

การเตรียมและลักษณะสมบัติของเมมเบรนไคโตซาน/ซีโอไลท์สำหรับการแยกมีเทนในแก๊สชีวภาพ



นางสาวชมพูนุช อัครัตินิवास

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF CHITOSAN/ZEOLITE MEMBRANE FOR SEPARATION
OF CH₄ IN BIOGAS



Miss Chompoonoot Ussaratnivas

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology
Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมและลักษณะสมบัติของเมมเบรนไคโตซาน/ซีโอไลต์
สำหรับการแยกมีเทนในแก๊สชีวภาพ

โดย

นางสาวชมพูนุช อัครัตินิवास

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา

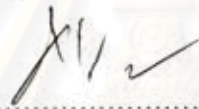
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

ฉันทนา สุนทรภา

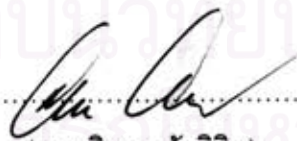
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(นายพิทยา ยังพิชิต)

ชมพูนุช อุศรีตนิवास : การเตรียมและลักษณะสมบัติของเมมเบรนไคโตซาน/ซีโอไลต์
 สำหรับการแยกมีเทนในแก๊สชีวภาพ. (PREPARATION AND CHARACTERIZATION
 OF CHITOSAN/ZEOLITE MEMBRANE FOR SEPARATION OF CH₄ IN BIOGAS)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. ชันทอง สุนทรภา, 109 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้เตรียมเมมเบรนฐานไคโตซาน เพื่อนำมาใช้ในการแยกมีเทนจากแก๊สชีวภาพ
 ไคโตซานที่ใช้มีมวลโมเลกุลและร้อยละการกำจัดหมู่แอสีทิล เท่ากับ 9.5×10^5 ดอลตัน และ 90 ± 5
 ตามลำดับ สารซีโอไลต์เอที่ใช้มีขนาดของรูพรุน พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 2551.6
 อังสตรอม 13.9 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.0137 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เมมเบรน
 ที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง
 เมมเบรน ไคโตซานไม่เชื่อมขวาง-ซีโอไลต์เอ เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์เอ และเมม
 เบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์เอชนิดบวมตัวด้วยน้ำ ในการเชื่อมขวางเมมเบรนไคโตซานใช้
 สารละลาย กรดซัลฟิวริกร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และใช้ซีโอไลต์เอในปริมาณร้อยละ 10-40 โดย
 น้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของเมมเบรน ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี
 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน ความสามารถทนต่อแรงดึง ลักษณะสัณฐานวิทยา ค่าการซึม
 ผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส พบว่าผลของการเติมซีโอไลต์ทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำใน
 เมมเบรนและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สเพิ่มขึ้น แต่ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงและค่าการซึมผ่าน
 แก๊สลดลง ผลการศึกษาพบว่าเมมเบรนที่น่าสนใจ คือ เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางที่มีปริมาณ
 ซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ มีค่าการซึม
 ผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เท่ากับ 66.8 ± 6.4 , 4.0 ± 0.6 ,
 387.5 ± 26.1 และ 7.4 ± 0.6 ตามลำดับ ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
 ไฮโดรเจนต่อมีเทน และไนโตรเจนต่อมีเทน เท่ากับ 16.5 ± 1.6 , 96.9 ± 1.5 และ 1.9 ± 0.1 ตามลำดับ
 เมื่อใช้เมมเบรนแห่งทดสอบกับแก๊สแห้ง แต่ผลข้างต้นจะเปลี่ยนไปถ้าเมมเบรนและ/หรือแก๊สไม่
 แห้ง โดยกรณีที่ใช้แก๊สเปียกและเมมเบรนเปียก ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส
 จะเป็น 788.0 ± 17.8 แบเรอร์, 20.6 ± 2.2 แบเรอร์, 2102.1 ± 31.8 แบเรอร์, 33.7 ± 0.9 แบเรอร์,
 38.2 ± 0.2 , 101.9 ± 0.3 และ 1.6 ± 0.1 ตามลำดับ

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....ชมพูนุช อุศรีตนิवास.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเชื้อเพลิง.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....ฉันทนา สุนทรภา
 ปีการศึกษา.....2551.....

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่ผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการ พัฒนาศึกษาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี

ขอขอบพระคุณ โรงงาน มาลีสามพราน จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ข้อมูล และอำนวยความสะดวกในการเข้าไปปฏิบัติงาน

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมาย ที่มีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แก๊สชีวภาพ.....	3
2.2 เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน.....	6
2.3 กระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน.....	7
2.4 มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน.....	14
2.5 ไคตินและไคโตซาน.....	17
2.6 ซีโอไลต์.....	20
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	26
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	26
3.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์.....	27
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27

บทที่	ช หน้า
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย.....	34
4.1 สมบัติของโคโตซานและซีโอไลต์.....	34
4.2 โครงสร้างทางเคมี.....	34
4.3 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน.....	35
4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยา.....	36
4.5 ความสามารถทนต่อแรงดึง.....	38
4.6 สมรรถนะการแยกแก๊สแห่งของเมมเบรนแห้ง.....	39
4.7 สมรรถนะการแยกแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพ.....	47
4.8 สมรรถนะการแยกแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง.....	56
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง.....	69
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	109

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	แสดงประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน.....	7
ตารางที่ 2.2	แสดงค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊สของพอลิเมอร์ที่ อุณหภูมิห้อง.....	11
ตารางที่ 2.3	แสดงขนาดโมเลกุลของแก๊ส.....	12
ตารางที่ 2.4	แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ การละลาย และค่าการซึมผ่านของแก๊ส.....	13
ตารางที่ 2.5	แสดงแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญของไคติน.....	17
ตารางที่ 4.1	แสดงสมบัติของไคโตซานและซีโอไลต์เอ.....	34



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเกิดแก๊สชีวภาพ.....	5
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการแพร่ของแก๊สผ่านเมมเบรนมีรูพรุน.....	9
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการแพร่ของแก๊สผ่านเมมเบรนเนื้อแน่น.....	10
รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน.....	14
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน.....	16
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไคติน.....	18
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน.....	18
รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์เอ.....	21
รูปที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง.....	29
รูปที่ 3.2 เครื่อง Universal testing LLOYD Instruments LR 5K.....	31
รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบการซึมผ่านของแก๊ส.....	32
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งที่ทำการทดสอบแยกแก๊สกับระบบป้อนแก๊สชีวภาพจริง.....	33
รูปที่ 4.1 FTIR spectra ของเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์.....	35
รูปที่ 4.2 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์.....	36
รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์.....	37
รูปที่ 4.4 ความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์.....	39
รูปที่ 4.5 ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนต่อค่าการซึมผ่านแก๊ส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	40
รูปที่ 4.6 ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนต่อเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	41
รูปที่ 4.7 ผลของความดันต่อค่าการซึมผ่านแก๊ส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	42
รูปที่ 4.8 ผลของความดันต่อค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	43
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการซึมผ่านแก๊ส ที่ความดัน 1 บาร์.....	44
รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ที่ความดัน 1 บาร์.....	45
รูปที่ 4.11 ค่าการซึมผ่านแก๊สแห้งผ่านเมมเบรนแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	46

รูปที่ 4.12	ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สแห้งผ่านเมมเบรนแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	47
รูปที่ 4.13	ผลของสภาพเมมเบรนต่อค่าการซึมผ่านแก๊สแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	48
รูปที่ 4.14	ผลของสภาพเมมเบรนต่อค่าการเลือกสรรคู่แก๊สแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	50
รูปที่ 4.15	ผลของสภาพเมมเบรน และสภาพแก๊สต่อค่าการซึมผ่านแก๊ส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	52
รูปที่ 4.16	ผลของสภาพเมมเบรน และสภาพแก๊สต่อค่าการเลือกสรรแก๊ส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	54
รูปที่ 4.17	ผลค่าการซึมผ่านแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	57
รูปที่ 4.18	ผลค่าการเลือกสรรแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์.....	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสถานการณ์วิกฤตการณ์พลังงาน ราคาน้ำมันแพง การลดน้อยลงของแหล่งน้ำมันสำรองทั่วโลก ตลอดจนการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นของประเทศ แก๊สชีวภาพจึงเป็นทางเลือกหนึ่งของแหล่งพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทยที่มีศักยภาพสูง สำหรับองค์ประกอบในแก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณร้อยละ 60-70 ซึ่งเป็นแก๊สที่ติดไฟได้ จึงนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 28-38 รวมทั้งแก๊สอื่น ๆ เช่น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) ประมาณร้อยละ 2 และเนื่องจากองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพมีแก๊สอื่นปนอยู่ด้วย ซึ่งโดยมากจะเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟ ดังนั้นก่อนที่จะนำแก๊สชีวภาพไปใช้งานจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อเพิ่มค่าความร้อนให้แก่แก๊สชีวภาพสำหรับนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และลดการกัดกร่อนของเครื่องจักร

สำหรับกระบวนการที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวภาพแบบดั้งเดิม คือ กระบวนการแอลคาโนลามีน (Alkanolamines process) [1] นั่นคือ การทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ละลายลงไปในตัวทำละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) และแนฟทาควิโนน (Naphtha quinone) หรือตัวทำละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric hydroxide) เพื่อกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ ผลที่ได้คือจะทำให้ได้แก๊สชีวภาพที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการแอลคาโนลามีน มีข้อเสียคือปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการระเหยของสารเคมีบางส่วน สารเคมีที่นำมาใช้มีราคาแพง และกระบวนการค่อนข้างยุ่งยาก ทำให้งานวิจัยนี้มีความสนใจในเทคโนโลยีการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน เพื่อที่จะนำมาใช้ในการแยกมีเทนในแก๊สชีวภาพ โดยเลือกใช้เมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เตรียมเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์ เพื่อนำมาใช้ในการแยกมีเทนจากแก๊สชีวภาพ
2. ศึกษาลักษณะสมบัติของเมมเบรนที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมเมมเบรนไคโตซานแบบไม่มีการเชื่อมขวาง และเมมเบรนไคโตซานแบบมีการเชื่อมขวาง ตามวิธีการในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [2]
2. เตรียมเมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตแบบไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบมีการเชื่อมขวาง ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณไคโตซานต่อซีโอไลต์ ดังนี้ 10:1, 10:2, 10:3 และ 10:4
3. วิเคราะห์สมบัติของเมมเบรน ดังนี้
 - 3.1 สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความสามารถทนต่อแรงดึง ร้อยละการดูดซับน้ำ และลักษณะสัณฐานวิทยา
 - 3.2 สมบัติทางเคมี ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี
 - 3.3 ค่าการซึมผ่านของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ และที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส
 - 3.4 ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนต่อไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนต่อไนโตรเจน ที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ และที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส
 - 3.5 ค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊สผสมจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เมมเบรนเพื่อใช้สำหรับการแยกแก๊ส ทดแทนการใช้เทคโนโลยีแบบดั้งเดิม โดยเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษตามมา และใช้พลังงานต่ำกว่า เพราะสามารถดำเนินการที่สภาวะปกติของระบบบ่อแก๊สชีวภาพ

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สชีวภาพ [4]

ย้อนหลังไปประมาณสามพันปีก่อน ประเทศ Assyria ซึ่งเป็นดินแดนในอดีตที่เคยตั้งในแถบตะวันตกของทวีปเอเชียสมัยโบราณ คือประเทศแรกที่ได้มีการนำแก๊สชีวภาพไปใช้ในการให้ความร้อนในการต้มน้ำอาบ หลังจากนั้นพบว่ามีการใช้แก๊สชีวภาพในลักษณะเดียวกันในแถบเปอร์เซีย ในช่วงประมาณห้าร้อยปีที่ผ่านมานี้ แต่เมื่อพิจารณาถึงหลักฐานการบันทึกในยุโรป พบว่าในปี พ.ศ.2173 Jan Baptita Van Helmont เป็นบุคคลแรกที่ค้นพบว่าแก๊สเกิดขึ้นจากการนำเปื่อยของซากสารอินทรีย์ และต่อมาในปี พ.ศ. 2351 Sir Humphrey Davy ได้พบว่าในบ่อปุ๋ยคอกนั้น มีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นและน่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้

อย่างไรก็ตาม อินเดียเป็นประเทศแรกที่มีการใช้แก๊สชีวภาพอย่างเป็นระบบจริงจัง โดยมีรายงานว่าในปี พ.ศ.2402 มีการสร้างระบบที่เรียกว่า Anaerobic digestion (AD) plant เป็นครั้งแรกในนิคมโรคเรื้อน Matunga ที่เมืองบอมเบย์ และนำพลังงานชีวภาพที่ได้ไปใช้งานภายในนิคม หลังจากนั้นแนวคิดการใช้แก๊สชีวภาพนี้ก็แพร่ไปสู่ประเทศอังกฤษและประเทศอื่นๆทั่วโลกในที่สุด

2.1.1 เทคโนโลยีในการผลิตแก๊สชีวภาพ [5]

แก๊สชีวภาพ เป็นพลังงานที่เกิดจากการนำของเสีย เช่น มูลสัตว์ น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ขยะ และของเหลือใช้ทางการเกษตร มาผ่านกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) โดยแบคทีเรียหลายชนิด เมื่อสภาวะแวดล้อมเหมาะสม แบคทีเรียจะเจริญเติบโต และย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จนกระทั่งในที่สุดเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สชีวภาพ

