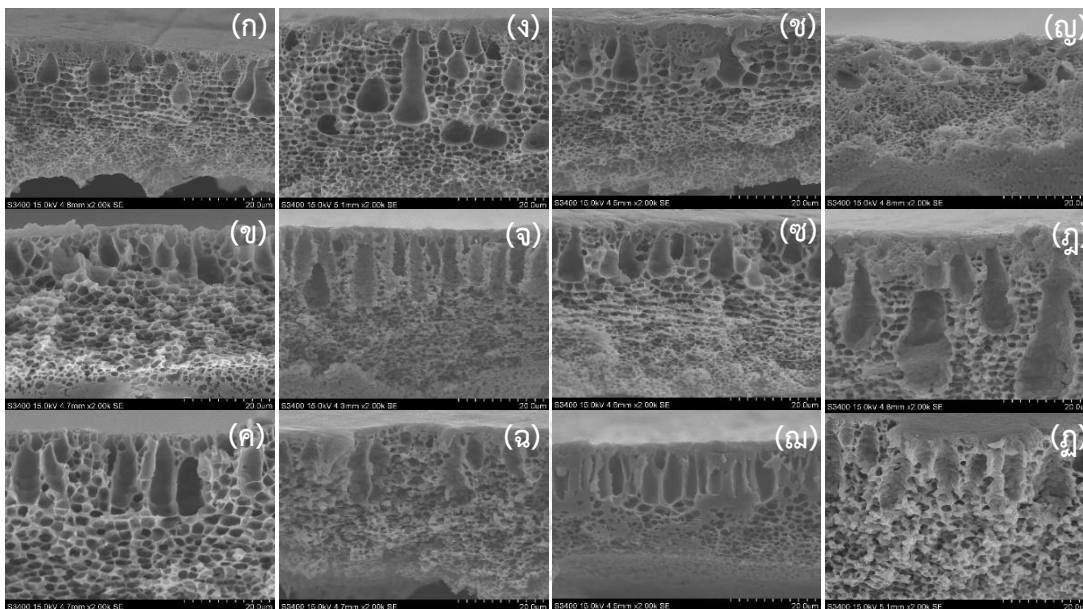
4.2.1 ผลของการเติมสารเติมแต่งต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาและขนาดของรูพรุน

เมื่อเติมสารเติมแต่งลงในสารละลาย PVDF จากรูปที่ 7 และ 8 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของ PVDF ใดๆ เมื่อเติมเมทานอลและเอทานอลโครงสร้างสัณฐานวิทยาและความพรุนบนพื้นผิวเมมเบรนพบว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่เมื่อมีการเติมคาร์บอนแบล็คความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนมีค่าเพิ่มขึ้น และมีโครงสร้างจากภาพตัดขวางที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะกรณีที่มีการเติมคาร์บอนแบล็คในสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นของ PVDF 17.5 และ 20% จะสามารถสังเกตโครงสร้างรูพรุนในภาคตัดขวางที่มีลักษณะเป็นก้อนกลม (nodular structure) เด่นชัดขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของก้อนกลมมีความหนาแน่นมากจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของพอลิเมอร์ [41] จากนั้นเมื่อทดลองเติมสารเติมแต่งแบบผสมระหว่างเอทานอลกับคาร์บอนแบล็คและเมทานอลกับคาร์บอนแบล็ค จากภาพพื้นผิวของเมมเบรนและภาคตัดขวางของเมมเบรนในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 พบว่าจากการเติมเมทานอลกับคาร์บอนแบล็คให้ผลที่ดีกว่าการเติมเอทานอลกับคาร์บอนแบล็คเนื่องจากทำให้มีค่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนเล็กลงเมื่อเทียบกับเอทานอล

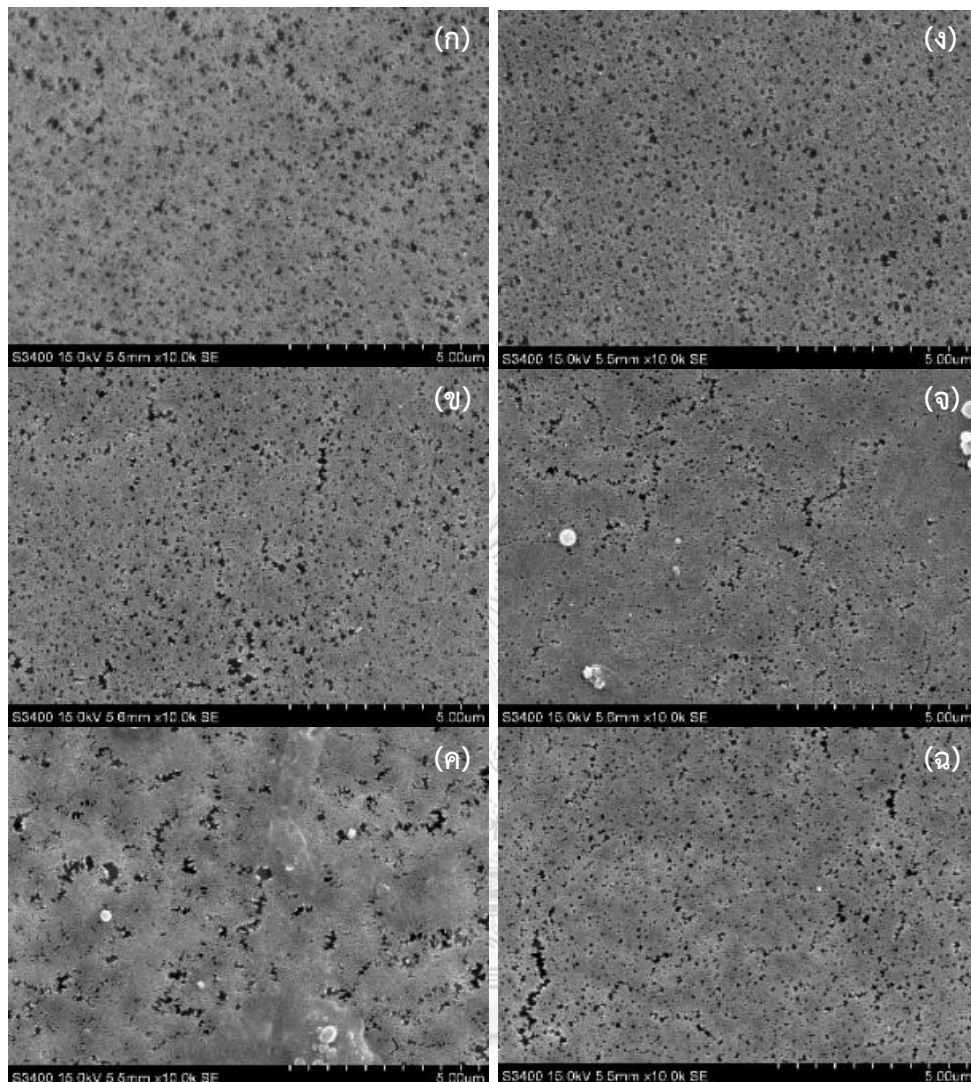
กับคาร์บอนแบล็คที่ทำให้ขนาดรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 11 จากงานวิจัยของ Mansourizadeh ศึกษาว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งเอทานอลสามารถช่วยลดค่าความเข้ากันได้ระหว่างตัวละลายและตัวไม่ละลาย (น้ำ) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ส่งผลให้การแพร่ระหว่างตัวทำละลายกับน้ำช้าลงดังนั้นเมมเบรนจะมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น [15] โดยการแพร่ระหว่างตัวทำละลายและน้ำนั้นจะส่งผลต่อการเพิ่มรูพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนและมีความสัมพันธ์กับขนาดรูพรุนของเมมเบรน โดยจากงานวิจัยของ Mingrui He และคณะพบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนและความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อขนาดของรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดใหญ่จะทำให้มีรูพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนที่มากขึ้น [42] ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนของเมมเบรนและความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนที่ชัดเจน โดยพบว่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนนอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของเมมเบรนยังขึ้นอยู่กับจำนวนของรูพรุนของเมมเบรนที่ปรากฏ อาทิเช่น แม้ขนาดรูพรุนของเมมเบรนจะมีขนาดเล็กแต่หากมีจำนวนมากอาจส่งผลให้มีค่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนสูงกว่ารูพรุนขนาดใหญ่แต่มีจำนวนน้อย ซึ่งผลการเติมเอทานอลกับคาร์บอนแบล็คทำให้ค่าความเป็นรูพรุนบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนน้อยลงและกลับกันเมื่อเติมเมทานอลกับคาร์บอนทำให้ค่าความเป็นรูพรุนบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนมากขึ้นและเมื่อเติมคาร์บอนแบล็คทำให้ค่าความพรุนของเมมเบรนมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 12 และรูปที่ 13



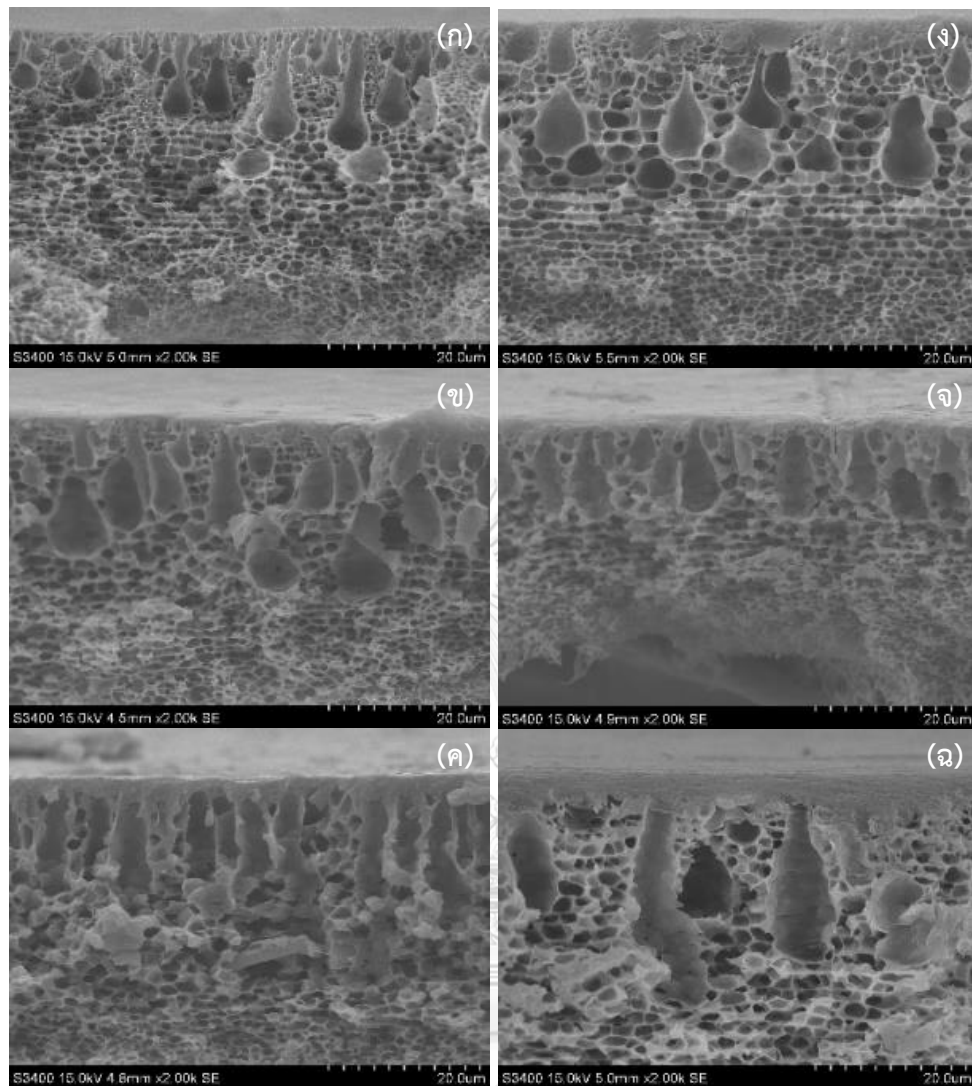
รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างและสัญญาณวิทยาบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์แตกต่างกัน 15, 17.5, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับและเติมสารเติมแต่ง (ก-ค) ไม่เติมสารเติมแต่ง (ง-ฉ) เอทานอล (ช-ฉ) เมทานอล (ญ-ฎ) คาร์บอนแบล็ค