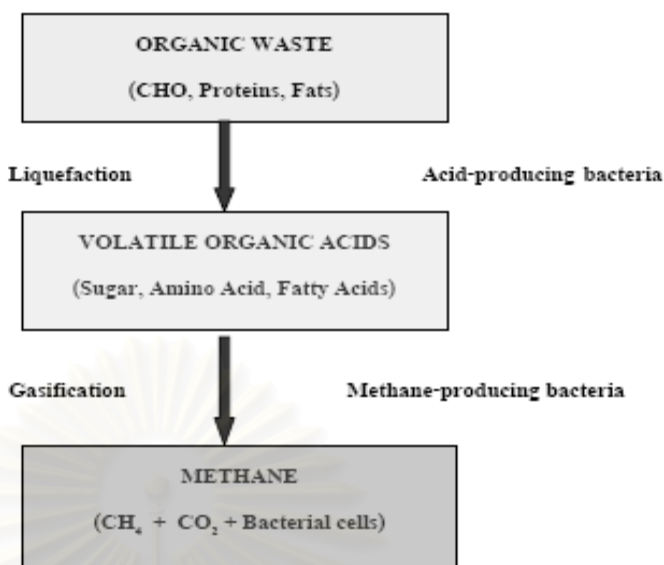
ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้ออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 การสลายสารโมเลกุลใหญ่ (Hydrolysis) : ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์เชิงซ้อน (complex organic compound) ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมันจะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้เป็นพวก hydrolytic bacteria และ fermentative bacteria ทำให้สารอินทรีย์

แตกตัวมีขนาดเล็กและละลายน้ำได้และเคลื่อนย้ายเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้จะขึ้นกับชนิดของสารตั้งต้น เช่น ถ้าสารตั้งต้นเป็นคาร์โบไฮเดรตจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โปรตีนเปลี่ยนไปเป็นเปปไทด์ หรือกรดอะมิโน ไขมันจะเปลี่ยนเป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล นอกเหนือจากการย่อยที่เกิดจาก hydrolytic bacteria แล้ว ยังอาจมีปฏิกิริยาที่เกิดจากพวก fermentative bacteria ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์พวกสารประกอบแอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์รวมอยู่ด้วย ชนิดและปริมาณของแบคทีเรียในถังหมักจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ภายในระบบ

ขั้นที่ 2 ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ (Acidogenesis) : ขั้นตอนนี้เป็นการย่อยสลายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส เพื่อนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ และเพื่อใช้เป็นพลังงาน อินทรีย์สารโมเลกุลเล็กจากขั้นตอนไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียซึ่งเป็นผู้ที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ดีทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน เจริญเติบโตในช่วง pH 6.5 - 7.5 ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี มีอัตราเจริญเติบโตสูง สามารถแบ่งตัวเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าภายในเวลา 24 ชั่วโมง และใช้อินทรีย์สารเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานเกิดกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งผลของปฏิกิริยาทำให้ได้สารที่อยู่ในรูปออกซิไดส์และรีดิวส์ พวกที่อยู่ในรูปออกซิไดส์ส่วนใหญ่เป็นพวกกรดอินทรีย์ระเหย (volatile fatty acid) ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 อะตอม เช่น กรดแอสติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) กรดบิวทีริก (butyric acid) และกรดแวลริก (valeric acid) เป็นต้น แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในช่วงนี้คือ แบคทีเรียที่สร้างกรด หรือ nonmethanogenic bacteria พวกที่อยู่ในรูปรีดิวส์ มีอยู่หลายอย่างขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและตัวรับอิเล็กตรอน เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล เป็นต้น ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ซึ่งให้ผลผลิตเป็น กรดแอสติก แก๊สไฮโดรเจน และพวกแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล จะถูกใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่ม methanogenic bacteria เพื่อให้เกิดเป็นแก๊สมีเทนต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การผลิตแก๊สมีเทน (Methanogenesis) : กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่สองเป็นสารประกอบอย่างง่าย ได้แก่ กรดแอสติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สมีเทนโดยแบคทีเรียที่สร้างแก๊สมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า methanogenic bacteria จัดอยู่ในพวก obligate anaerobic bacteria จะดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น เจริญได้ดีทั้งในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (mesophile) 35 - 40 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิสูง (thermophile) 55 - 60 องศาเซลเซียส ค่า pH ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตและผลิตแก๊สมีเทนอยู่ในช่วง 6.5 - 7.5 การรักษาสภาวะของระบบแก๊สชีวภาพจะต้องมีจำนวนแบคทีเรีย non-methanogenic และ methanogenic สมดุลย์กัน การรักษาสภาวะสมดุลย์ดังกล่าว จะต้องควบคุมสารอาหาร ชนิดของกรดอินทรีย์ ปริมาณของแอมโมเนีย ปริมาณโลหะหนัก ระดับอุณหภูมิ ค่าอัลคาไลน์ (alkalinity) และค่าพีเอชที่เหมาะสม



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเกิดแก๊สชีวภาพ [5]

องค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพ คือ แก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณร้อยละ 60-70 ซึ่งเป็นแก๊สที่ติดไฟได้ จึงนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 28-38 และแก๊สอื่น ๆ เช่น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และแก๊สไนโตรเจน (N_2) ประมาณร้อยละ 2 ซึ่งเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟ ดังนั้นคุณสมบัติของแก๊สชีวภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สมีเทน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแก๊สชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ประกอบด้วยมีเทนร้อยละ 60 จะมีค่าความร้อนประมาณ 5,000-5,500 กิโลแคลลอรี่ ซึ่งเทียบเท่ากับน้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร หรือ น้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร หรือน้ำมันเตา 0.81 ลิตร หรือพลังงานไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือแก๊สหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม หรือไม้ฟืน 1.5 กิโลกรัม

2.1.2 ประโยชน์ของแก๊สชีวภาพ [6]

2.1.2.1. ด้านพลังงาน เมื่อพิจารณาถึงด้านเศรษฐกิจแล้ว การลงทุนผลิตแก๊สชีวภาพจะลงทุนต่ำกว่าการผลิตเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่น ๆ เช่น ฟืน ถ่าน น้ำมัน แก๊สหุงต้ม และไฟฟ้า แก๊สชีวภาพจำนวน 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถนำไปใช้ได้ดังนี้

1. ให้ค่าความร้อน 3,000-5,000 กิโลแคลลอรี่ ความร้อนนี้จะทำให้น้ำ 130 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เดือดได้

2. ใช้กับตะเกียงแก๊สขนาด 60-100 วัตต์ ลูกใหม่ได้ 5-6 ชั่วโมง
3. ผลิตกระแสไฟฟ้า 1.25 กิโลวัตต์
4. ใช้กับเครื่องยนต์ 2 แรงม้า ได้นาน 1 ชั่วโมง
5. ถ้าใช้กับครอบครัวขนาด 4 คน สามารถหุงต้มได้ 3 มื้อ

2.1.2.2. ด้านปรับปรุงสภาพแวดล้อม โดยการนำมูลสัตว์ และน้ำล้างคอกมาหมักในบ่อแก๊สชีวภาพ จะเป็นการช่วยกำจัดมูลในบริเวณที่เลี้ยงทำให้กลิ่นเหม็นและแมลงวันในบริเวณนั้นลดลงและผลจากการหมักมูลสัตว์ ในบ่อแก๊สชีวภาพที่ปราศจากออกซิเจนเป็นเวลานานทำให้ไข่พยาธิและเชื้อโรคส่วนใหญ่ในมูลสัตว์ตายด้วย ซึ่งเป็นการทำลายแหล่งเพาะเชื้อโรคบางชนิด เช่น โรคบิด อหิวา และพยาธิที่อาจแพร่กระจายจากมูลสัตว์ด้วยกัน นอกจากนี้แล้วยังเป็นการป้องกันไม่ให้มูลสัตว์ถูกชะล้างลงไปในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ

2.1.2.3. ด้านการเกษตร ได้แก่ การทำเป็นปุ๋ย กากที่ได้จากการหมักแก๊สชีวภาพนั้น พบว่าสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้ดีกว่ามูลสัตว์สดและปุ๋ยคอก ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่มีการหมัก จะมีการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในมูลสัตว์ ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และการทำเป็นอาหารสัตว์ โดยนำส่วนที่เหลือจากการหมัก นำไปตากแห้ง แล้วนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์ให้โคและสุกรกินได้ แต่ทั้งนี้ก็มีข้อจำกัด คือ ควรใส่อยู่ระหว่าง 5-10 กิโลกรัมต่อส่วนผสมทั้งหมด 100 กิโลกรัม จะทำให้สัตว์เจริญเติบโตตามปกติและเป็นการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

2.2 เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน [7]

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน มีจุดเด่นสำคัญในแง่ใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนเฟส จึงไม่ต้องการความร้อนเพื่อการเปลี่ยนเฟส นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการแยกผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียสมบัติหรือสภาพได้เมื่อได้รับความร้อน เนื่องจากกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนส่วนใหญ่ดำเนินการที่สภาวะปกติ (ที่อุณหภูมิห้องและความดัน 1 บรรยากาศ) ซึ่งเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์เข้มข้น (concentrate) แยกลำดับส่วน (fractional) และทำให้บริสุทธิ์ (purify) ได้พร้อมกัน

สำหรับลักษณะของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนแต่ละประเภท แสดงในตารางที่ 2.1 โดยจะมีสารป้อนและเพอร์มิเอตที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 แสดงประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน [7]

กระบวนการ	สารป้อน	เพอร์มิเอต	แรงขับ
ไมโครฟิลเตรชัน	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
อัลตราฟิลเตรชัน	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
นาโนฟิลเตรชัน	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
ออสโมซิสแบบผันกลับ	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
เพอร์แวกเพอเรชัน	ของเหลว	ไอ	ความดันย่อย
เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน	ของเหลว หรือ	ของเหลว หรือ	แรงเคลื่อนไฟฟ้า
ไฮออน	$[H^+(H_2O)_n]$	$[H^+(H_2O)_n]$	
แยกแก๊สด้วยเมมเบรน	แก๊ส	แก๊ส	ความดันย่อย

ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ สารป้อนและเพอร์มิเอตอยู่ในเฟสของเหลว ใช้ความดันเป็นแรงขับดันให้เกิดการถ่ายโอนมวลขึ้น ขณะที่สารป้อนในกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชันเป็นของเหลว และเพอร์มิเอตอยู่ในเฟสไอ มีความดันย่อยของสารเพอร์มิเอตเป็นแรงขับดัน สารป้อนและเพอร์มิเอตในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นของเหลว หรืออยู่ในรูปของไฮโดรเนียมไอออน $[H^+(H_2O)_n]$ ในกรณีการประยุกต์ใช้เป็นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิง มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นแรงขับ ส่วนสารป้อนและเพอร์มิเอตในกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนอยู่ในเฟสแก๊ส มีความดันย่อยของสารเพอร์มิเอตเป็นแรงขับ

2.3 กระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน [7, 8]

การนำเมมเบรนมาใช้ในการแยกแก๊สมีมานานกว่า 100 ปี แต่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเริ่มประมาณ 20 ปี ที่ผ่านมานี้เนื่องจากประสบปัญหาการพัฒนาเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพในแง่ของค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส ที่ให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นการแยกแก๊สจึงเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างใหม่ แต่มีศักยภาพสูงและสามารถแข่งขันได้กับกระบวนการแยกแก๊สแบบปกติที่ใช้อยู่ เช่น กระบวนการ cryogenic การดูดซับ และการดูดกลืน เป็นต้น

สำหรับการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนนั้น จะมีความแตกต่างกับกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนอื่นๆ คือ ใช้แยกของผสมในสถานะแก๊ส ไม่ใช่สารละลายของเหลว ทั้งสารป้อนและเพอร์มิเตตอยู่ในสถานะแก๊ส โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แก๊สดิวฟิวชัน (gas diffusion) และแก๊สเพอร์มิเอชัน (gas permeation) โดยเป็นการแบ่งตามชนิดของเมมเบรนที่ใช้ และตามกลไกการแยก

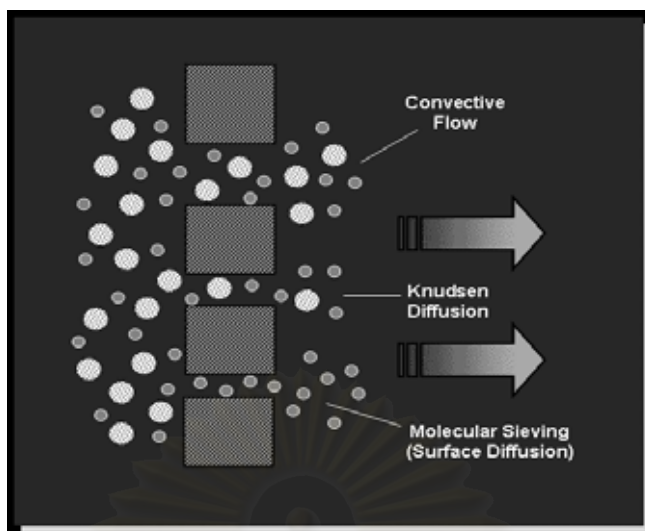
2.3.1 กลไกของแก๊สดิวฟิวชัน

ในการแยกแก๊สโดยใช้เมมเบรนมีรูพรุน เรียกว่า แก๊สดิวฟิวชัน แรงขับเคลื่อนในการเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนของโมเลกุล อาจเป็นผลต่างของความเข้มข้น หรือความดันย่อย โดยกลไกการเคลื่อนที่ของแก๊สในเมมเบรนมีรูพรุน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ดังนี้