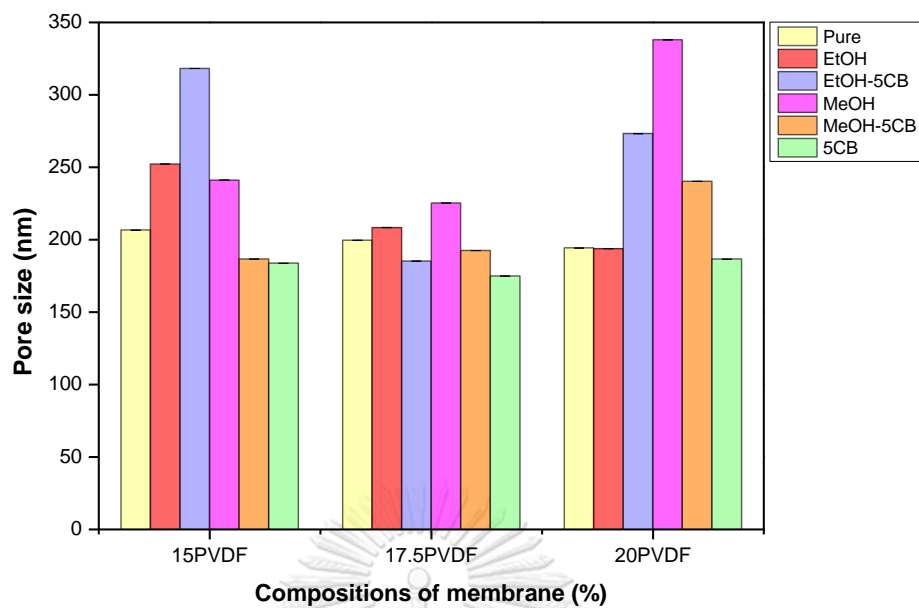
รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างและสัญญาณวิทยาบริเวณภาพตัดขวางของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์แตกต่างกัน 15, 17.5, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับและเติมสารเติมแต่ง (ก-ค) ไม่เติมสารเติมแต่ง (ง-ฉ) เอทานอล (ช-ฉ) เมทานอล (ญ-ฎ) คาร์บอนแบล็ค



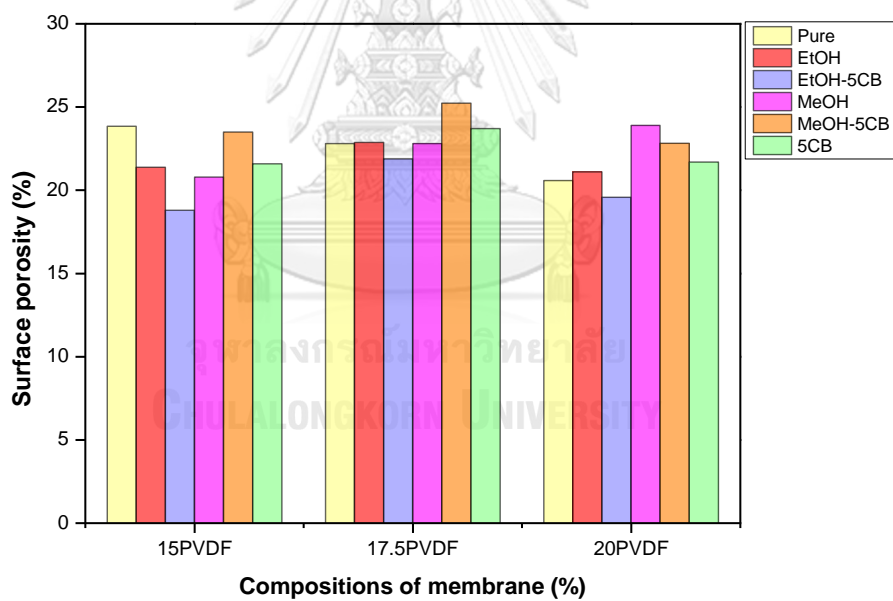
รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างและสัญญาณวิทยาบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์แตกต่างกัน 15, 17.5, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับและเติมสารเติมแต่งระหว่างเอทานอลและเมทานอลผสมกับคาร์บอนแบล็ค (ก-ค) เอทานอลผสมคาร์บอนแบล็ค (ง-จ) เมทานอลผสมคาร์บอนแบล็ค



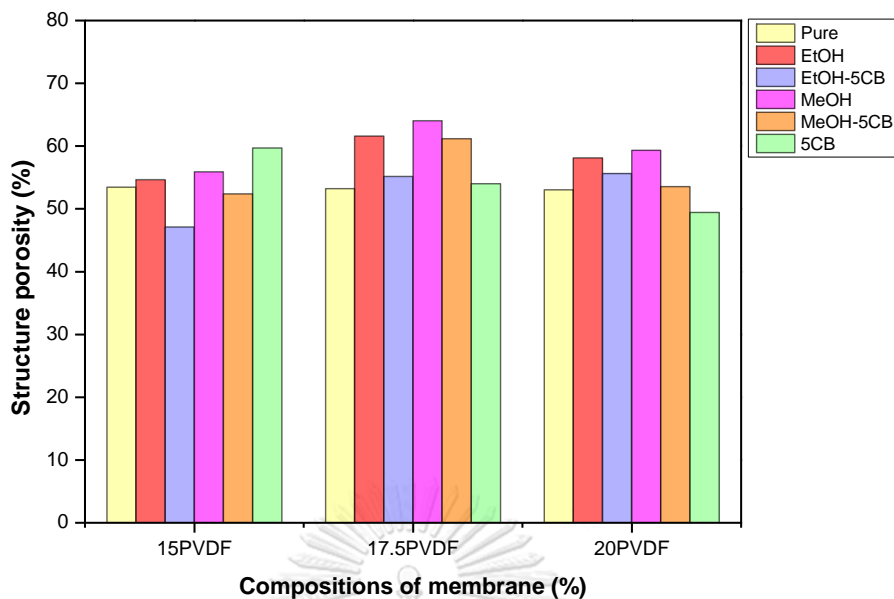
รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างและสัญญาณวิทยาบริเวณภาพตัดขวางของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์แตกต่างกัน 15, 17.5, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับและเติมสารเติมแต่งระหว่างเอทานอลและเมทานอลผสมกับคาร์บอนแบล็ค (ก-ค) เอทานอลผสมคาร์บอนแบล็ค (ง-ฉ) เมทานอลผสมคาร์บอนแบล็ค



รูปที่ 11 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนของเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล, เมทานอล และ คาร์บอนแบล็ค



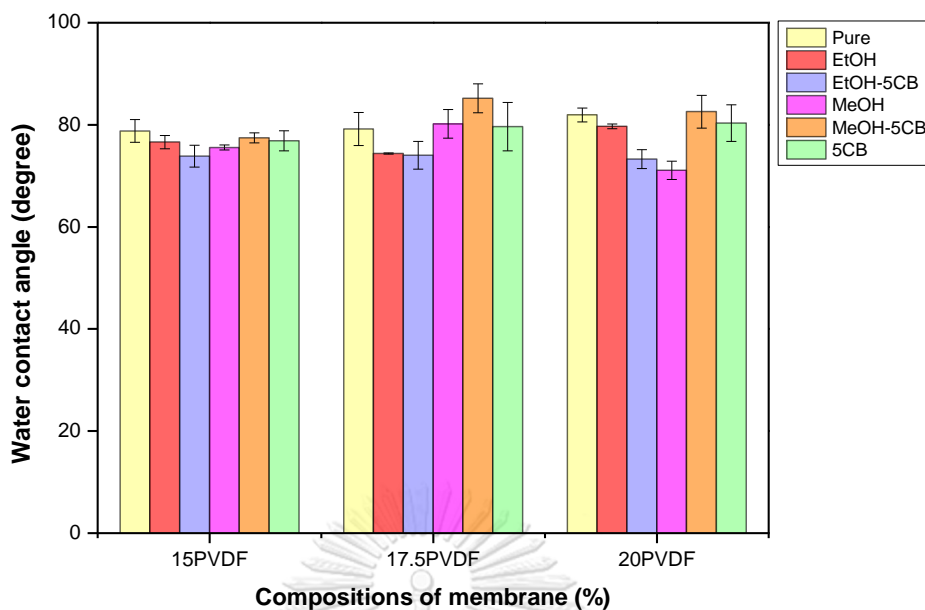
รูปที่ 12 แสดงค่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล, เมทานอล และ คาร์บอนแบล็ค



รูปที่ 13 แสดงค่าความพรุนของโครงสร้างเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล, เมทานอล และ คาร์บอนแบล็ค)