1.) ถ้ารูพรุนของเมมเบรนมีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของแก๊สมาก กล่าวคือ ในช่วง $0.1 - 10$ ไมครอน โมเลกุลของแก๊สภายใต้ความดัน สามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนด้วยกลไกที่เรียกว่า poiseuille flow หรือ viscous flow นั่นคือโมเลกุลของแก๊สจะเกิดการชนกันเองมากกว่าที่จะชนกับผนังรูพรุน ส่งผลให้โมเลกุลของแก๊สทุกชนิดเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้เท่าๆกัน และไม่มี การแยกเกิดขึ้น

2.) ถ้ารูพรุนของเมมเบรนมีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน ซึ่งทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดของรูมีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่าวิถีเสรีเฉลี่ยที่โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ได้โดยไม่ชนกัน (mean free path) โมเลกุลของแก๊สจะเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนด้วยกลไกการเคลื่อนที่แบบ Knudsen diffusion โดยโมเลกุลของแก๊สจะชนกับผนังมากกว่าที่จะชนกันเอง

3.) ถ้ารูพรุนของเมมเบรนมีเล็กมากในระดับ $5 - 20$ อังสตรอม ทำให้แก๊สที่มีโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ จึงมีการแยกแก๊สเกิดขึ้น เรียกกลไกนี้ว่า กลไกการคัดขนาดโมเลกุล molecular sieve (surface diffusion) ซึ่งจะมีทั้งการแพร่ในเฟสแก๊ส และการแพร่ของโมเลกุลที่ถูกดูดซับอยู่ตามผนังของรู



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการแพร่ของแก๊สผ่านเมมเบรนมีรูพรุน [7]

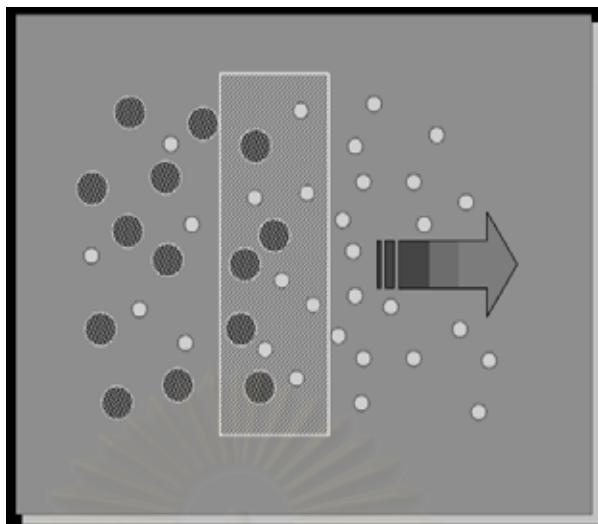
ในทางปฏิบัติ การเตรียมเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กพอที่จะกักกันโมเลกุลของแก๊สได้นั้นทำได้ยาก เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของตัวถูกละลายอื่น ๆ มาก นอกจากนี้กระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนมีรูพรุน ยังมีข้อจำกัดตรงที่ค่าการเลือกสรรต่ำ ทำให้ไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การใช้งานเชิงการค้าของกลไกแก๊สดีฟฟิวชันจึงมีอยู่อย่างเดียว คือ การเพิ่มความเข้มข้นยูเรเนียมเฮกซะฟลูออไรด์ ($^{235}\text{UF}_6$) ซึ่งมีราคาแพงมาก จาก $^{238}\text{UF}_6$ ซึ่งพบว่าจะให้ค่าการเลือกสรรต่ำมาก คือ 1.0064

2.3.2 กลไกของแก๊สเพอร์มิเอชัน

ถ้าเมมเบรนที่ใช้ในการแยกแก๊สเป็นเมมเบรนเนื้อแน่น เช่น เมมเบรนเชิงประกอบ (ซึ่งประกอบด้วยชั้นผิวที่มีโครงสร้างเนื้อแน่นอยู่บนชั้นรองรับ) และแรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทเป็นผลต่างของความดัน หรือความดันย่อย ซึ่งอาจต่ำเพียง 100 kPa หรืออาจสูงถึง 10 MPa เรียกการแยกแก๊สในกรณีนี้ว่า แก๊สเพอร์มิเอชัน โดยมีกลไกการแยกเป็นแบบการละลาย-การแพร่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- 1.) การละลายหรือการดูดซับของโมเลกุลแก๊สบนผิวของเมมเบรน
- 2.) การแพร่ผ่านเมมเบรน
- 3.) การคายออกของโมเลกุลแก๊สจากเมมเบรนทางด้านเพอร์มิเอต

โดยค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊สนั้น จะขึ้นอยู่กับวิธีการที่โมเลกุลของแก๊สต่างชนิดกันมีการละลายในเมมเบรน และสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเมมเบรนต่างกัน



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการแพร่ของแก๊สผ่านเมมเบรนเนื้อแน่น [7]

2.3.2.1 ค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส

ค่าการซึมผ่านแก๊ส (P : permeability) เป็นผลคูณของสัมประสิทธิ์การแพร่ (D : diffusion coefficient) และสัมประสิทธิ์การละลาย (S : solubility coefficient) แสดงดังสมการที่ 2.1 โดยสัมประสิทธิ์การละลาย เป็นคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับเมมเบรน ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นตัวแปรทางจลนศาสตร์ ซึ่งสามารถหาค่าได้จากการทดลอง

$$P = D * S \quad (2.1)$$

ค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส ($\alpha_{A/B}$: separation factor or permselectivity) เป็นค่าแสดงความสามารถของเมมเบรนในการแยกแก๊สผสม 2 ชนิดออกจากกัน แสดงดังสมการที่ 2.2

$$\alpha_{A/B} = \frac{P_A}{P_B} \quad (2.2)$$

โดย P_A และ P_B คือ ค่าการซึมผ่านของแก๊ส A และ B ตามลำดับ

เมื่อนำค่าการแยก มาเขียนในรูปสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลาย สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.3

$$\alpha_{A/B} = \frac{D_A * S_A}{D_B * S_B} \quad (2.3)$$

จากสมการดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายมีความสำคัญมาก และขึ้นอยู่กับชนิดของเมมเบรน ดังนั้นชนิดและโครงสร้างของเมมเบรนที่เหมาะสมกับแก๊สที่ต้องการแยกจึงเป็นสิ่งจำเป็น

2.3.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่-การละลายในเมมเบรน

1. ชนิดของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการผลิตเมมเบรนสำหรับแยกแก๊สส่วนมากจะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous) ซึ่งสายโซ่เคลื่อนไหวได้ ขนาดของช่องว่างสายโซ่เปลี่ยนแปลงได้ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g (glass transition temperature) สายโซ่ของพอลิเมอร์อสัณฐานเคลื่อนที่ได้จำกัด (หรืออยู่ในสถานะแก้ว) ค่าการซึมผ่านแก๊สต่ำ แต่มีค่าการเลือกสรรคู่แก๊สดี ถ้าพอลิเมอร์อสัณฐานอยู่ที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g สายโซ่มีความยืดหยุ่นสูง (อยู่ในสถานะยืดหยุ่น) ค่าการซึมผ่านแก๊สสูง แต่ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะแก้ว แสดงในตารางที่ 2.2 โดยจะพบว่าพอลิเมอร์ในสถานะยืดหยุ่นมีค่าการซึมผ่านแก๊สสูงกว่าพอลิเมอร์ในสถานะแก้วอย่างชัดเจน ในขณะที่เดียวกันค่าการเลือกสรรคู่แก๊สของพอลิเมอร์ในสถานะแก้วก็สูงกว่ามากเช่นกัน ดังนั้นในการพิจารณาค่าการซึมผ่านแก๊ส ควรพิจารณาสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายประกอบกัน

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊สของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง [8]

ค่าการซึมผ่านแก๊ส (P) หรือค่าการเลือกสรรคู่ ($\alpha = P_A / P_B$)	PDMS polydimethyl siloxane สถานะยืดหยุ่น	PC polycarbonate สถานะแก้ว
$P(\text{He})$	561	14
$P(\text{He}) / P(\text{CH}_4)$	0.41	50
$P(\text{He}) / P(\text{C}_2\text{H}_4)$	0.15	33.7
$P(\text{CO}_2)$	4550	6.5
$P(\text{CO}_2) / P(\text{CH}_4)$	3.37	23.2
$P(\text{CO}_2) / P(\text{C}_2\text{H}_4)$	1.19	14.6
$P(\text{O}_2)$	933	1.48
$P(\text{O}_2) / P(\text{H}_2)$	2.12	5.12

สัมประสิทธิ์การละลายโมเลกุลของแก๊สในเมมเบรนจะมีค่าต่ำกว่าโมเลกุลของของเหลวมาก ซึ่งโมเลกุลของแก๊สที่รวมตัวกันได้ดี (เกิด condensation หรือ clustering) จะละลายในเมมเบรนได้ดีขึ้น และถ้าแก๊สมี affinity กับพอลิเมอร์สูง จะทำให้การละลายเพิ่มขึ้นเช่นกัน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์มี affinity หรือละลายในพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ได้ดีกว่าพอลิเมอร์ไม่ชอบน้ำ

สัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สในเมมเบรน ขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลและชนิดของพอลิเมอร์ แสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4 พบว่าสารที่มีขนาดโมเลกุลของแก๊สเล็กกว่า จะมีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่า ยกตัวอย่างเช่น แก๊สออกซิเจนมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าแก๊สไนโตรเจน แต่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ดังนั้นค่าการซึมผ่านของออกซิเจนควรสูงกว่าไนโตรเจน และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแพร่แปรผกผันกับขนาดของโมเลกุล ซึ่งพบว่าเป็นจริงทั้งพอลิเมอร์ที่อยู่ในสถานะแก้วและสถานะยืดหยุ่น

สำหรับพอลิเมอร์ในสถานะยืดหยุ่น สัมประสิทธิ์การละลายจะมีผลต่อค่าการซึมผ่านมากกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ เช่น C_2H_4 มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและขนาดใหญ่กว่า He จึงมีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่า แต่ค่าการซึมผ่านของ C_2H_4 สูงกว่าของ He เพราะ C_2H_4 ละลายในพอลิเมอร์ได้ดีกว่า ในทางตรงกันข้ามสำหรับพอลิเมอร์ในสถานะแก้ว สัมประสิทธิ์การแพร่มีผลต่อค่าการซึมผ่านมากกว่าสัมประสิทธิ์การละลาย ทำให้ค่าการซึมผ่านของ He สูงกว่าของ C_2H_4

ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดโมเลกุลของแก๊ส [8]

ชนิดของแก๊ส	He	H ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	O ₂	N ₂	CO	CH ₄	C ₃ H ₈
ขนาดโมเลกุล (Å)	2.6	2.89	3.3	3.9	3.46	3.64	3.76	3.80	4.3

ตารางที่ 2.4 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ การละลาย และค่าการซึมผ่านแก๊ส [8]

แก๊ส	สัมประสิทธิ์การแพร่ D (m ² /s)	สัมประสิทธิ์การละลาย S (mol/ m ³ .Pa)	ค่าการซึมผ่านแก๊ส P (barrer)
พอลิเมอร์สถานะแก้ว			
He	470	0.18	250
H ₂	160	0.54	250
O ₂	7.6	1.58	37
CH ₄	1.9	3.98	22
C ₂ H ₄	0.23	17.8	12
พอลิเมอร์สถานะยืดหยุ่น			
He	213	0.06	35
H ₂	109	0.17	54
O ₂	18.4	0.47	26
CH ₄	8.0	1.14	27
C ₂ H ₄	4.3	4.84	62

2. คุณหภูมิ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายในเมมเบรน เป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) แสดงดังสมการที่ 2.4 นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการละลายจะแปรผันตรงกับส่วนกลับของคุณหภูมิ โดยช่วงที่คุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 – 50 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การแพร่อาจเพิ่มสูงขึ้นถึง 200 – 300% ขณะที่สัมประสิทธิ์ของการละลายอาจเพิ่มขึ้นกับคุณหภูมิเพียงเล็กน้อยสำหรับแก๊สโมเลกุลเล็ก สำหรับแก๊สหรือไอโมเลกุลใหญ่ สัมประสิทธิ์การละลายลดลงเมื่อคุณหภูมิเพิ่มขึ้น

$$D = D^0 \exp(-E_d / RT) \quad (2.4)$$

โดย D^0 = สัมประสิทธิ์การแพร่ที่ความเข้มข้นต่ำ

E_d = ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่

R = ค่าคงที่ของแก๊ส

T = คุณหภูมิสัมบูรณ์

2.4 มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน (Mixed matrix membrane) [9]