4.2.2 ผลของการเติมสารเติมแต่งต่อค่าความไม่ชอบน้ำ

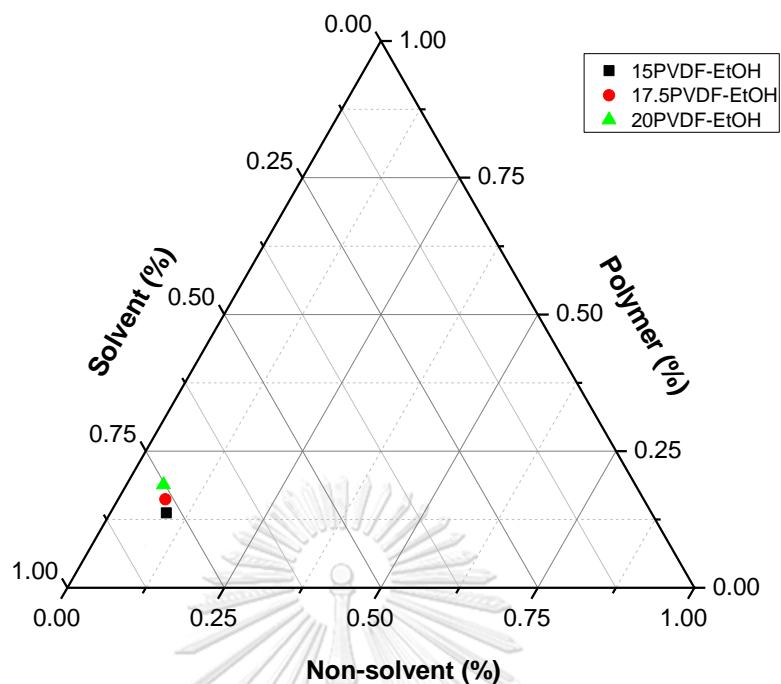
ค่าความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนที่เติมสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน (เอทานอล, เมทานอลและ คาร์บอนแบล็ค) เมื่อเติมสารเติมแต่งเอทานอลและเมทานอลลงในสารละลายพอลิเมอร์ทำให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลงจาก 79 องศา เหลือประมาณ 73 ถึง 75 องศา เนื่องจากปริมาณรูพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนและขนาดรูพรุนของเมมเบรนเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเติมสารเติมแต่งเอทานอลกับคาร์บอนแบล็คในสารละลายพอลิเมอร์ไม่สามารถเพิ่มค่ามุมสัมผัสของน้ำได้แต่เมื่อเติม เมทานอลกับคาร์บอนแบล็คลงในสารละลายพอลิเมอร์สามารถเพิ่มค่าความไม่ชอบน้ำได้ซึ่งค่ามุมสัมผัสที่มากที่สุดอยู่ที่ 85 องศา เพิ่มจาก 80 องศา



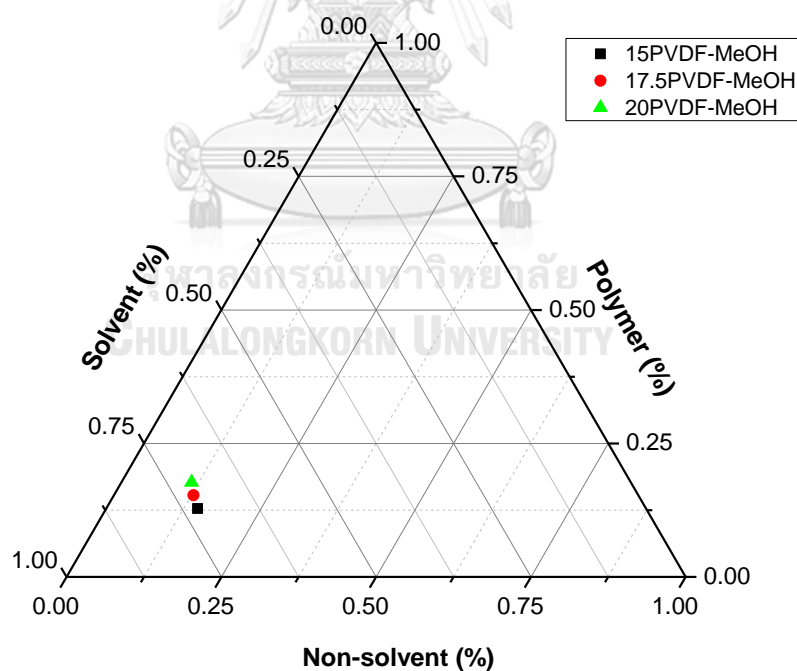
รูปที่ 14 แสดงค่ามุมสัมผัสของความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนที่เติมสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน

4.2.3 แผนภาพวัฏภาคที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิด

เมื่อเติมเอทานอลและเมทานอลเพื่อרבกวนสมดุลของระบบพบว่าจุด cloud point มีการเคลื่อนที่ไปทางขวามือแสดงให้เห็นว่าจะต้องใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้นเพื่อרבกวนสมดุลของระบบดังกล่าวและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติมเอทานอลและเมทานอลลงในสารละลายพอลิเมอร์พบว่าเมื่อเติมเมทานอลจะทำให้ต้องใช้น้ำในปริมาณที่มากกว่าการเติมเอทานอลในการרבกวนสมดุลของระบบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. L. Yeow [43] ที่มีการเติมเอทานอลลงในสารละลายพอลิเมอร์และทำการרבกวนสมดุลโดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียสและ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการศึกษพบว่าที่อุณหภูมิสูงจะใช้น้ำปริมาณที่มากกว่าในการרבกวนระบบสมดุล ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าสภาวะการเปลี่ยนวัฏภาคของเมมเบรนในถังตกตะกอนของเมทานอลจะช้ากว่าเอทานอลซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนวัฏภาคที่ช้าลงจะทำให้เมมเบรนมีรูพรุนขนาดเล็กลงด้วย [15, 40]



รูปที่ 15 แสดงแผนภาพวัฏภาคที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิดของสารละลายพอลิไวนิลิดีนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันเมื่อเติมเอทานอล



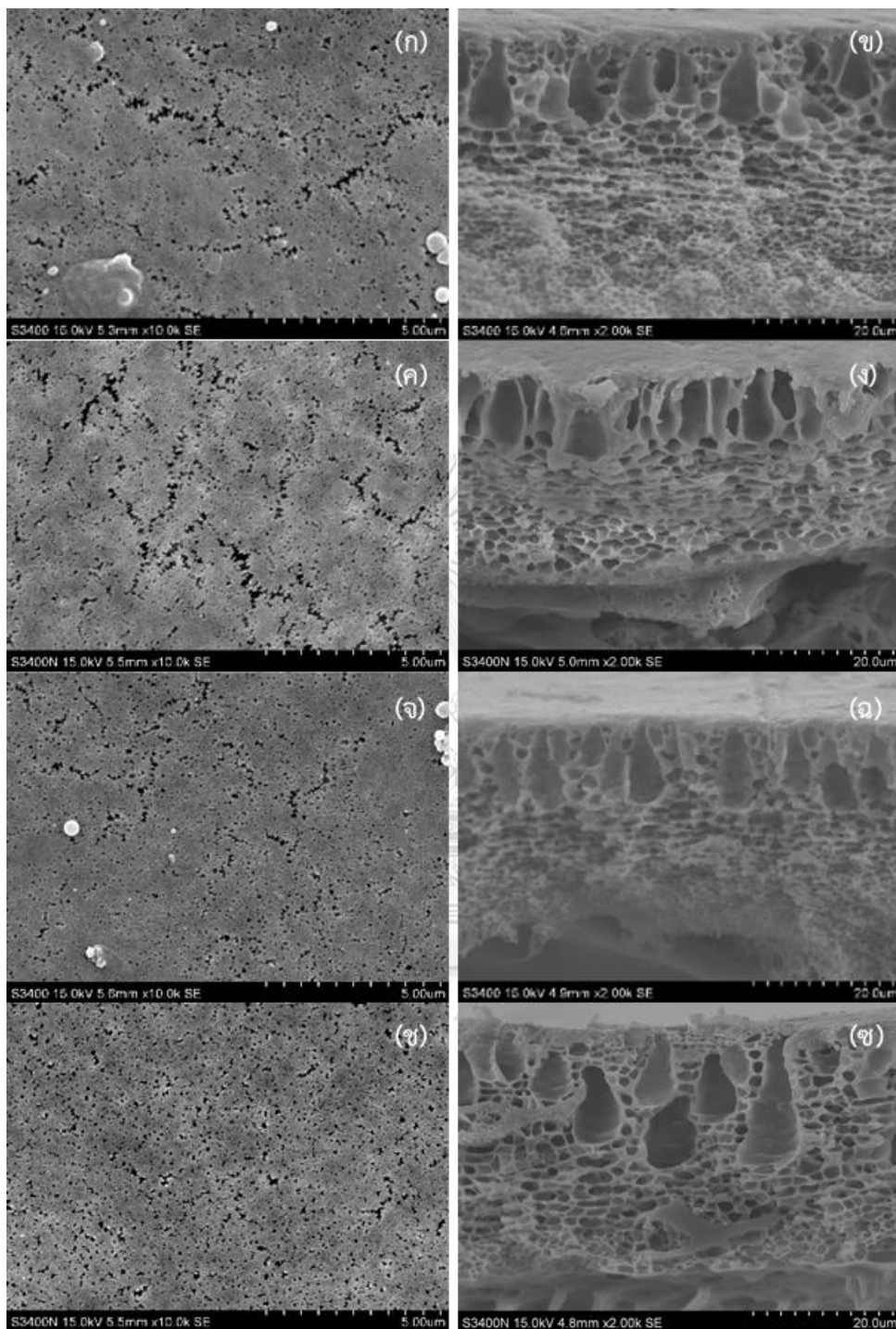
รูปที่ 16 แสดงแผนภาพวัฏภาคที่มีองค์ประกอบ 3 ชนิดของสารละลายพอลิไวนิลิดีนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันเมื่อเติมเมทานอล

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)

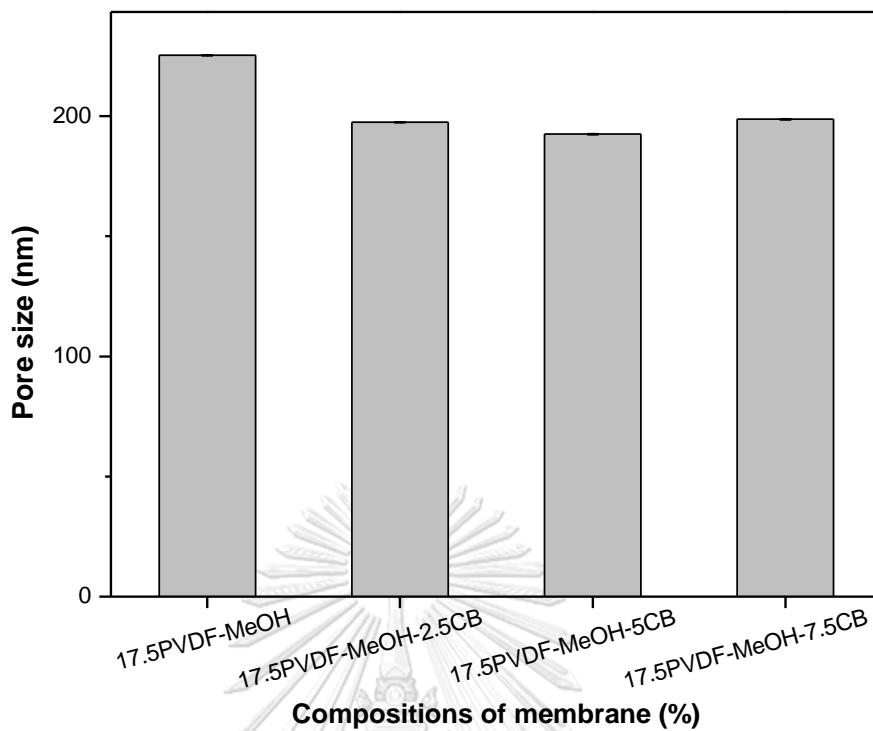
จากผลการทดสอบคุณสมบัติของเมมเบรนได้ทำการเลือกเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่งเมทานอลลงในพอลิเมอร์มาเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค) ลงในสารละลายโพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (0, 2.5, 5, 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เนื่องจากเมทานอลจะช่วยให้เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคที่ช้าลงในถังตกตะกอนและความเข้มข้นของพอลิเมอร์ 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้ค่าขนาดรูพรุนที่มีขนาดเล็กและค่าความเป็นรูพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนสูง และยังมีค่าความไม่ชอบน้ำที่สูงอีกด้วย