จากการนำเมมเบรนพอลิเมอร์มาใช้ในการแยกแก๊ส พบว่าเมมเบรนพอลิเมอร์ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของสมรรถนะการแยก จึงได้นักวิจัยหลายท่านพยายามที่จะเพิ่มสมรรถนะในการแยกแก๊สของเมมเบรนพอลิเมอร์ โดยการเติมสารตัวเติมอนินทรีย์จำพวกซีโอไลต์ ถ่านกัมมันต์ และซิลิกา ลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เรียกเมมเบรนอนินทรีย์ลักษณะนี้ว่า มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน

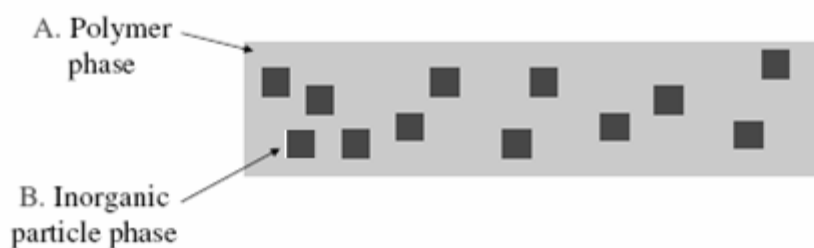
2.4.1 หลักการของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน

มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน คือ เมมเบรนที่เตรียมได้จากการเติมสารตัวเติมอนินทรีย์ (inorganic filler) ลงไปในเนื้อของพอลิเมอร์เมทริกซ์ เพื่อเพิ่มสมบัติในการแยกแก๊สของเมมเบรน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยเฟส A เป็นเฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่วนเฟส B เป็นเฟสของอนุภาคสารตัวเติมอนินทรีย์ ซึ่งจะกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยสารอนินทรีย์ที่จะนำมาใช้เป็นสารตัวเติมนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นซีโอไลต์ (zeolite) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (carbon molecular sieves) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซิลิกาชนิดไม่มีรูพรุน (non-porous silica) และแกรไฟต์ (graphite)

สำหรับขั้นตอนทั่วไปที่นิยมใช้ในการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน นั้นก็คือ

1. เตรียมสารละลายพอลิเมอร์ในลักษณะที่เป็นสารผสมเนื้อเดียว โดยการเติมสารตัวเติมที่เป็นสารอนินทรีย์ลงในสารละลาย
2. เทสารละลายลงไปในแผ่นกระจกที่ราบเรียบ
3. ระเหยตัวทำละลาย
4. อบเมมเบรนที่อุณหภูมิสูง เพื่อเป็นการขจัดตัวทำละลายที่ยังหลงเหลืออยู่

อย่างไรก็ตามสมบัติการแยกของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ตัวทำละลาย และอนุภาคของสารอนินทรีย์ที่นำมาใช้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน [9]

ศักยภาพของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน สามารถนำมาใช้ในการแยกแก๊สได้หลายชนิดด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นนำมาใช้ในการแยกอากาศ (อาทิเช่น แยกแก๊สออกซิเจน/ไนโตรเจน) แยกแก๊สธรรมชาติ (อาทิเช่น แยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์/มีเทน) การนำแก๊สไฮโดรเจนกลับมาใช้ใหม่ (อาทิเช่น แยกแก๊สไฮโดรเจน/คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน/ไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน/มีเทน) และกระบวนการแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (อาทิเช่น เอทิลีน/อีเทน ซิส/ทรานส์-บิวทิลีน ไอโซ-เพนเทน/นอร์มัล-เพนเทน และนอร์มัล-บิวเทน/มีเทน)

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน

ความสนใจหลักๆในการทำงานวิจัยเกี่ยวกับมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน นั้นคือ การรวมกันได้อย่างเหมาะสมระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาค สมบัติทางกายภาพของสารอนินทรีย์ (เช่น ขนาดของอนุภาค และการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค) และโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาที่พื้นผิวของพอลิเมอร์และอนุภาคของสารอนินทรีย์

2.4.2.1. ความเหมาะสมในการรวมกันได้ของพอลิเมอร์และสารตัวเติมอนินทรีย์

ถึงแม้ว่าการเลือกสารอนินทรีย์ที่เหมาะสมจะถูกให้ความสำคัญอย่างมากในการพัฒนามิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน แต่อย่างไรก็ตามพบว่า การเลือกพอลิเมอร์ที่เหมาะสมก็จัดได้ว่ามีความสำคัญต่อสมบัติของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น การเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนจาก glassy polymer พบว่าพอลิเมอร์และสารตัวเติมอนินทรีย์จะไม่สามารถผสมเข้ากันได้ จึงเกิดเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์และสารตัวเติมอนินทรีย์ ทำให้สมบัติการแยกแก๊สของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนลดลง แต่สมบัติเชิงกลที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่เตรียมได้จาก rubbery polymer ที่มีความยืดหยุ่นสูง ทำให้เกิดการสูญเสียสมบัติเชิงกล แต่จะได้สมบัติการแยกแก๊สของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่ดีขึ้น

2.4.2.2. ขนาดของอนุภาคสารตัวเติมอนินทรีย์

ในการศึกษาพอลิเมอร์/สารตัวเติมอนินทรีย์ จะทำการเลือกใช้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือขนาดเล็กก็ขึ้นอยู่กับว่ามิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนต้องการค่าการซึมผ่านแก๊ส หรือค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส ซึ่งขนาดของอนุภาคทั้งสองควรจะอยู่ในช่วงไม่ครอน ยกตัวอย่างงานวิจัยของ Tantekin-Ersolmaz SB และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของอนุภาคที่มีขนาดที่แตกต่างกัน (0.1, 0.4, 0.7, 0.8, 8.0 ไมโครเมตร) ของซิลิกาในยางสังเคราะห์ พบว่าค่าการซึมผ่านแก๊สของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนจะมีค่าลดลง แต่จะให้ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สสูงขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคของซิลิกาเล็กลง เนื่องจากการเชื่อมติดกันของพื้นผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์และซิลิกาที่ดีขึ้น จะทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัส

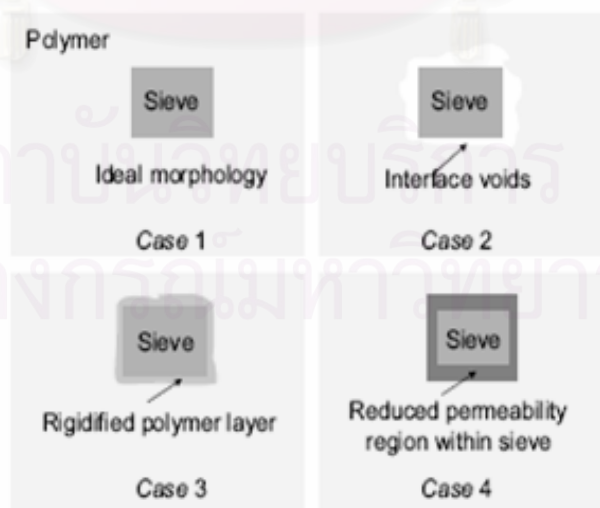
ระหว่างพอลิเมอร์และซิลิกาเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคของสารตัวเติมอินทรีย์มีขนาดเล็กลง

2.4.2.3. การรวมกันเป็นกลุ่มก้อนและการตกตะกอนของอนุภาคสารตัวเติมอินทรีย์

เมื่อเริ่มเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนพบปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งนั่นก็คือ การที่อนุภาคเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เนื่องมาจากเกิดการตกตะกอนหรือการเคลื่อนที่บริเวณพื้นผิว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นระหว่างสารตัวเติมอินทรีย์และพอลิเมอร์ ซึ่งการตกตะกอนของสารตัวเติมอินทรีย์จะเริ่มเกิดก็ต่อเมื่อเริ่มเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน เป็นผลมาจากการที่สารตัวเติมอินทรีย์และพอลิเมอร์ที่นำไปใช้ในการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนไม่สามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ สำหรับการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของสารตัวเติมอินทรีย์นั้น มีสาเหตุมาจากการที่สายโซ่พอลิเมอร์ไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูได้ เกิดเป็น non-selective ที่เป็นจุดบกพร่องของ มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน เหตุการณ์นี้จะยิ่งรุนแรงก็ต่อเมื่อมีการเติมสารตัวเติมอินทรีย์ลงไปในมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน ด้วยปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนมีสมบัติการแยกแก๊ส และสมบัติเชิงกลลดลง

2.4.2.4. สัณฐานวิทยาของพื้นผิวสัมผัสของพอลิเมอร์และสารตัวเติมอินทรีย์

สมบัติการถ่ายโอนของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน นั้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเมมเบรนในระดับนาโน ซึ่งโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาบริเวณผิวสัมผัสถือได้ว่าเป็นจุดที่สำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติการถ่ายโอนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างในระดับนาโนของผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาค



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน [9]

ในกรณีนี้ที่ 1 จะแสดงให้เห็นโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาในอุดมคติของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน ซึ่งพบว่าถ้าสามารถเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนในลักษณะนี้ได้ ก็จะทำให้ได้มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่มีคุณสมบัติการแยกแก๊สและสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีนี้ที่ 2 พบว่าสายโซ่พอลิเมอร์แยกตัวออกมาจากพื้นผิวของซีโอไลต์ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างพื้นผิว (interface voids) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากความไม่เหมาะสมในการรวมกันได้ของพอลิเมอร์และสารตัวเติมอนินทรีย์ ส่งผลให้คุณสมบัติการแยกแก๊ส และสมบัติเชิงกลลดลง ส่วนกรณีนี้ที่ 3 เนื่องมาจากความไม่อ่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (polymer chain rigidification) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์บางส่วนไปพาดเกาะอยู่ที่ผิวของซีโอไลต์ ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง แต่ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับในกรณีนี้ที่ 4 จะแสดงให้เห็นการเกิดการอุดตันของรูพรุนในซีโอไลต์ (partial pore blockage of zeolite) อันเนื่องมาจากการที่สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ไปบดบังรูพรุนบางส่วนของซีโอไลต์ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง แต่ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สเพิ่มขึ้น

2.5 ไคตินและไคโตซาน [10, 11]

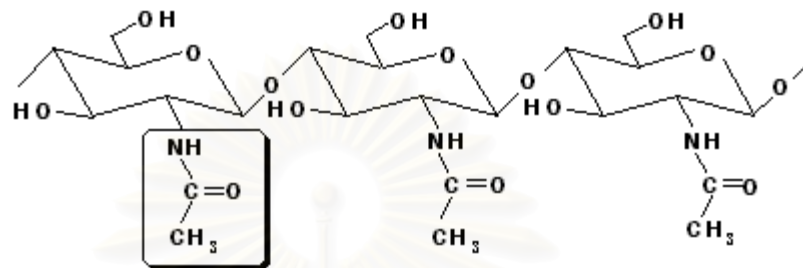
ไคตินเป็นวัสดุชีวภาพที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ มีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส โดยมากจะไม่พบเป็นโครงสร้างหลักเดี่ยวๆ ในสิ่งมีชีวิต แต่จะพบในรูปที่เป็นสารประกอบปะปนอยู่กับสารอื่นๆ เช่น อยู่ร่วมกับหินปูน หรือแคลเซียม และโปรตีน ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน แหล่งวัตถุดิบสำคัญของไคติน ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญของไคติน [11]

สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ประเภทมีปล้อง (Arthropods)	แมลง (Insect)	จุลินทรีย์ (Microorganisms)
หนอนทะเล (Annelida)	แมลงป่อง	สาหร่ายสีเขียว
หอย (Mollusk)	Brachiopods	สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำตาล
Coelentera	มด	ยีสต์ (β -type)
Crustaceans	แมลงสาบ	เชื้อรา (ผนังเซลล์)
กุ้งก้ามกราม (Lobster)	แมลงปีกแข็ง	ก้านชูสปอร์ของ penicillium
กุ้ง (Shrimp)	แมงมุม	สปอร์
กุ้งนาง (Prawn)		Chytriciaceae
ปู (Crab)		Blastocladiaceae

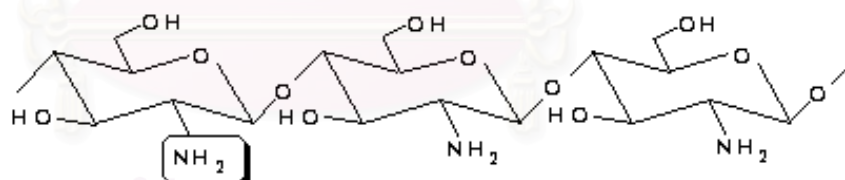
2.5.1 สมบัติทางเคมี

ไคติน (Chitin) คือสารพอลิเมอร์ชีวภาพ ประเภทพอลิแซคคาไรด์ จัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ประเภทโครงสร้างที่เป็นเส้นใยคล้ายคลึงกับเซลลูโลสจากพืช มีชื่อทางเคมีว่า Poly [β -(1 \rightarrow 4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucopyranose] แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไคติน [10]

ไคโตซาน (Chitosan) คือสารพอลิเมอร์ชีวภาพที่สกัดจากไคติน ได้จากการนำอนุพันธ์ของไคตินมากำจัดเอาหมู่ acetyl ของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ออกตั้งแต่ 50% ขึ้นไป มีชื่อทางเคมีว่า poly [β -(1 \rightarrow 4)-2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose] แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [10]