4.3.1 ผลของความเข้มข้นของคาร์บอนแบล็คต่อโครงสร้างพื้นฐานวิทยาและขนาดของรูพรุน

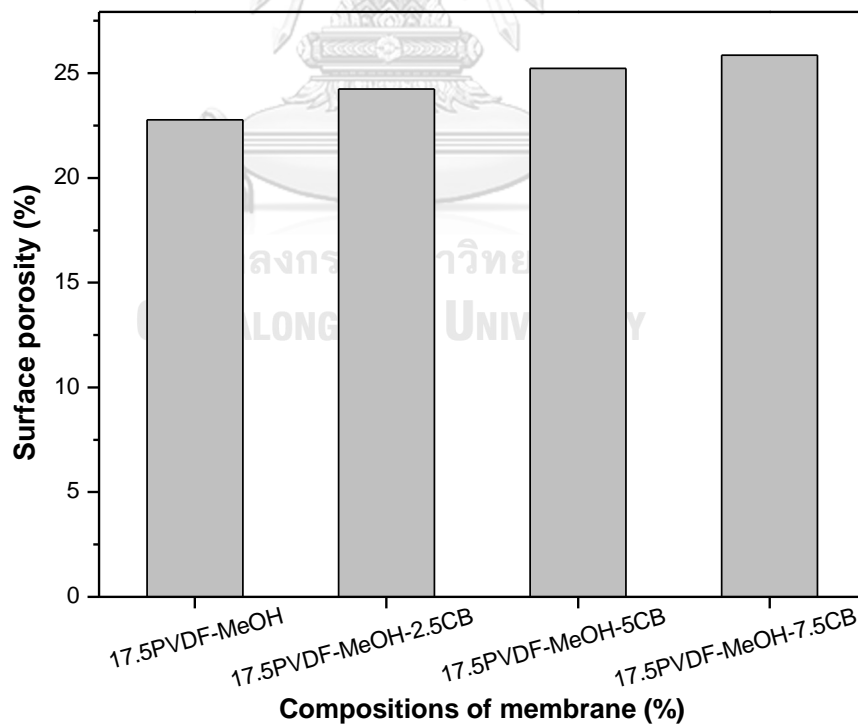
จากรูปที่ 17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของความเข้มข้นของคาร์บอนแบล็คลงในสารละลายพอลิเมอร์ทำให้สังเกตเห็นรูพรุนของเมมเบรนมากขึ้นและเห็นได้ชัดเจนเมื่อเติมปริมาณคาร์บอนแบล็คที่ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อเติมเมทานอลเพียงอย่างเดียวทำให้ขนาดของรูพรุนเพิ่มมากขึ้นแต่เมื่อเติมคาร์บอนแบล็คทำให้รูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 18 โดยเมื่อเติมคาร์บอนแบล็คลงในสารละลายพอลิเมอร์ PVDF จะทำให้สารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้เกิดการแพร่ระหว่างตัวทำละลายและตัวไม่ละลายช้าลงและเกิดรูพรุนขนาดเล็กลงแต่เมื่อเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็คในปริมาณมากจะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของสารเติมแต่งได้ [44] และผลของการเติมคาร์บอนแบล็คช่วยให้เมมเบรนมีค่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนมากขึ้นและค่าความพรุนของโครงสร้างรูพรุนมีการเพิ่มขึ้นแบบไม่มีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 19 และ 20 ตามลำดับ



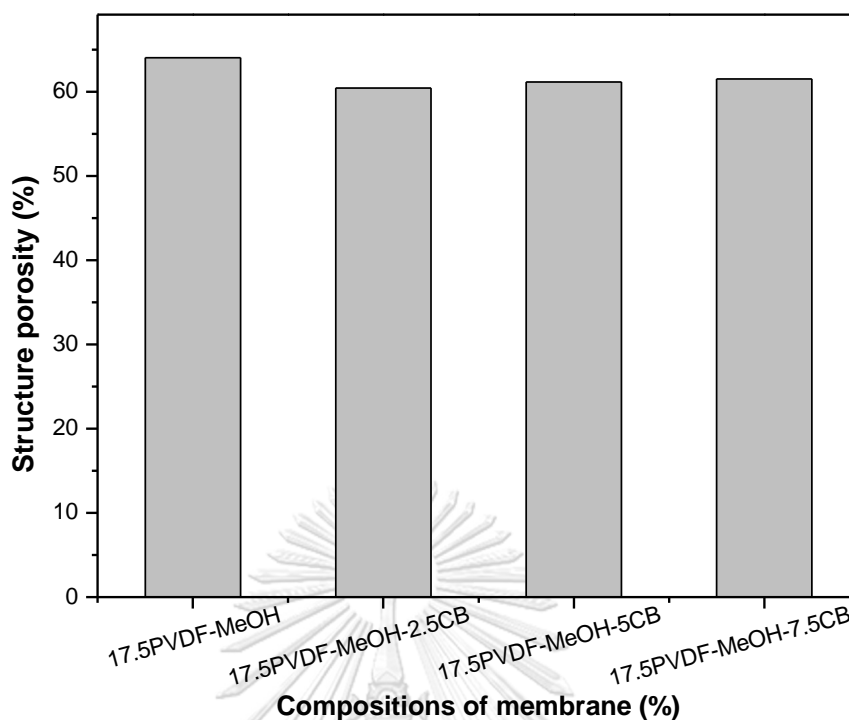
รูปที่ 17 แสดงโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของเมมเบรนที่ความเข้มข้นของพอลิไวโนลิดีนฟลูออไรด์ 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสารเติมแต่งเมทานอล และเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็คที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (ก-ข) 17.5%โดยน้ำหนัก (ค-ง) 17.5%โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็ค 2.5% (จ-ฉ) 17.5%โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็ค 5% (ช-ซ) 17.5%โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็ค 7.5%



รูปที่ 18 แสดงค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนของเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)



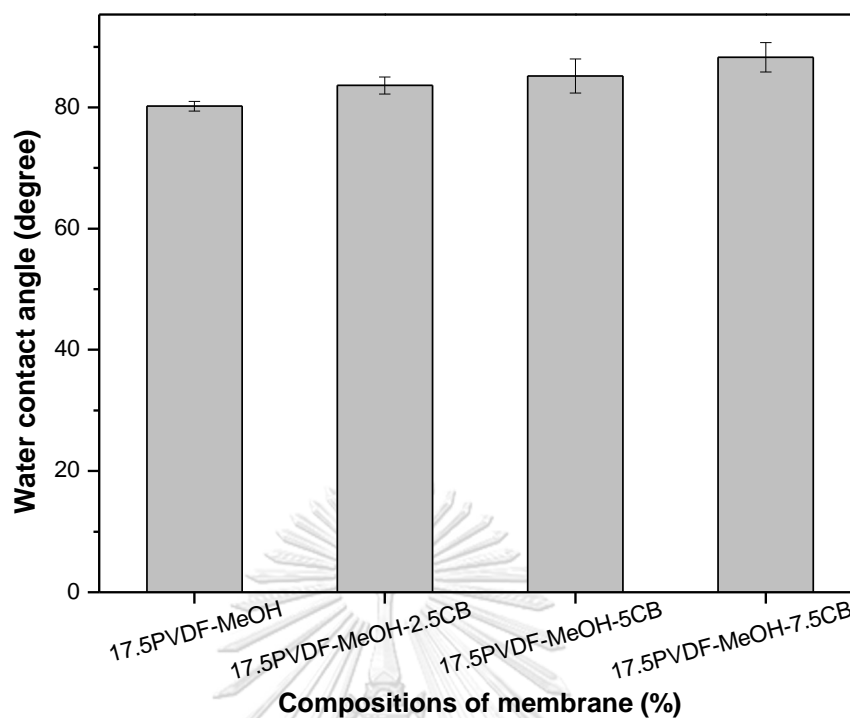
รูปที่ 19 แสดงค่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)



รูปที่ 20 แสดงค่าความพรุนของโครงสร้างเมมเบรนเมื่อเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)

4.3.2 ผลของความเข้มข้นคาร์บอนแบล็คต่อค่าความไม่ชอบน้ำ

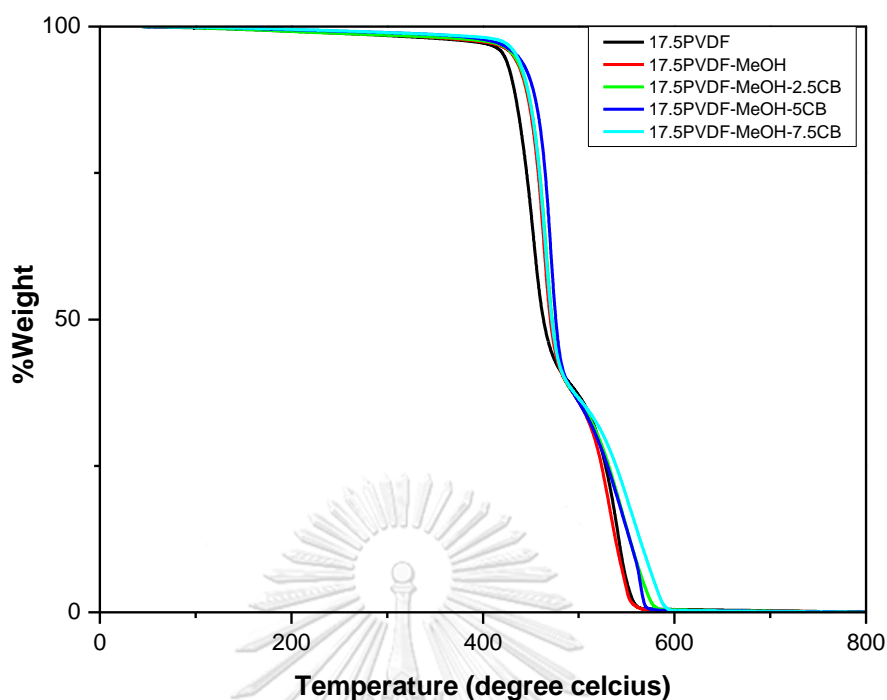
จากการเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็คที่อัตราส่วนที่แตกต่างกันสังเกตได้ว่าการเพิ่มปริมาณของคาร์บอนแบล็คสามารถช่วยให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเมมเบรนที่ไม่มีการเติมคาร์บอนแบล็ค ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวเมมเบรนเพิ่มขึ้นจาก 79.18 ดีกรีเป็น 83.61, 85.19, และ 88.26 ดีกรีเมื่อเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็คที่ 2.5, 5, และ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยอื่น ซึ่งทดลองเติมคาร์บอนแบล็คในพอลิบิวตะไดอีน (Polybutadiene) ในสัดส่วนการเติมต่างๆ คือ กรณีไม่เติมคาร์บอนแบล็ค, สัดส่วนคาร์บอนแบล็ค:พอลิบิวตะไดอีนมีค่า 1:20, 1:10 และ 1:1 ซึ่งผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็คทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าสูงถึง 171 องศาจากเดิมพอลิบิวตะไดอีนมีค่ามุมสัมผัสอยู่ที่ 85 องศา เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนแบล็คที่เคลือบ PB จะทำให้คาร์บอนแบล็คเกิดการรวมตัวกันเป็นชั้น (Hierarchical structure) โดยจะแบ่งเป็น 2 ชั้น (ไมโครขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตรและนาโนสเกลขนาดประมาณ 50-200 นาโนเมตร) ซึ่งการจัดเรียงตัวแบบดังกล่าวจะทำให้ค่าความไม่ชอบน้ำเพิ่มสูงมากขึ้น [45]



รูปที่ 21 แสดงค่ามุมสัมผัสของความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนที่เติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)

4.3.3 ค่าเสถียรทางความร้อนของวัสดุ

เพื่อศึกษาผลกระทบของสารเติมแต่งที่เติมลงในเมมเบรนต่อความเสถียรทางความร้อนด้วยกระบวนการวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA) โดยเตรียมตัวอย่างปริมาณ 10 มิลลิกรัม ดำเนินการภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ความเร็ว 50 มิลลิตรต่อนาทีและความเร็วของความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีระหว่างอุณหภูมิ 50-800 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่ากระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์เกิดขึ้นสองขั้นตอน [46] กระบวนการแรกจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 400-510 องศาเซลเซียสซึ่งเริ่มมีมวลสูญหายที่อุณหภูมิ 431.69 องศาเซลเซียสและกระบวนการที่สองจะเกิดที่อุณหภูมิระหว่าง 510-700 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นการสลายพันธะของคาร์บอนไฮโดรเจน (C-H) และพันธะของไฮโดรเจนฟลูออรีน (H-F) [47, 48] และเมื่อมีการเติมเมทานอลและคาร์บอนแบล็คลงในสารละลายพอลิเมอร์ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 457.34 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 22

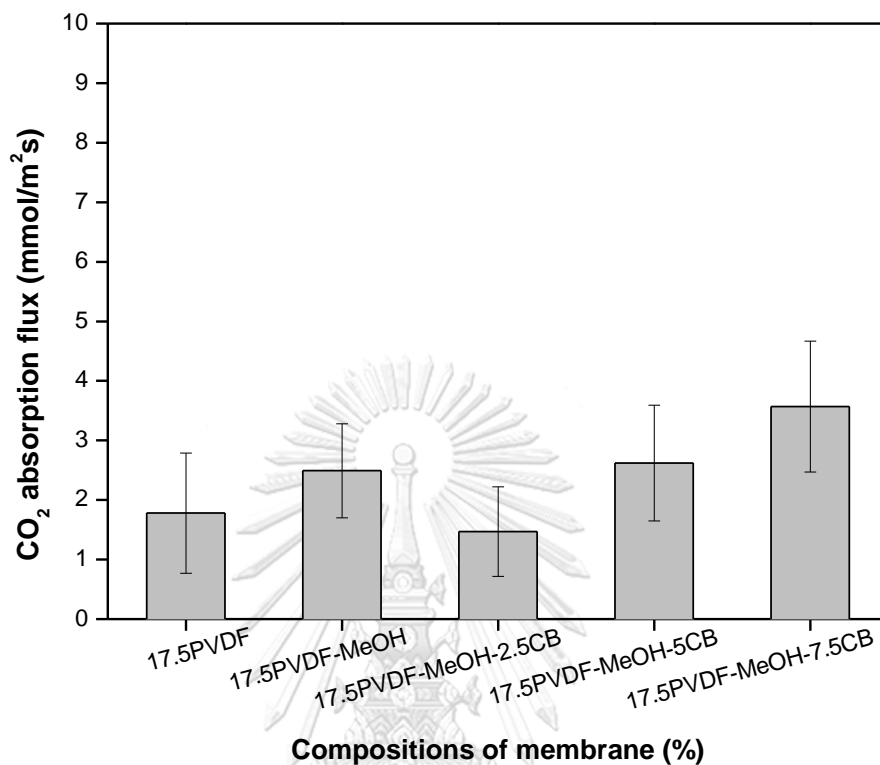


รูปที่ 22 แสดงค่าความต้านทานความร้อนของเบรน

4.2 การวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การวัดประสิทธิภาพของเมมเบรนในกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอสอรัปชันโดยใช้โมโนเอทานอลามีน (MEA) เป็นสารดูดซับแก๊ส ทดลองที่อุณหภูมิและความดันเท่ากับสภาวะแวดล้อมและทำการวิเคราะห์ค่าฟลักซ์ของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 absorption flux) ที่ได้จากการวัดองค์ประกอบของแก๊สขาออกโดยใช้วิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (GC) เพื่อเทียบกับแก๊สขาเข้า หลังจากการดำเนินการ 30 นาที โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากรูปที่ 23 แสดงค่าฟลักซ์ของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนแบล็คส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากผลการทดลองที่ได้จากการเติมสารเติมแต่งเมทานอลทำให้เมมเบรนมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นซึ่งเมื่อเมมเบรนขนาดรูพรุนที่ใหญ่จะมีพื้นที่สัมผัสให้แก๊สผ่านรูพรุนได้มากจึงทำให้ค่าฟลักซ์ของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากตามไปด้วย และการเติมสารเติมแต่งเมทานอลกับคาร์บอนแบล็คในปริมาณที่แตกต่างกันทำให้มีขนาดรูพรุนที่เล็กลงแต่มีความพรุนบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนที่มากกว่า PVDF 17.5 ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งจึงทำให้มี

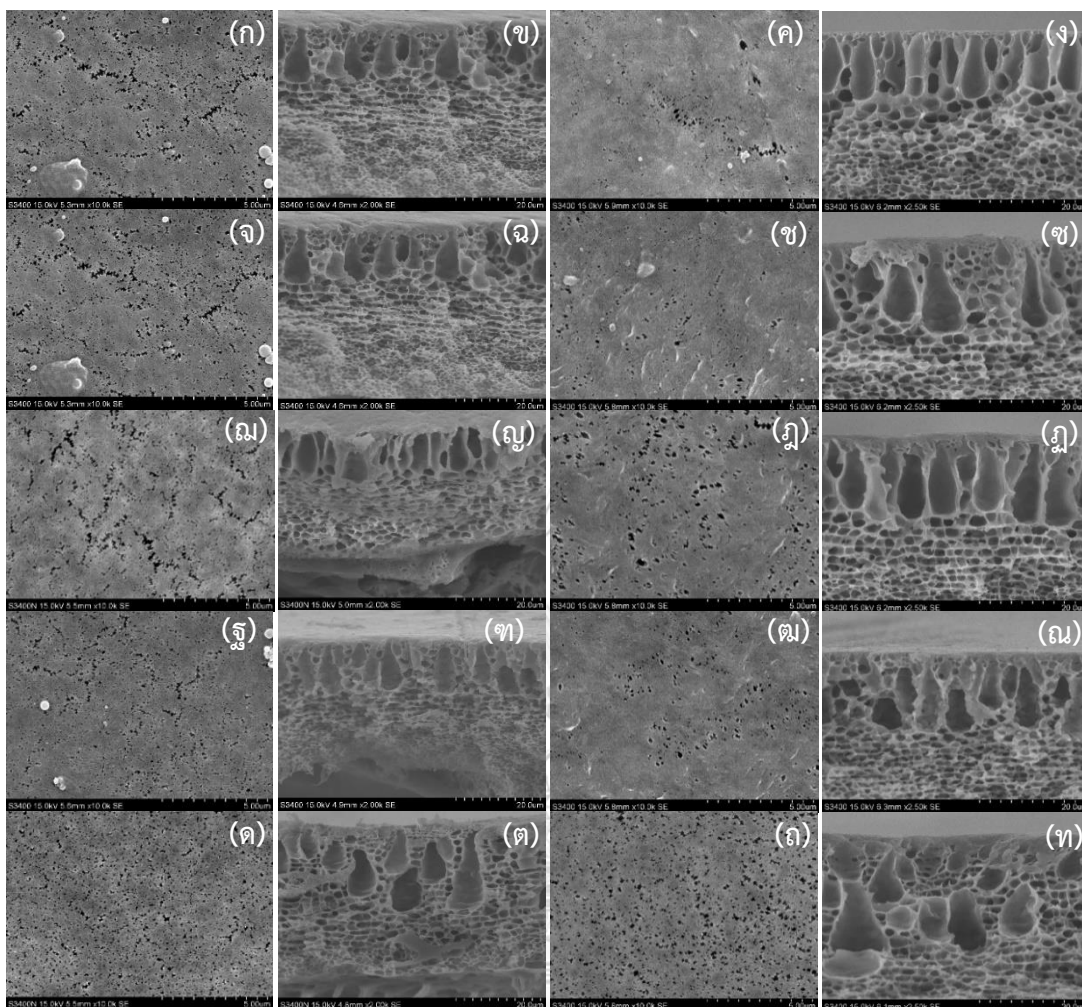
ค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากขึ้นเมื่อเติมที่ความเข้มข้น 5 และ 7.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก



รูปที่ 23 แสดงค่าฟลักซ์ของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ absorption flux)

4.2.1 คุณสมบัติของเมมเบรนหลังใช้งาน

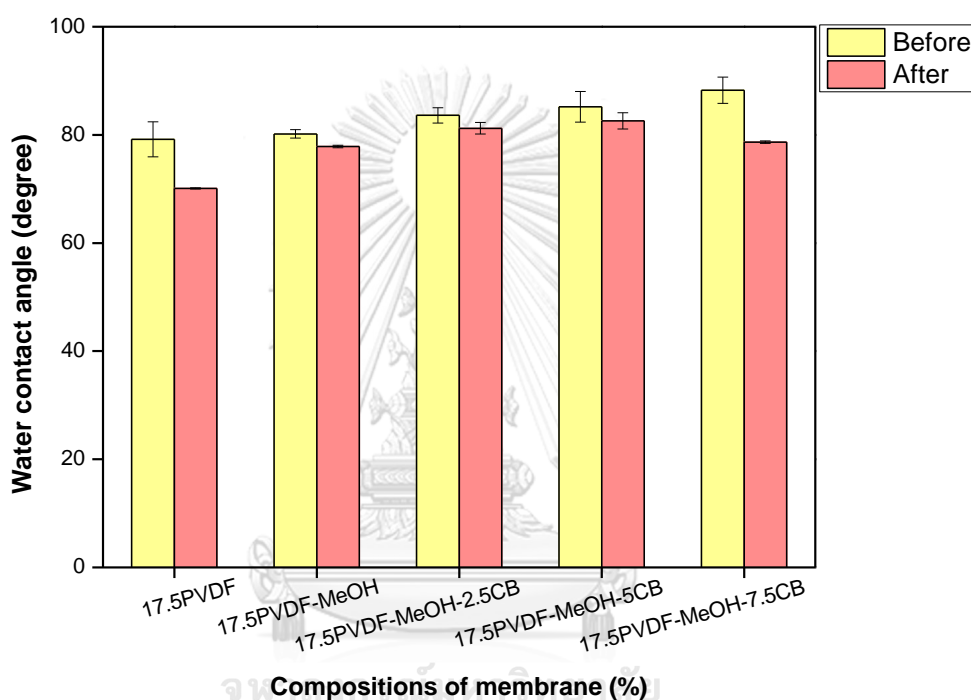
หลังจากใช้งานเมมเบรนด้วยกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอสออรัปชันได้นำมาวัดคุณสมบัติของเมมเบรนอีกครั้ง ซึ่งพบว่าโครงสร้างภายในของเมมเบรนไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากภาพตัดขวางดังรูปที่ 24 แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนมีโครงสร้างแบบฟองน้ำและมีช่องว่างภายในเมมเบรนเหมือนก่อนการนำไปวัดประสิทธิภาพและภาพบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนพบว่ายังมีความเป็นรูพรุนบนเมมเบรน