ซึ่งจะเห็นได้ว่าไคตินและไคโตซาน มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกับเซลลูโลส แต่จะแตกต่างกันที่หมู่แทนที่ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่สองในวงแหวนไพราโนส (Pyranose ring) ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของเซลลูโลส ไคติน และไคโตซาน โดยหมู่แทนที่ที่ตำแหน่งนี้ของเซลลูโลสจะเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) แต่ของไคตินเป็นหมู่แอสีทาไมด์ (Acetamide group) ส่วนของไคโตซานเป็นหมู่อะมิโน (Amino group)

2.5.2 สมบัติทางกายภาพ

1. การละลาย

การละลายเป็นกระบวนการหนึ่งที่จะทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของสารกับตัวทำละลาย ดังนั้น ประเด็นที่สำคัญที่จะทำให้พอลิเมอร์หนึ่ง ๆ ละลายได้ดี จึงขึ้นอยู่กับการยอมให้โมเลกุลของตัวทำละลายแทรกผ่านเข้าไปในระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์นั่นเอง

ไคตินและไคโตซานมีโครงสร้างที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ดังนั้นโมเลกุลของตัวทำละลายจึงไม่สามารถแทรกผ่านและทำพันธะกับสายโซ่ของไคตินหรือไคโตซานได้ เราจึงพบว่าไคตินและไคโตซานจะไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป และบ่อยครั้งที่สารจะบวมหรือพองตัวในตัวทำละลายเท่านั้น แต่ไม่ละลายอย่างสมบูรณ์

ตัวทำละลายที่ดีสำหรับไคตินและไคโตซาน จึงอาศัยหลักการที่จะทำให้เกิดพันธะไฮออนไปทดแทนที่ตำแหน่งไฮโดรเจน เช่น ที่ตำแหน่งอะมิโน หรือตำแหน่งแอสีทาไมด์ เมื่อตำแหน่งดังกล่าวกลายเป็นไอออนบวก (Protonation) แล้ว พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายและไอออนบวกจะสร้างพันธะไฮออนกับไอออนลบในระบบตัวทำละลาย การละลายจึงเกิดขึ้น

ด้วยหลักการดังกล่าว ในกรณีของไคติน เราพบว่าในตัวทำละลายทั่วไป เช่น น้ำ กรดเจ็จจาง ต่างทั้งเจ็จจางและเข้มข้น แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ ไม่สามารถที่จะทำให้ไคตินละลายได้ แต่ในขณะเดียวกัน กรดเข้มข้นจำพวกกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก และกรดฟอร์มิก จะทำให้เกิดการละลายได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากกรดเข้มข้นดังกล่าว มีปริมาณโปรตอนมากเพียงพอที่จะเกิดไอออนบวกที่ตำแหน่งแอสีทาไมด์ และทำให้ตำแหน่ง C-2 ของไคติน กลายเป็นไอออนบวก พันธะไฮโดรเจนจึงสลายลง ในขณะเดียวกันพันธะไฮออนถูกสร้างขึ้นระหว่างไอออนลบของกรดประเภทนั้น ๆ ทำให้การละลายเกิดขึ้น

ตัวทำละลายอีกประเภทหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับไคตินคือ ประเภทเกลือในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น สารละลายลิเทียมคลอไรด์อิมิตัวใน N,N'-Dimethylformamide หรือสารละลายแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัวในเมทานอล การที่ไคตินละลายได้ เนื่องจากเกลือในตัวทำละลายนี้สร้างพันธะไฮออนแทนที่พันธะไฮโดรเจนได้ และได้เป็นสารละลายไคติน

กรณีของไคโตซานก็เช่นกัน ตัวทำละลายที่รู้จักกันดีคือ กรดมด และกรดแอสีติก ทั้งนี้เนื่องจากกรดดังกล่าวสามารถแตกตัวทำให้หมู่อะมิโนเป็นไอออนบวก และสามารถสร้างพันธะไฮออนกับไอออนลบที่แตกตัวอยู่ในกรด นอกจากนี้กรดทั้งสองประเภทยังไม่ทำลายโครงสร้างของไคโตซาน ง่าย และราคาถูก จึงเป็นตัวทำละลายที่ใช้อย่างแพร่หลายและเหมาะสำหรับการเตรียมไคโตซานเป็นชิ้นงานอื่น ๆ โดยกระบวนการปรับโครงสร้างทางกายภาพ เช่น จากสารละลายไคโตซาน เราสามารถขึ้นรูปเป็นเจล บีคส์ หรือเมมเบรนได้

กรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเพอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก สามารถละลายโคโตะซานได้เช่นกัน แต่ภายใต้อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามในบางครั้ง อาจตกตะกอนขาวคล้ายเจลเกิดขึ้น เนื่องจากการละลายที่ไม่สมบูรณ์

2. ความหนืด

การไหลของพอลิเมอร์เป็นตัวชี้วัดขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี กล่าวคือ หากสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีความยาว (ซึ่งนั่นก็คือ Degree of polymerization) มาก จะแสดงสมบัติการไหลที่ช้า ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเตรียมสารละลายของพอลิเมอร์ประเภทนั้น ๆ สารละลายจะมีความหนืดสูงผันแปรไปตามมวลโมเลกุล (Molecular weight)

สำหรับความหนืดของสารละลายโคโตะซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ร้อยละการกำจัดหมู่แอซีทิล มวลโมเลกุล ความเข้มข้น ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้ว ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายพอลิเมอร์จะให้ผลความหนืดที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืดของโคโตะซานในกรดแอซีติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ในขณะที่ความหนืดของโคโตะซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น

3. สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนเป็นสมบัติที่บ่งชี้ถึงความเสถียรของโคติน-โคโตะซาน เมื่อพิจารณาโคติน-โคโตะซานเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ประเภทหนึ่งแล้ว โคติน-โคโตะซานจะเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง จึงควรแสดงสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่งจะให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เมื่อให้ความร้อนแก่โคติน-โคโตะซานจนถึงระดับหนึ่ง แต่ในความเป็นจริงเมื่อให้ความร้อนแก่โคติน-โคโตะซาน จะพบว่าโคติน-โคโตะซานจะไม่แปรสภาพเป็นสารหนืด แต่จะไหม้และสลายไปในที่สุด

2.6 ซีโอไลต์ (Zeolite) [12]

ซีโอไลต์ คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้าง

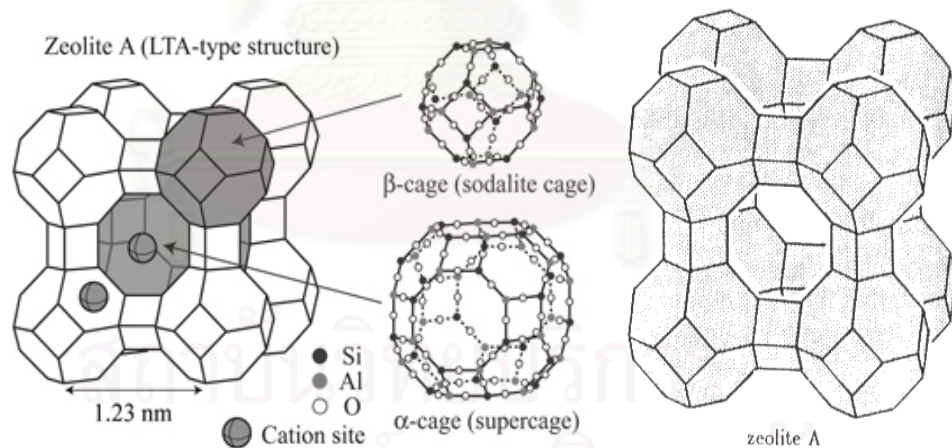
สามเหลี่ยมสี่หน้าจะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม นอกจากซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 นอกจากนี้ภายในช่องว่างในโครงผลึกยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย จึงสามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้ ทำให้เป็นที่มาของชื่อซีโอไลต์นั่นเอง สำหรับสูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ แสดงดังสมการที่ 2.5



เมื่อ n คือ เวเลนซ์ของแคตไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะ แอลคาไลน์หรือแอลคาไลน์เอิร์ท

x คือ จำนวนโมลของ SiO_4 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์เอ [13]

โดยการจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้น อาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งจะให้น้ำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันไป ดังนี้

1. ตัวแลกเปลี่ยนประจุ

เนื่องจากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์นั้นเกาะอยู่อย่างหลวมๆ จึงพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ ด้วยหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ โดยโลหะอัลคาไล เช่น โซเดียม หรือโพแทสเซียม ที่เกาะกับซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นตัวการทำให้น้ำกระด้าง และด้วยหลักการแลกเปลี่ยนประจุนี้ ทำให้สามารถใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียกับโลหะโซเดียมที่อยู่ในโพรงของซีโอไลต์ รวมทั้งสามารถใช้ขจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) จากไอเสียเครื่องยนต์ให้กลายเป็นแก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจนที่ปลอดภัย และขจัดไอโซโทปกัมมันตรังสีของซีเซียมและสตรอนเชียมจากกากนิวเคลียร์ได้อีกด้วย

2. ตัวดูดซับ

สำหรับการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับนั้น ใช้ทั้งในกระบวนการทำให้แห้ง (dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการแยกสาร (seperation) ซึ่งซีโอไลต์นั้นมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่าง อันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล โดยสามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการทำให้แห้งนั้น เนื่องจากซีโอไลต์ที่มีประจุบวกสามารถดูดซับน้ำได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ กล่าวคือเมื่อมีการให้ความร้อน น้ำก็จะระเหยออกไปหมด แต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้ง ก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก หรืออาจนำไปใช้ดูดซับสารอื่นแทน เช่น ไอโอดีน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย แบบย้อนกลับได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังใช้ในการแยกแก๊ส ซึ่งโมเลกุลของแก๊สต่างชนิดจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตกับไอออนโลหะ ในทางกลับกันซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ แต่จะดูดซับเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sen และคณะ (2007) [14] ได้ทำการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน (mixed matrix membrane) ของพอลิคาร์บอนเนต และซีโอไลต์ 4A โดยมีการเติมพารา-ไนโตรแอนิลิน (*p*-nitroaniline) เป็นสารเติมแต่ง ปริมาณของพารา-ไนโตรแอนิลิน และซีโอไลต์ 4A อยู่ในช่วงร้อยละ 1-5 และ 5-30 โดยน้ำหนักของเมมเบรน ตามลำดับ พบว่าการเติมพารา-ไนโตรแอนิลินลงไป จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์และพื้นผิวของซีโอไลต์สามารถเชื่อมติดกันได้ดี ส่งผลให้มิกซ์เมทริกซ์

เมมเบรนมีค่าการซึมผ่านแก๊ส (permeability) ลดลง แต่จะให้ค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส (selectivity) สูงขึ้น โดยมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนพอลิคาร์บอเนต/ซีโอไลต์ 4A ที่มีปริมาณของพารา-ไนโตรแอนิลิน และซีโอไลต์ 4A เท่ากับร้อยละ 1 และ 20 โดยน้ำหนักของเมมเบรน แสดงค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส ของ H_2/CH_4 และ CO_2/CH_4 เป็น 3 และ 2 เท่าของเมมเบรนพอลิคาร์บอเนต ตามลำดับ

Li และคณะ (2005) [15] ได้ทำการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนของพอลิเอเทอร์ซัลโฟน และซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของ พอลิเมอร์ เพื่อศึกษาผลของวิธีการเตรียมเมมเบรน, ปริมาณของซีโอไลต์ และขนาดรูพรุนของ ซีโอไลต์ที่มีต่อสมบัติการแยกแก๊สของเมมเบรน พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของมิกซ์เมทริกซ์ เมมเบรนที่ทำให้เย็นลงตามธรรมชาติ (natural cooling) จะแสดงพื้นผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ และซีโอไลต์ที่ดี และให้ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สสูงกว่ามิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน ที่ทำให้เกิดการเย็นตัวลงทันทีทันใด (immediate quenching) เมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนจะทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง แต่ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สสูงขึ้น เนื่องจากผลของความไม่อ่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (polymer chain rigidification), การอุดตันของรูพรุนในซีโอไลต์ (partial pore blockage of zeolite) และเมื่อรูพรุนของซีโอไลต์มี ขนาดใหญ่ขึ้น มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่ได้จะแสดงค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส เพิ่มขึ้น

Li และคณะ (2005) [16] ต้องการปรับปรุงสมบัติการแยกแก๊สของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน ที่เตรียมได้ก่อนหน้านี้ โดยการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์ด้วยสารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) พบว่ามิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนภายหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์ด้วยสารคู่ควบ ไซเลน จะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ดีขึ้น ทำให้ได้ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรร คู่แก๊สเพิ่มขึ้น

Anson และคณะ (2004) [17] ได้ทำการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนของพอลิเมอร์ร่วม อะครีโลไนไทรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS copolymer) และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) สำหรับนำมาใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทน พบว่าที่อุณหภูมิ 20 องศา เซลเซียส มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่มีปริมาณของถ่านกัมมันต์ 1 และ 2 เท่ากับร้อยละ 10 และ 40 โดยน้ำหนักของเมมเบรน จะให้ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 permeability) และ ค่าการคัดเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน (CO_2/CH_4 selectivity) สูงสุดเท่ากับ 11, 21,

35 และ 51 ตามลำดับ ส่วนความดันไม่มีผลต่อค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนอย่างมีนัยสำคัญ

Pechar และคณะ (2005) [18] ได้ทำการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน โดยมีซีโอไลต์แอลกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มของพอลิอิมิด (polyimide) และพอลิไดเมทิลซิล็อกเซน (polydimethylsiloxane) จากการศึกษาผลของการเติมพอลิไดเมทิลซิล็อกเซนลงไปในมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน ด้วยเทคนิค Gel permeation chromatography (GPC) และเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่าการเติมพอลิไดเมทิลซิล็อกเซนเป็นผลให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิไดเมทิลซิล็อกเซนเป็นสองเท่าของพอลิอิมิด และปรากฏพีคของ C-N-C ที่ 1373 cm^{-1} ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างพอลิอิมิดและพอลิไดเมทิลซิล็อกเซน เมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่มีการเติมซีโอไลต์แอลลงไปในพอลิอิมิด-ซิล็อกเซน (polyimide siloxane) ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักของเมมเบรน ตามลำดับ พบว่าไม่ปรากฏการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของซีโอไลต์ เนื่องจากซีโอไลต์สามารถเชื่อมติดกับพอลิเมอร์ร่วมส่วนที่เป็นพอลิไดเมทิลซิล็อกเซน ซึ่งมีความยืดหยุ่นได้ดี และเมื่อศึกษาสมบัติการแยกแก๊สของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน พบว่าเมื่อปริมาณของพอลิไดเมทิลซิล็อกเซนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 41 โดยน้ำหนักของเมมเบรนมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนจะทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สสูงขึ้นในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์แอลเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของเมมเบรนมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนจะทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สลดลง เนื่องจากสายโซ่ที่ยืดหยุ่นของพอลิไดเมทิลซิล็อกเซน จะไปทำให้รูพรุนของซีโอไลต์เกิดการอุดตัน

Tin และคณะ (2003) [19] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการแยกแก๊สของ matrimid membrane โดยการเชื่อมขวางเมมเบรนด้วยสารละลายพารา-ไซลีนไดเอมีน (*p*-xylenediamine) ที่อุณหภูมิห้อง ศึกษาสมบัติของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางและแบบไม่เชื่อมขวางด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่าเมมเบรนหลังจากทำการจุ่มลงในสารละลายพารา-ไซลีน ไดเอมีนผ่านไปเป็นเวลา 61 วัน ก็จะมีการเชื่อมขวางที่สมบูรณ์ เห็นได้จากการยืดออกของพีคแอมไนด์ (N-H stretching) ที่ 3300 cm^{-1} เมื่อศึกษาสมบัติการมีเสถียรภาพทางความร้อน ด้วย Thermomechanical analysis (TMA) พบว่าเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 75-150 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางจะให้ค่าที่ต่ำกว่าเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวาง เนื่องจากการเชื่อมขวางจะไปทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบอยู่ใน

แนวเดียวกัน และเมื่อศึกษาผลของเวลาที่นำเมมเบรนไปแช่ในสารละลายพารา-ไซลีนไดแอมีนต่อสมบัติการแยกแก๊สของเมมเบรน พบว่าเมื่อทำการแช่เป็นเวลา 1 วัน เมมเบรนจะให้ค่าการซึมผ่านแก๊สสูงที่สุด ต่อจากนั้นก็ลดลงตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สของเมมเบรนเชื่อมขวางก็จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าการเลือกสรรคู่แก๊สของ He/N₂ จะให้ค่าการเลือกคู่แก๊สที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ O₂/N₂, CO₂/CH₄ และ CO₂/N₂ เนื่องจากเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น ทำให้เมมเบรนเกิดการเชื่อมขวางกันได้มากขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและอยู่ใกล้ชิดกัน โมเลกุลของแก๊สจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ยากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเมมเบรน

1. ไคโตซาน (Chitosan) (Commercial grade) : Eland Corporation LTD
2. ซีโอไลต์ เอ (Linde type A) (Commercial grade) : Thai Silicate LTD
3. กรดแอสติก (CH_3COOH) ความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
4. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (Commercial grade)

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวัดค่าการซึมผ่านแก๊ส

1. แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99 : PRAXAIR
2. แก๊สไนโตรเจน (N_2) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99 : PRAXAIR
3. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99 : PRAXAIR
4. แก๊สมีเทน (CH_4) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99 : PRAXAIR

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเมมเบรน

1. เครื่องชั่ง (Analytical balance) : METTLER TOLEDO รุ่น AB204-S
2. เครื่องปั่นกวนระบบแม่เหล็ก : Schott รุ่น 625051010
3. แผ่นกระจก
4. อ่างน้ำอัลตราโซนิก (Ultrasonic water bath) : BRANSONIC รุ่น 521
5. ตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) : BINDER รุ่น ED 115

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของเมมเบรน

1. ไมโครมิเตอร์
2. เครื่องชั่ง (Analytical balance)
3. โถดูดความชื้น (Desiccator)
4. ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านแก๊ส

3.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

1. เครื่องทดสอบ Universal Testing : LLOYD Instruments LR 5K (ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่อง Scanning Electron Microscopy : JEOL รุ่น JSM-6400 (ศูนย์เครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. เครื่อง Surface Area Analyzer (วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร)

3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ชนิดของเมมเบรนที่เตรียมในงานวิจัย

เมมเบรนที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 5 ชนิด ดังนี้

1. เมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง
2. เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก
3. เมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง-ซีโอไลต์เอ ที่มีปริมาณซีโอไลต์เอร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน
4. เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์เอ ที่มีปริมาณของซีโอไลต์เอร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน
5. เมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง และเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์เอ ที่บวมตัวด้วยน้ำ

3.4.2 วิธีการเตรียมเมมเบรน

1. เมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง

- เตรียมสารละลายไคโตซานร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดแอสซีติกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
- กวนสารละลายด้วยความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- กรองส่วนที่ไม่ละลายออกด้วยผ้าพอลิเอสเตอร์ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ฟองอากาศ
- เทสารละลายพอลิเมอร์ปริมาณ 17-18 กรัมบนแผ่นกระจกขนาด 15×15 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้ได้ความหนาของเมมเบรนเมื่อแห้งแล้วประมาณ 30 ไมครอน
- อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- แช่เมมเบรนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 20 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง แล้วอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้เมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง

2. เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนี้

มีขั้นตอนเช่นเดียวกับการเตรียมเมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวางในข้อ 1 . แต่จะเพิ่มขั้นตอนของการนำเมมเบรนไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเป็นกลาง อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้เมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง

3. เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตแบบไม่เชื่อมขวาง และแบบเชื่อมขวาง

มีวิธีการเช่นเดียวกับการเตรียมเมมเบรนไคโตซานแบบไม่เชื่อมขวาง และแบบเชื่อมขวาง ในข้อ 1. และ 2. ตามลำดับ แต่จะเพิ่มขั้นตอนการผสมผงซีโอไลต์เอ โดยจะแบ่งกรดแอสซีติกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จากปริมาณกรดแอสซีติกในการเตรียมสารละลายไคโตซานร้อยละ 3 โดยน้ำหนักปริมาณหนึ่งมาผสมกับผงซีโอไลต์เอ ให้อยู่ในลักษณะที่เป็นสารแขวนลอย จากนั้นทำการผสมส่วนของสารละลายไคโตซานที่ผ่านการกรองด้วยผ้าพอลิเอสเตอร์กับสารแขวนลอยของผงซีโอไลต์เอ ในอ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic water bath) แล้วทำตามขั้นตอนเดิม จะได้เมมเบรนไคโตซานคอมโพสิตแบบไม่เชื่อมขวาง และแบบเชื่อมขวาง

4. เมมเบรนอิมิตัวด้วยน้ำ

- แห้เมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง และเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง- ซีโอไลต์เอทีเตรียมได้ ในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ชั้บสารละลายที่ผิวหน้าเมมเบรนให้แห้งด้วยกระดาษซับ ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ



รูปที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมเมมเบรนไคโตซานแบบเชื่อมขวาง

3.4.3 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของซีโอไลต์

วิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer ณ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.4 การศึกษาโครงสร้างทางเคมี

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเมมเบรนสามารถหาได้ โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.4.5 การศึกษาสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้านบนของเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด Scanning Electron Microscope, SEM ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

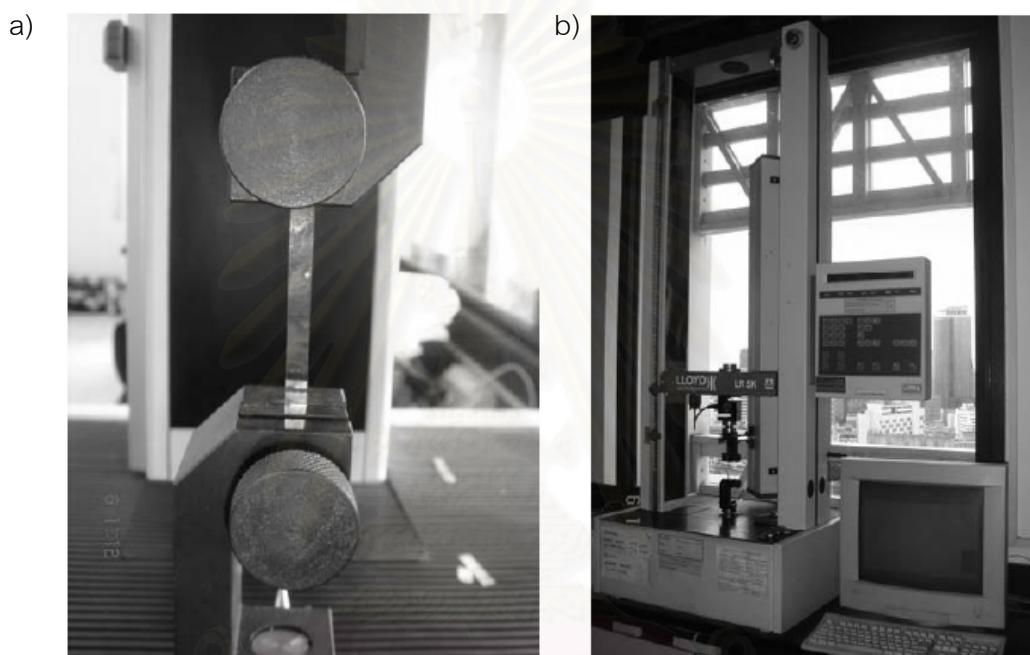
3.4.6 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน

1. ชั่งน้ำหนักของเมมเบรนแห้ง
2. แช่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำเมมเบรนมาซับน้ำที่ผิวหน้าเมมเบรนออกให้แห้งด้วยกระดาษซับ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในเมมเบรน
4. นำค่าน้ำหนักของเมมเบรนแห้งและหลังการดูดซับน้ำ มาคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน ตามสมการที่ 3.1

$$\text{water uptake} = \frac{\text{weight}_{\text{wet}} - \text{weight}_{\text{dry}}}{\text{weight}_{\text{dry}}} \quad (3.1)$$

3.4.7 ความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

1. ตัดเมมเบรนให้มีขนาด 5×150 ตารางมิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 a)
2. วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
3. ทดสอบตาม ASTM D882 ด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามรูปที่ 3.2 b) ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 5 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.2 เครื่อง Universal Testing LLOYD Instruments LR 5K

3.4.8 การทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าการซึมผ่านแก๊สของเมมเบรน โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ การวัดโดยใช้ความดันคงที่ และการวัดโดยใช้ปริมาตรคงที่ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องในการวัดเป็นแบบความดันคงที่ตามรูปที่ 3.3 โดยผ่านแก๊สที่ต้องการทดสอบเข้าไปทางด้านบนของเมมเบรน ควบคุมความดันขาเข้าของแก๊สให้คงที่ ส่วนด้านขาออกเปิดสู่บรรยากาศ และทำการวัดอัตราการไหลของแก๊สขาออก เพื่อนำไปคำนวณค่าการซึมผ่านแก๊สดังสมการที่ 3.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนที่ทดสอบ คือ 3.1 เซนติเมตร

โดยในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊สแห้งและเปียก 4 ชนิด ตามสภาวะที่แตกต่างกัน ดังนี้

- ค่าการซึมผ่านของแก๊สมีเทน ที่ความดันขาเข้า 1, 2 และ 3 บาร์ และที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส
- ค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดันขาเข้า 1, 2 และ 3 บาร์ และ ที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส
- ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน ที่ความดันขาเข้า 1 บาร์ และที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส
- ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน ที่ความดันขาเข้า 1 บาร์ และที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส

$$P = \frac{QL}{\Delta PA} \quad (3.2)$$

P = สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ ($\text{cm}^3 \text{ (STP)*cm} / (\text{s*cm}^2*\text{cmHg})$)

Q = อัตราการไหลของแก๊สผ่านเมมเบรน (Sccs)

L = ความหนาของเมมเบรน (cm)

ΔP = ความดันต่าง (cmHg)

A = พื้นที่ของเมมเบรน (cm^2)