รูปที่ 24 แสดงลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของเมมเบรนที่เตรียมจากพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่มีการเติมสารเติมแต่งเมทานอล และคาร์บอนแบล็คที่ความเข้มข้นที่ต่างกัันก่อนใช้งาน (ซ้าย) และหลังใช้งาน (ขวา); (ก-ง) ไม่มีสารเติมแต่ง, (จ-ช) เติมเมทานอล, (ฅ-ฎ) เติมเมทานอลร่วมกับคาร์บอนแบล็ค (2.5 %), (ฐ-ณ) เติมเมทานอลร่วมกับคาร์บอนแบล็ค (5%), (ด-ท) เติมเมทานอลร่วมกับคาร์บอนแบล็ค (7.5%)

รูปที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนก่อนวัดประสิทธิภาพของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และหลังวัดประสิทธิภาพของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค) ที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์และ 5 เปอร์เซ็นต์มีค่าความไม่ชอบน้ำเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดจากค่าระหว่าง 83-85 องศาแล้วลดลงมาเหลือประมาณ 81-82.5 องศา เนื่องจากขนาดของรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบ

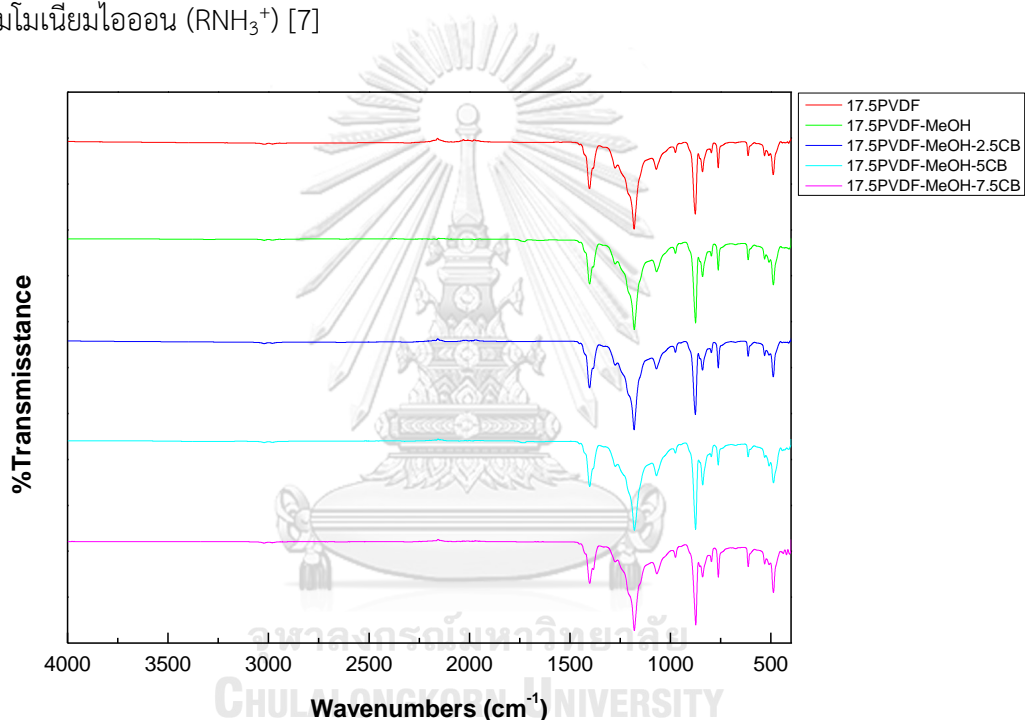
กับที่ 7.5 เปอร์เซ็นต์มีค่าความไม่ชอบน้ำลดลงมากที่สุดเนื่องจากมีขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 18 และเมื่อเมมเบรนสัมผัสกับสารดูดซึมน้ำจะพบว่าความพรุนบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนลดลงซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ามุมสัมผัสของสารดูดซึมน้ำและพื้นผิวของเมมเบรนจึงทำให้ค่าความไม่ชอบน้ำลดลงเนื่องจากสารดูดซึมน้ำจะมีค่าแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวของเมมเบรนและสารดูดซึมน้ำ ถ้าหากสารดูดซึมน้ำมีค่าแรงดึงดูดน้อยกว่าจะทำให้สารดูดซึมน้ำสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนของเมมเบรนได้ง่ายขึ้น โดยค่าแรงดึงดูดของ MEA มีค่าเท่ากับ 72.01 นิวตันต่อเมตร [49]



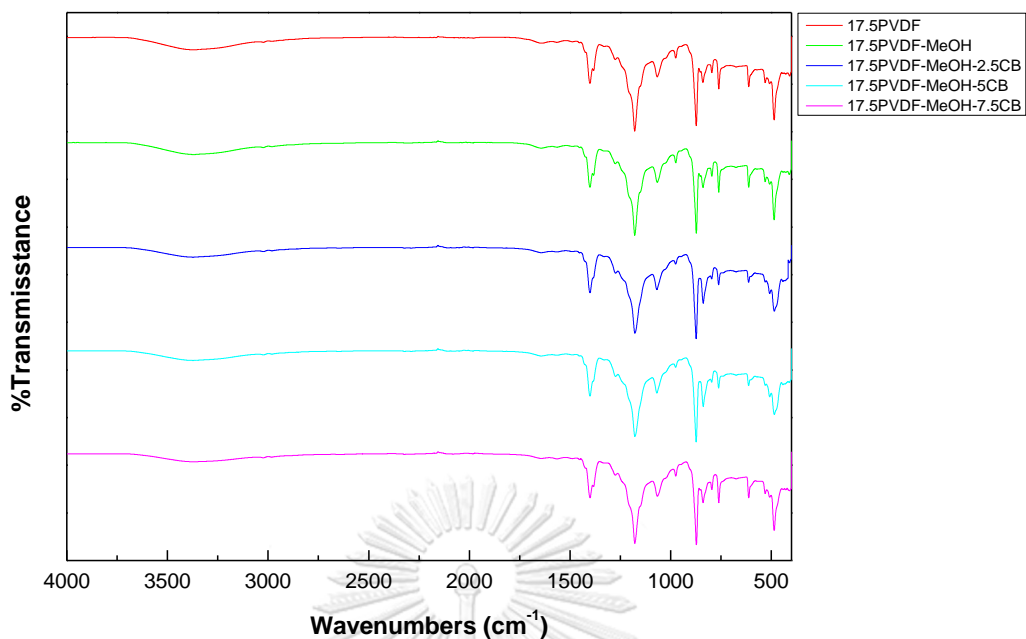
รูปที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนก่อนวัดประสิทธิภาพของการดูดซึมน้ำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และหลังวัดประสิทธิภาพของการดูดซึมน้ำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมมเบรนหลังการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนนำไปใช้งานโดยใช้หลักการของการดูดกลืนการดูดกลืนรังสีฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) ได้ทำการวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 4000 ถึง 400 จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะสามารถพบเลขคลื่นของโพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ได้ที่ 532, 615, 763, 796, 976 และ 1234 cm^{-1} [50] ดังแสดงในรูปที่ 26 และรูปที่ 27 แสดงการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ที่มีความ

เข้มข้นของ PVDF 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะพบว่าการปรากฏเลขคลื่นที่ 3022 และ 2980 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ CH_2 , เลขคลื่นที่ 878 และ 840 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชันของ C-C-C และ C-F แบบพันธะเดี่ยว ตามลำดับ [51] หลังจากนำเมมเบรนไปวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารดูดซึมเป็น MEA ทำให้พบเลขคลื่นในช่วง 3400-3300 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน O-H แบบพันธะเดี่ยวและเลขคลื่นระหว่างช่วง 1650-1600 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชันของ COO^- [52] ซึ่งจากเลขคลื่นที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของ MEA เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และ MEA (RNH_2) ทำให้มีสารประกอบหมู่อะไรคาร์บอนิล (Carbonyl group) และแอมโมเนียมไอออน (RNH_3^+) [7]



รูปที่ 26 แสดงค่าจากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ที่ความเข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันก่อนวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 27 แสดงค่าจากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ที่ความเข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเติมสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันหลังวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้สนใจศึกษาปัจจัยในการขึ้นรูปเมมเบรนด้วยวิธีการเปลี่ยนภูมิภาคที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติการเปียกของเมมเบรนเพื่อวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอสซอร์ปชัน โดยทดสอบในสภาวะอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และความดันบรรยากาศ ซึ่งจะป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สไนโตรเจนที่อัตราส่วน 20:80

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของความเข้มข้นของพอลิเมอร์

สำหรับการเตรียมเมมเบรนที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (15-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) พบว่าเมมเบรนมีโครงสร้างรูพรุนแบบฟองน้ำและมีโพรงของรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์ขนาดของรูพรุนของเมมเบรนและความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์ไม่ส่งผลต่อค่ามุมสัมผัสของความไม่ชอบน้ำมากนักเนื่องจากเมื่อสารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้นลดลงจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนภูมิภาคที่ช้าลงด้วย

5.1.2 ผลของการเติมสารเติมแต่ง (เอทานอล/เมทานอล/คาร์บอนแบล็ค)

เมื่อเติมสารเติมแต่งเมทานอลและเอทานอลพบว่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่เมื่อเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็คสังเกตได้ว่ามีความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนมากขึ้น ซึ่งการเติมสารเติมแต่งสามารถช่วยในเรื่องการปรับขนาดรูพรุนของเมมเบรนและค่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนได้ จากนั้นมีการเติมสารเติมแต่งแบบผสมระหว่างแอลกอฮอล์ (เอทานอล/เมทานอล) และคาร์บอนแบล็ค ซึ่งในการเติมสารเติมแต่งเมทานอลกับคาร์บอนแบล็คนั้นให้ผลที่ดีกว่าการเติมเอทานอลกับคาร์บอนแบล็คเนื่องจากทำให้ขนาดรูพรุนมีขนาดเล็กลงและทำให้ค่าความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเนื่องจากเมทานอลและเอทานอลจะรบกวนระบบสมดุลทำให้การเปลี่ยนภูมิภาคของสารละลายพอลิเมอร์ที่เติมเมทานอลเกิดขึ้นได้ช้ากว่าสารละลายพอลิเมอร์ที่เติมเอทานอลและนอกจากนี้ยังมีการนำเมมเบรนไปตรวจคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำพบว่าผลการเติมสารเติมแต่งแบบผสมระหว่างเมทานอลกับคาร์บอนแบล็คนั้นคาร์บอนแบล็คสามารถทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นได้

5.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารเติมแต่ง (คาร์บอนแบล็ค)

การเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็คที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน (0, 2.5, 5, 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จากการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนแบล็คลงในสารละลายพอลิเมอร์ ทำให้ขนาดรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กลงและยังเพิ่มความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนเนื่องจากเมื่อเติมสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็คช่วยเพิ่มความหนืดให้กับสารละลายพอลิเมอร์จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างของเมมเบรนให้เกิดได้ช้าลงอีกทั้งการเติมคาร์บอนแบล็คยังช่วยเพิ่มความมั่งคั่งของเมมเบรนทำให้เมมเบรนมีความไม่ชอบน้ำที่สูงขึ้น

5.1.4 การวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากการวัดประสิทธิภาพการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเมทานอลทำให้มีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้มีพลังของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเติมแต่งคาร์บอนแบล็คทำให้ขนาดรูพรุนเล็กลงแต่มีความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนที่มากขึ้นทำให้สามารถเพิ่มค่าพลังของการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในงานวิจัยนี้เป็นการขึ้นรูปเมมเบรนชนิดแผ่นเรียบซึ่งมีข้อจำกัดในกระบวนการเมมเบรนแก๊สแอบซอร์ปชันในเรื่องพื้นที่ผิวสัมผัสที่ไม่มาก จึงควรขึ้นรูปเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวงเพื่อเพิ่มพื้นที่ในผิวในการสัมผัสกันระหว่างสาร
- 2) เพื่อให้ได้ผลที่ชัดเจนในเรื่องอายุการใช้งานของเมมเบรน ควรจะเพิ่มระยะเวลาในการดำเนินงานให้เพิ่มมากขึ้น แล้วศึกษาคุณสมบัติของเมมเบรนที่มีผลต่อความไม่ชอบน้ำของเมมเบรนในระยะเวลาดำเนินการที่ยาวนานขึ้นและควรมีการทำซ้ำในส่วนของผลการทดลองที่ไม่มีแนวโน้มเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ชัดเจนเพิ่มมากขึ้น

บรรณานุกรม

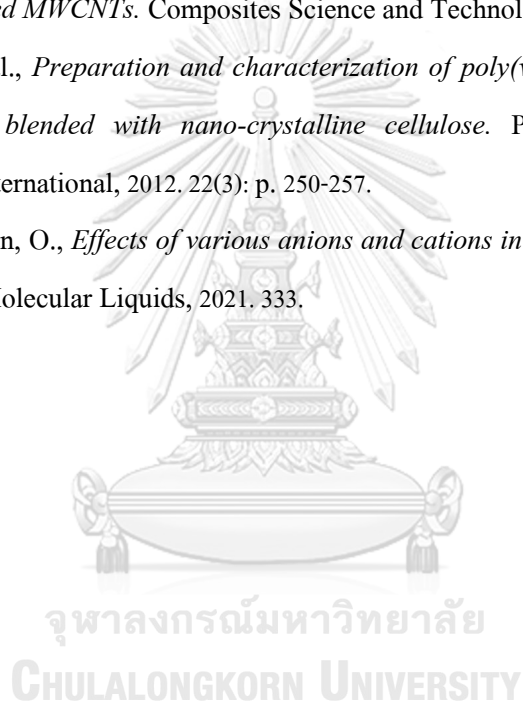
1. Rahbari-Sisakht, M., et al., *A novel surface modified polyvinylidene fluoride hollow fiber membrane contactor for CO₂ absorption*. Journal of Membrane Science, 2012. 415-416: p. 221-228.
2. Ibrahim, M.H., et al., *CO₂ Capture Using Hollow Fiber Membranes: A Review of Membrane Wetting*. Energy & Fuels, 2018. 32(2): p. 963-978.
3. <Research and development issues in CO₂ capture.pdf>.
4. Mondal, M.K., H.K. Balsora, and P. Varshney, *Progress and trends in CO₂ capture/separation technologies: A review*. Energy, 2012. 46(1): p. 431-441.
5. Pires, J.C.M., et al., *Recent developments on carbon capture and storage: An overview*. Chemical Engineering Research and Design, 2011. 89(9): p. 1446-1460.
6. Leung, D.Y.C., G. Caramanna, and M.M. Maroto-Valer, *An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. 39: p. 426-443.
7. Rajabzadeh, S., et al., *CO₂ absorption by using PVDF hollow fiber membrane contactors with various membrane structures*. Separation and Purification Technology, 2009. 69(2): p. 210-220.
8. Li, J.-L. and B.-H. Chen, *Review of CO₂ absorption using chemical solvents in hollow fiber membrane contactors*. Separation and Purification Technology, 2005. 41(2): p. 109-122.
9. Mosadegh-Sedghi, S., et al., *Wetting phenomenon in membrane contactors – Causes and prevention*. Journal of Membrane Science, 2014. 452: p. 332-353.
10. Ahmad, A.L. and W.K.W. Ramli, *Hydrophobic PVDF membrane via two-stage soft coagulation bath system for Membrane Gas Absorption of CO₂*. Separation and Purification Technology, 2013. 103: p. 230-240.
11. Zhang, Y. and R. Wang, *Fabrication of novel polyetherimide-fluorinated silica organic–inorganic composite hollow fiber membranes intended for membrane contactor application*. Journal of Membrane Science, 2013. 443: p. 170-180.

12. <Preparation and characterization of polyvinylidene fluoride hollow fiber membranes for ultrafiltration.pdf>.
13. <Thermal and flammability properties of polypropylene-carbon black nanocomposites.pdf>.
14. <Mechanical Properties of Natural Carbon Black Reinforced Polymer.pdf>.
15. Mansourizadeh, A. and A.F. Ismail, *Effect of additives on the structure and performance of polysulfone hollow fiber membranes for CO₂ absorption*. Journal of Membrane Science, 2010. 348(1-2): p. 260-267.
16. Cui, Z. and D. deMontigny, *Part 7: A review of CO₂ capture using hollow fiber membrane contactors*. Carbon Management, 2014. 4(1): p. 69-89.
17. <Mathematical Modeling of Carbon Dioxide Removal from the CO₂-CH₄ Gas Mixture Using Amines and Blend of Amines in Polypropylene A Comparison between Hollow Fiber Membrane Contactor and Other Membrane.pdf>.
18. Lu, J.-G., Y.-F. Zheng, and M.-D. Cheng, *Wetting mechanism in mass transfer process of hydrophobic membrane gas absorption*. Journal of Membrane Science, 2008. 308(1-2): p. 180-190.
19. Jansen, A.E., et al., *Membrane Gas Absorption Processes in Environmental Applications*, in *Membrane Processes in Separation and Purification*. 1994. p. 343-356.
20. Dindore, V.Y., et al., *CO₂ absorption at elevated pressures using a hollow fiber membrane contactor*. Journal of Membrane Science, 2004. 235(1-2): p. 99-109.
21. <Membrane transport theory.pdf>.
22. Ahmad, A.L., et al., *Effect of ethanol concentration in water coagulation bath on pore geometry of PVDF membrane for Membrane Gas Absorption application in CO₂ removal*. Separation and Purification Technology, 2012. 88: p. 11-18.
23. Lin, S.H., et al., *Influence of fluorocarbon flat-membrane hydrophobicity on carbon dioxide recovery*. Chemosphere, 2009. 75(10): p. 1410-6.
24. Al-Marzouqi, M.H., et al., *Modeling of CO₂ absorption in membrane contactors*. Separation and Purification Technology, 2008. 59(3): p. 286-293.

25. Mansourizadeh, A., A.F. Ismail, and T. Matsuura, *Effect of operating conditions on the physical and chemical CO₂ absorption through the PVDF hollow fiber membrane contactor*. *Journal of Membrane Science*, 2010. 353(1-2): p. 192-200.
26. Lv, Y., et al., *Fabrication and characterization of superhydrophobic polypropylene hollow fiber membranes for carbon dioxide absorption*. *Applied Energy*, 2012. 90(1): p. 167-174.
27. Hoda, A.K. and I.F.J. Vankelecom, *Understanding and guiding the phase inversion process for synthesis of solvent resistant nanofiltration membranes*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015. 132(27): p. n/a-n/a.
28. Zare, S. and A. Kargari, *Membrane properties in membrane distillation*, in *Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook*. 2018. p. 107-156.
29. <*Fabrication of Hollow-Fiber Membranes by Phase Inversion.pdf*>.
30. Rahbari-Sisakht, M., et al., *Effect of novel surface modifying macromolecules on morphology and performance of Polysulfone hollow fiber membrane contactor for CO₂ absorption*. *Separation and Purification Technology*, 2012. 99: p. 61-68.
31. Lalia, B.S., et al., *A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relationship*. *Desalination*, 2013. 326: p. 77-95.
32. <*Microstructure in phase inversion membrane part 1 formation of macrovoids.pdf*>.
33. Mansourizadeh, A., et al., *Blend polyvinylidene fluoride/surface modifying macromolecule hollow fiber membrane contactors for CO₂ absorption*. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014. 26: p. 83-92.
34. Rahbari-Sisakht, M., et al., *Effect of SMM concentration on morphology and performance of surface modified PVDF hollow fiber membrane contactor for CO₂ absorption*. *Separation and Purification Technology*, 2013. 116: p. 67-72.
35. Rezaei, M., et al., *Effect of general montmorillonite and Cloisite 15A on structural parameters and performance of mixed matrix membranes contactor for CO₂ absorption*. *Chemical Engineering Journal*, 2015. 260: p. 875-885.
36. Rezaei, M., et al., *Preparation and characterization of PVDF-montmorillonite mixed matrix hollow fiber membrane for gas-liquid contacting process*. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014. 92(11): p. 2449-2460.

37. Rezaei DashtArzhandi, M., et al., *Fabrication and characterization of porous polyetherimide/montmorillonite hollow fiber mixed matrix membranes for CO₂ absorption via membrane contactor*. Chemical Engineering Journal, 2015. 269: p. 51-59.
38. Zhang, Y. and R. Wang, *Novel method for incorporating hydrophobic silica nanoparticles on polyetherimide hollow fiber membranes for CO₂ absorption in a gas-liquid membrane contactor*. Journal of Membrane Science, 2014. 452: p. 379-389.
39. Kartohardj, S., et al., *CO₂ Absorption from its Mixture Through Super-hydrophobic Membrane Contactor*. Journal of Environmental Science and Technology, 2016. 10(1): p. 25-34.
40. Zhao, L., et al., *Highly porous PVDF hollow fiber membranes for VMD application by applying a simultaneous co-extrusion spinning process*. Journal of Membrane Science, 2016. 505: p. 82-91.
41. Mohd Yatim, N.S., K. Abd. Karim, and B.S. Ooi, *Nodular structure and crystallinity of poly(vinylidene fluoride) membranes: Impact on the performance of direct-contact membrane distillation for nutrient isolation*. Journal of Applied Polymer Science, 2018. 135(44).
42. He, M., et al., *Manipulating membrane surface porosity and pore size by in-situ assembly of Pluronic F127 and tannin*. Journal of Membrane Science, 2018. 556: p. 285-292.
43. <Isothermal Phase Diagrams and Phase-Inversion Behavior of Poly(vinylidene fluoride)-Solvents-Additives-Water Systems.pdf>.
44. Tan, Y., et al., *Characterization of carbon black-filled immiscible polypropylene/polystyrene blends*. Polymer International, 2011. 60(5): p. 823-832.
45. Hu, X., et al., *Highly Stretchable Superhydrophobic Composite Coating Based on Self-Adaptive Deformation of Hierarchical Structures*. Small, 2017. 13(19).
46. Mendes, S.F., et al., *Effect of filler size and concentration on the structure and properties of poly(vinylidene fluoride)/BaTiO₃ nanocomposites*. Journal of Materials Science, 2011. 47(3): p. 1378-1388.
47. de Jesus Silva, A.J., et al., *Kinetics of thermal degradation and lifetime study of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) subjected to bioethanol fuel accelerated aging*. Heliyon, 2020. 6(7): p. e04573.

48. Ouyang, Z.W., E.C. Chen, and T.M. Wu, *Thermal Stability and Magnetic Properties of Polyvinylidene Fluoride/Magnetite Nanocomposites*. *Materials (Basel)*, 2015. 8(7): p. 4553-4564.
49. Rezaian, Z., P. Keshavarz, and M. Khorram, *Experimental investigation of the effects of different chemical absorbents on wetting and morphology of poly(vinylidene fluoride) membrane*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017. 134(47).
50. Begum, S., et al., *Investigation of morphology, crystallinity, thermal stability, piezoelectricity and conductivity of PVDF nanocomposites reinforced with epoxy functionalized MWCNTs*. *Composites Science and Technology*, 2021. 211.
51. Bai, H., et al., *Preparation and characterization of poly(vinylidene fluoride) composite membranes blended with nano-crystalline cellulose*. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2012. 22(3): p. 250-257.
52. Yuksel Orhan, O., *Effects of various anions and cations in ionic liquids on CO₂ capture*. *Journal of Molecular Liquids*, 2021. 333.



ภาคผนวก ก

สัณฐานวิทยาและขนาดของรูพรุน

ตารางที่ ก แสดงค่าขนาดรูพรุน, ความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรนและความพรุนของเมมเบรน

ความเข้มข้นของพอลิเมอร์	ชื่อตัวอย่าง	ขนาดของรูพรุน (นาโนเมตร)	ความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรน (%)	ความพรุนของเมมเบรน (%)
15%	15PVDF-EtOH	252.2	21.38	54.63
	15PVDF-EtOH-5CB	318.22	18.79	47.09
	15PVDF-MeOH	241.17	20.81	55.90
	15PVDF-MeOH-5CB	186.64	23.49	52.36
	15PVDF-5CB	183.77	21.59	59.70
17.5%	17.5PVDF-EtOH	208.39	22.86	61.58
	17.5PVDF-EtOH-5CB	185.25	21.89	55.15
	17.5PVDF-MeOH	225.33	22.78	64.03
	17.5PVDF-MeOH-5CB	192.5	25.23	61.16
	17.5PVDF-5CB	174.93	23.69	54.02
20%	20PVDF-EtOH	193.82	21.09	58.10
	20PVDF-EtOH-5CB	273.23	19.58	55.64
	20PVDF-MeOH	338	23.90	68.00
	20PVDF-MeOH-5CB	240.23	22.81	53.53
	20PVDF-5CB	186.6	21.69	49.44

ภาคผนวก ข

การดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

แก๊สผสม (แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สไนโตรเจน อัตราส่วน 20:80)

ตารางที่ ข ข้อมูลจาก GC

	แก๊สขาเข้า		แก๊สขาออก (17.5PVDF)	
	CO ₂	N ₂	CO ₂	N ₂
พื้นที่	430079	1769110	420648	1767945
Area fraction	0.20	0.80	0.19	0.81

แทนค่าในสมการ calibration; $y = 0.9865x - 0.0102$: $y =$ mol fraction, $x =$ area fractionแก๊สขาเข้า

$$\text{Mol fraction of CO}_2 = 0.9865(0.20) - 0.0102 = 0.18$$

$$\text{Mol fraction of N}_2 = 1 - \text{mol fraction of CO}_2 = 1 - 0.18 = 0.82$$

แก๊สขาออก

$$\text{Mol fraction of CO}_2 = 0.9865(0.19) - 0.0102 = 0.18$$

$$\text{Mol fraction of N}_2 = 1 - \text{mol fraction of CO}_2 = 1 - 0.18 = 0.82$$

CO₂ absorption flux

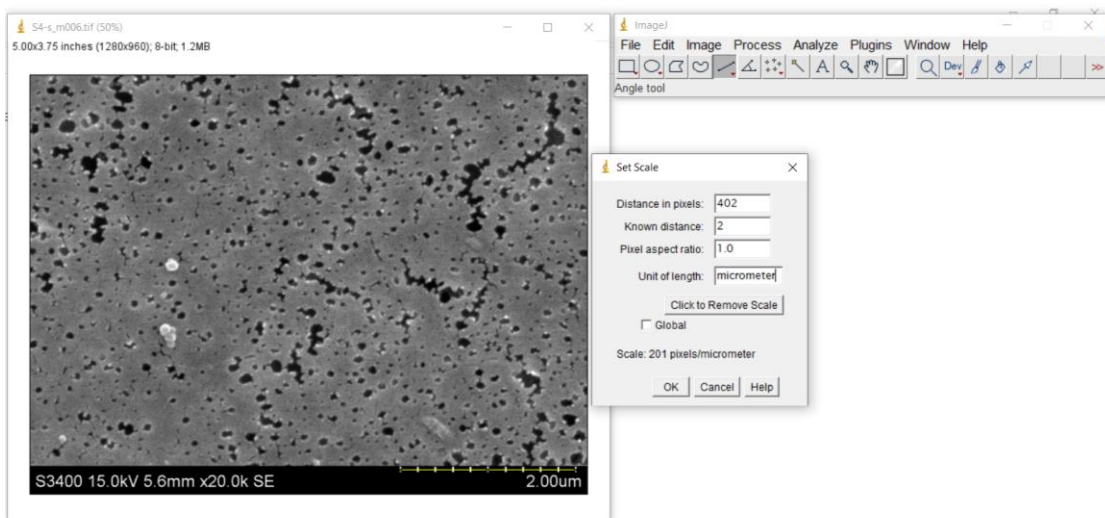
$$\text{Flux} = (321.6 - 315.13) / (0.08314 \times 303 \times 0.0024 \times 60) = 1.78 \text{ mmol/m}^2\text{s}$$

ภาคผนวก ค

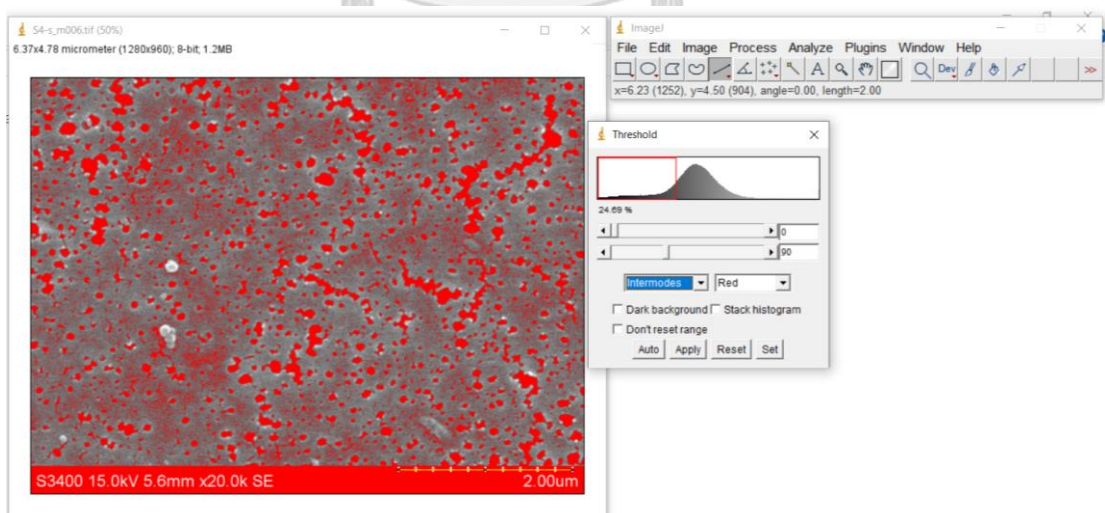
อิมเมจเจ (Image processing)

ความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรน

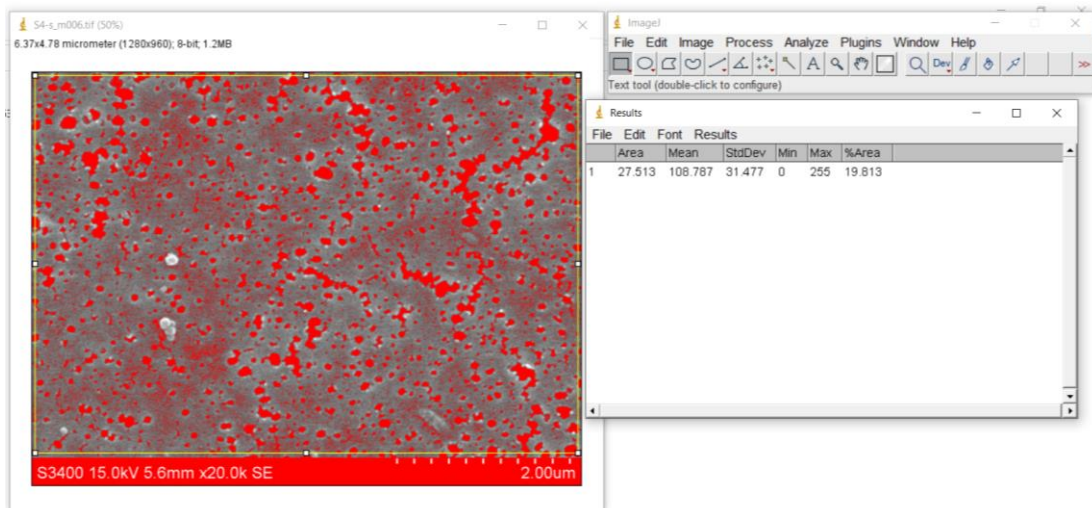
- 1) เลือกรูปภาพจาก SEM และเปิดโปรแกรมอิมเมจเจ
- 2) กำหนดสเกลในภาพ (Analyze >> Set scale)



- 3) ปรับ threshold เติมในพื้นที่รูพรุน (Image >> Adjust >> Thershold)



- 4) คำนวณหาพื้นที่ที่เติมสีแดงเพื่อพิจารณาความพรุนบนพื้นผิวของเมมเบรน (Analyze >> Measure) โดยคำนวณ จาก พื้นที่รูพรุนหารด้วยพื้นที่ทั้งหมด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุพิชญา ศรีศดใส
วัน เดือน ปี เกิด	08 กรกฎาคม 2537
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสมเด็จพระเจ้าน้องนางเธอ เจ้าฟ้าจุฬาภรณวลัยลักษณ์ อัครราชกุมารี นครศรีธรรมราช
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	118/122 หมู่ 1 ต.สุรศักดิ์ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