รูปที่ 3.3 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส

จากค่าการซึมผ่านแก๊สที่ได้ นำมาคำนวณค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส ตามสมการที่ 3.3

$$\alpha_{A/B} = \frac{P_A}{P_B} \quad (3.3)$$

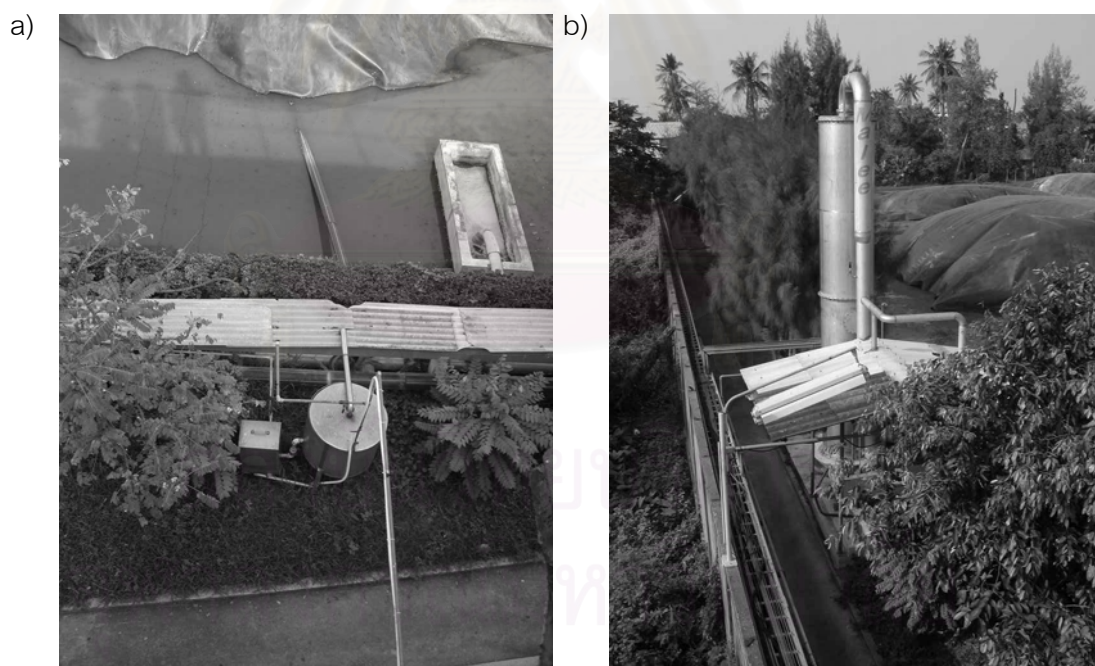
โดยที่ $\alpha_{A/B}$ คือค่าการเลือกสรรแก๊ส A ต่อ B

P_A และ P_B คือค่าการซึมผ่านแก๊ส A และ B (แบเรอร์) ตามลำดับ

1 แบเรอร์ = 10^{-10} (cm³(STP)*cm)/(s*cm²*cmHg)

3.4.9 การทดสอบสมรรถนะการแยกแก๊สกับระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง

นำเครื่องมือในการวัดแบบความดันคงที่ ไปทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊สกับระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง ณ โรงงานมาลีสามพราน จำกัด โดยตำแหน่งที่ทำการทดสอบที่ 1 คือ ตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพออกมาจากบ่อหมัก และตำแหน่งที่ 2 คือ ตำแหน่งซึ่งแก๊สชีวภาพผ่านหอพ่นน้ำ เพื่อกำจัดแก๊สกรดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 a) และ 3.4 b) ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งที่ทำการทดสอบแยกแก๊สกับระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 สมบัติของโคโตซานและซีโอไลต์

สมบัติของโคโตซานและซีโอไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยโคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) และร้อยละการกำจัดหมู่แอซีทิล (% deacetylation) เท่ากับ 9.5×10^5 ดอลตัน และ 90 ± 5 ตามลำดับ

สมบัติของซีโอไลต์ทดสอบด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer พบว่าซีโอไลต์มีขนาดของรูพรุน, พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 2551.6 อังสตรอม, 13.9 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.0137 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของโคโตซานและซีโอไลต์เอ

สมบัติ	หน่วย	โคโตซาน(*)	ซีโอไลต์เอ
น้ำหนักโมเลกุล	ดอลตัน	9.5×10^5	
ร้อยละการกำจัดหมู่แอซีทิล	%	90 ± 5	
ขนาดรูพรุน	อังสตรอม (Å)		2551.6
พื้นที่ผิวของซีโอไลต์	m ² /g		13.9
ปริมาตรรูพรุน	cm ³ /g		0.0137

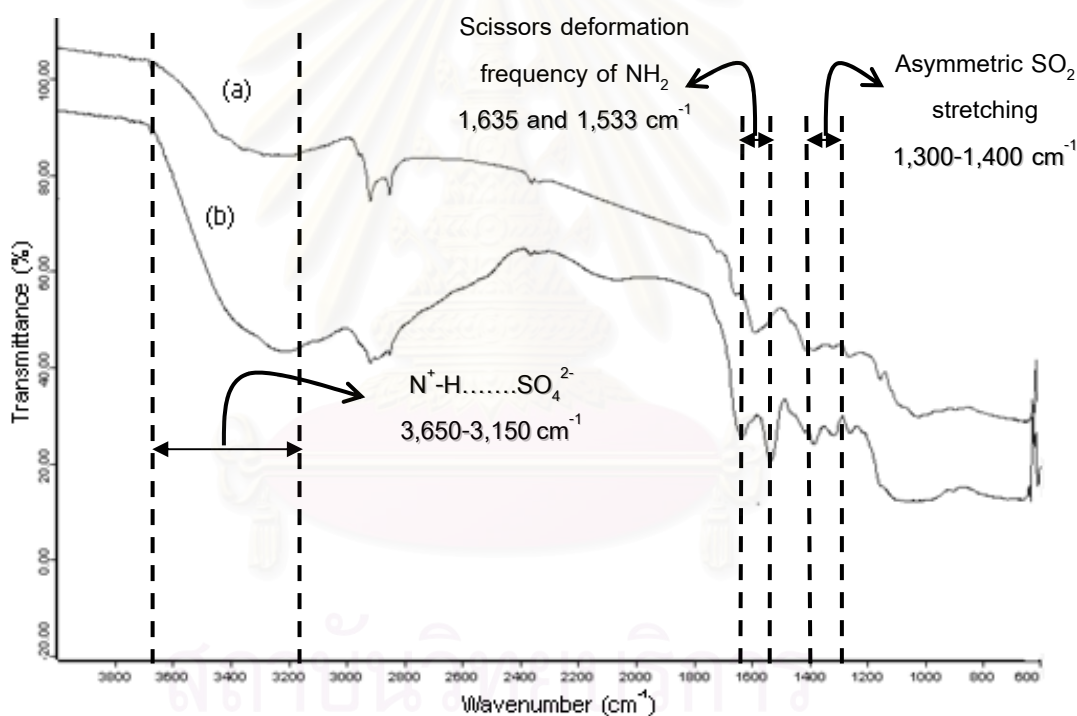
* ข้อมูลจากบริษัท Eland Corporation LTD

4.2 โครงสร้างทางเคมี

รูปที่ 4.1(a) แสดง FTIR spectrum ของเมมเบรนโคโตซานไม่เชื่อมขวาง โดยปรากฏพีกสำคัญที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของโคโตซาน ดังนี้ พีกของหมู่ Amine deformation (NH_2) ที่หมายเลขคลื่น 1592 cm^{-1} พีกของหมู่ C-O-C ใน Membered ring stretching ที่ช่วงหมายเลขคลื่นประมาณ 1074 – 1076 cm^{-1} พีกของหมู่ C-H stretching ที่ช่วงหมายเลขคลื่นประมาณ

2849 – 2916 cm^{-1} และพีคของหมู่ O-H และ N-H stretching ที่ช่วงหมายเลขคลื่นประมาณ 3358 – 3589 cm^{-1}

ผลจากการเชื่อมขวางเมมเบรนด้วยกรดซัลฟิวริก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (b) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนี้ เกิดพีคคู่ของหมู่ NH_3^+ ที่หมายเลขคลื่น 1533 และ 1635 cm^{-1} อย่างชัดเจน เนื่องจากหมู่เอมีนในไคโตซานถูก protonated โดยโปรตอนจากกรดซัลฟิวริก นอกจากนี้ยังเกิดพีคลักษณะกว้าง ที่ช่วงหมายเลขคลื่นใกล้เคียง 3150 cm^{-1} และเกิดการ shift ของ C-H stretching ไปยังหมายเลขคลื่นที่สูงขึ้น เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ NH_3^+ และ SO_4^{2-} รวมทั้งยังมีพีคของหมู่กรดซัลฟอนิก ได้แก่ asymmetric SO_2 stretching ที่ช่วงหมายเลขคลื่นประมาณ 1300 – 1400 cm^{-1} พีคของเกลือกรดซัลฟอนิกที่หมายเลขคลื่นประมาณ 1386 cm^{-1} ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ากรดซัลฟิวริกสามารถเข้าไปเชื่อมขวางเมมเบรนไคโตซาน



รูปที่ 4.1 FTIR spectra ของเมมเบรนไคโตซาน

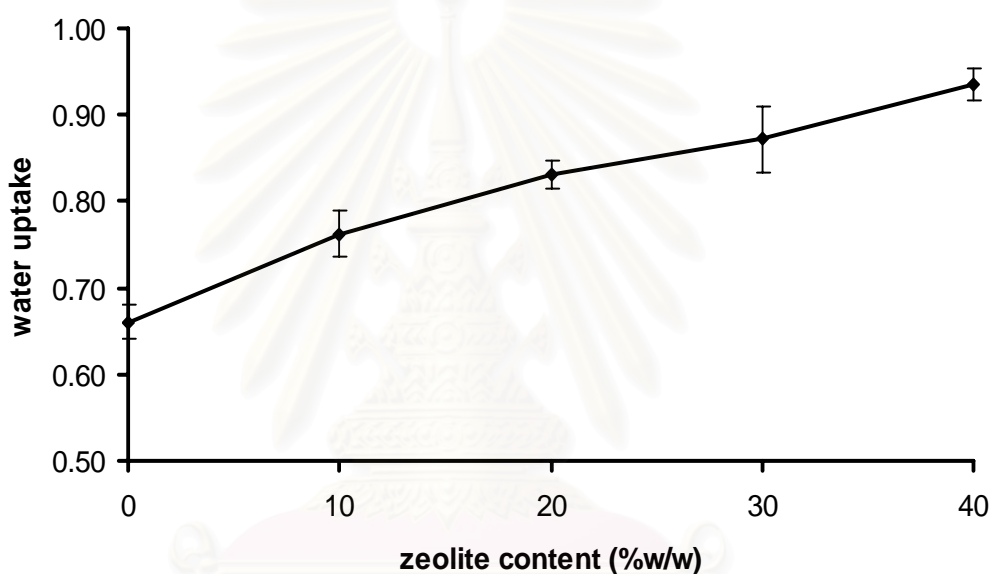
(a) แบบไม่เชื่อมขวาง (b) แบบเชื่อมขวาง

4.3 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน

รูปที่ 4.2 แสดงปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง และเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ พบว่าเมื่อเติมซีโอไลต์ลงไป จะทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนเพิ่มขึ้น ตามปริมาณซีโอไลต์ที่มากขึ้น จาก 0.70 ± 0.02 เป็น 0.94 ± 0.02 เมื่อปริมาณ

ซีโอไลต์ที่เติมเท่ากับ 0 และ 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักโคโตซาน ตามลำดับ เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารที่มีความเป็นรูพรุนสูง และโครงสร้างของซีโอไลต์แสดงความมีขั้วซึ่งเกิดจากไอออนของโซเดียม (Na^+) ที่เป็น counter ion ของซีโอไลต์ [21] เป็นผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำกับพื้นผิวของซีโอไลต์ ทำให้ซีโอไลต์สามารถดูดซับโมเลกุลน้ำไว้ภายในรูพรุนได้ดี ทำให้เมมเบรนโคโตซาน-ซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำไว้ในเมมเบรนได้สูงกว่าเมมเบรนโคโตซานที่ไม่ได้ทำการเติมซีโอไลต์

ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนที่สูงขึ้นของเมมเบรนโคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์นี้จะส่งผลต่อสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรน ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป



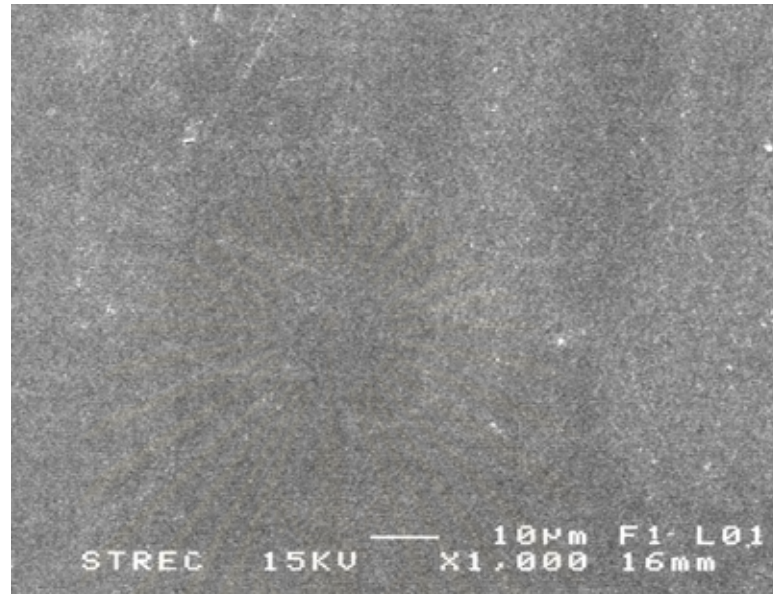
รูปที่ 4.2 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนโคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของเมมเบรนโคโตซานเชื่อมขวาง เมมเบรนโคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 10 และ 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักโคโตซาน ตามลำดับ พบว่าเมมเบรนโคโตซานเชื่อมขวาง มีลักษณะพื้นผิวที่เป็นเนื้อแน่นและราบเรียบ ในขณะที่เมมเบรนโคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 10 และ 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักโคโตซาน จะเห็นอนุภาคของแข็งสีขาว ซึ่งคาดว่าเป็นอนุภาคซีโอไลต์กระจายอยู่ทั่วผิวหน้า โดยมีบางตำแหน่งจะเห็นอนุภาคของแข็งจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ เนื่องจากขั้นตอนการทำให้ซีโอไลต์กระจายตัวในสารละลายโคโตซานไม่ดี โดยขนาดอนุภาคซีโอไลต์ในเมมเบรนจะใหญ่ขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (c)

การรวมตัวกันของอนุภาคซีโอโลต์ จะส่งผลต่อค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึง และสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรน ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

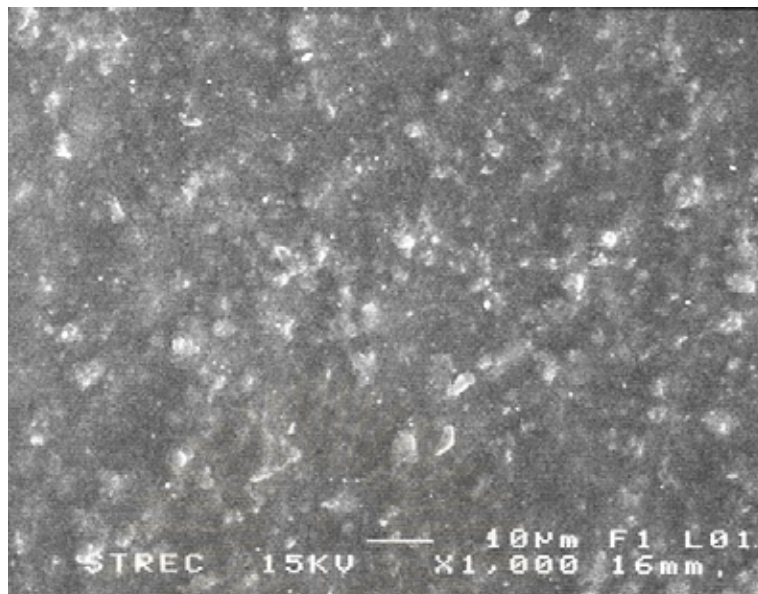
(A)



(B)



(C)



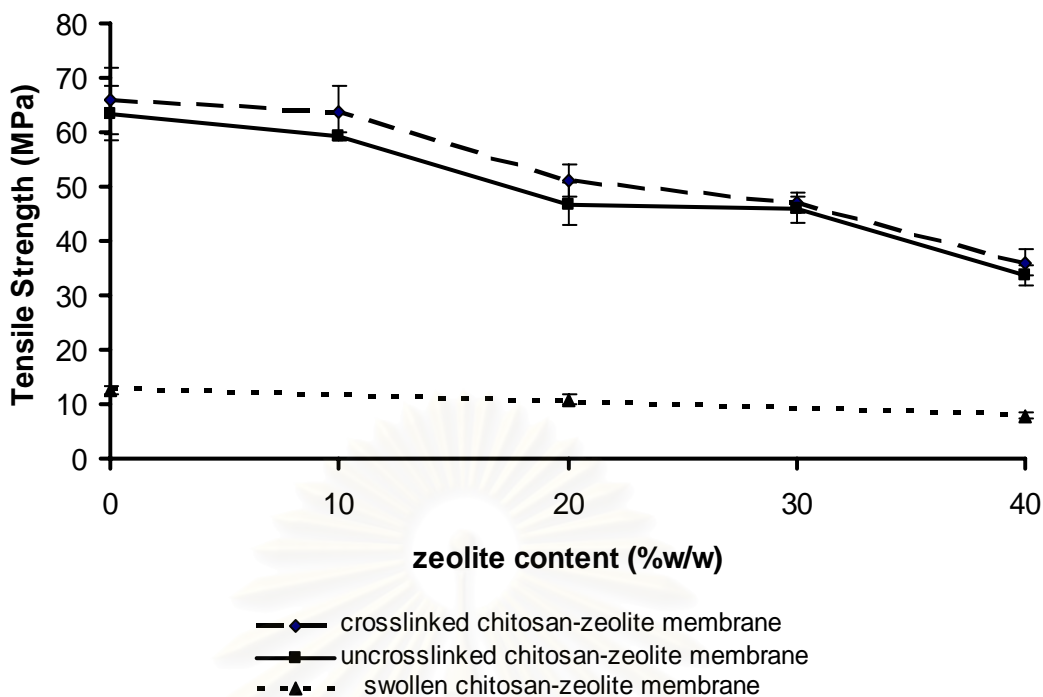
รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

(A) 0% zeolite (B) 10% zeolite (C) 20% zeolite

4.5 ความสามารถทนต่อแรงดึง

รูปที่ 4.4 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์ พบว่าเมมเบรนเชื่อมขวาง มีค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงสูงกว่าเมมเบรนไม่เชื่อมขวาง เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่แนบชิด ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวภายในของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงจะลดลงเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดรอยแยกที่ผิวสัมผัส (interfacial void) ระหว่างพื้นผิวของซีโอไลต์และไคโตซาน [15,16] ดังที่ได้กล่าวในส่วนของลักษณะสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของเมมเบรน ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นลดลง จากผลการทดลองในส่วนนี้จะนำไปยืนยันผลของสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรนเชื่อมขวาง ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

และเมื่อศึกษาค่าความทนแรงดึงของเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่บวมตัวด้วยน้ำ พบว่าความทนแรงดึงน้อยกว่าเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์มาก เนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีปริมาตรอิสระมากขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง



รูปที่ 4.4 ความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์

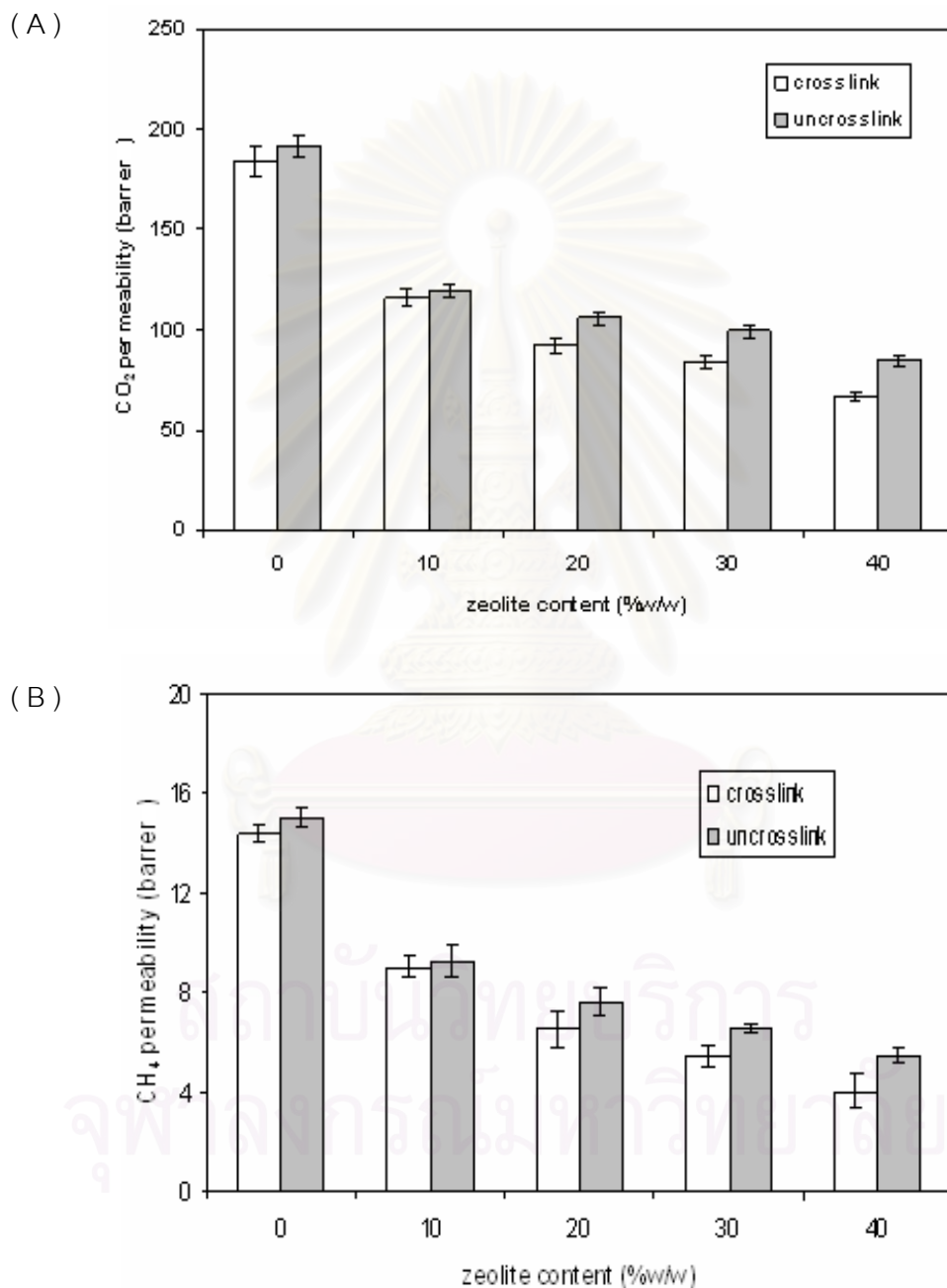
4.6 สมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้ง

โดยปกติในการศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรน จะศึกษาในลักษณะใช้เมมเบรนแห้งแยกแก๊สแห้ง แต่ในความเป็นจริง แก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพไม่แห้ง ซึ่งอาจทำให้สมรรถนะการแยกแตกต่างจากระบบแก๊สแห้ง/เมมเบรนแห้งได้ ในส่วนนี้จะพิจารณาสมรรถนะการแยกของระบบแก๊สแห้ง/เมมเบรนแห้งก่อน โดยศึกษากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพ

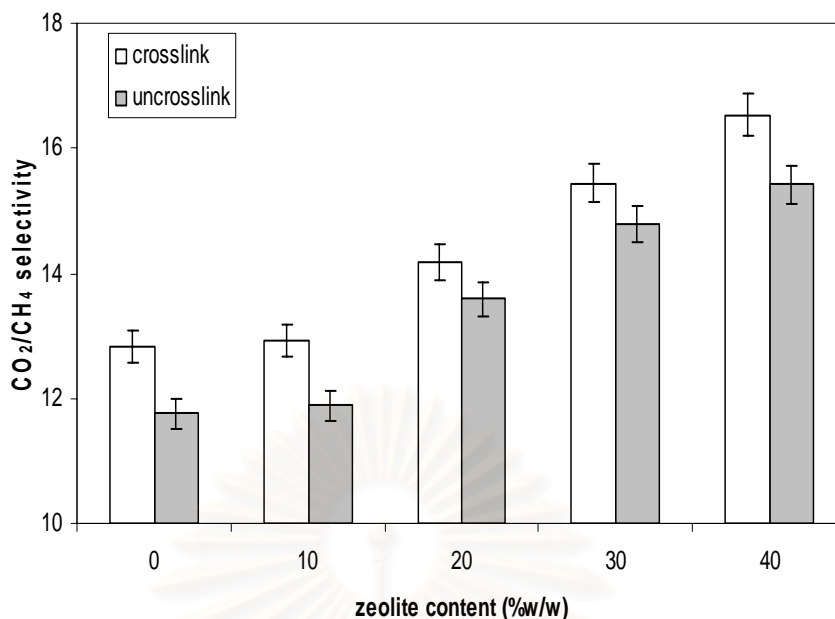
4.6.1 ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้ง

จากการศึกษาผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเมมเบรนเชื่อมขวางให้ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนต่ำกว่าเมมเบรนไม่เชื่อมขวาง นอกจากนี้ยังพบว่าเมมเบรนไคโตซานชอบให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้มากกว่าแก๊สมีเทน ทำให้ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนสูง โดยเมมเบรนเชื่อมขวางแสดงค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนสูงกว่าเมมเบรนไม่เชื่อมขวางที่ทุกๆ

สัดส่วนของซีโอไลต์ในโคโตะซาน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เนื่องจากการเชื่อมขวางเมมเบรน จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง [19, 23] จึงเป็นเหตุให้โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ลดลง ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนผ่านเมมเบรนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนต่อค่าการซึมผ่านแก๊ส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (A : ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ; B : ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน)

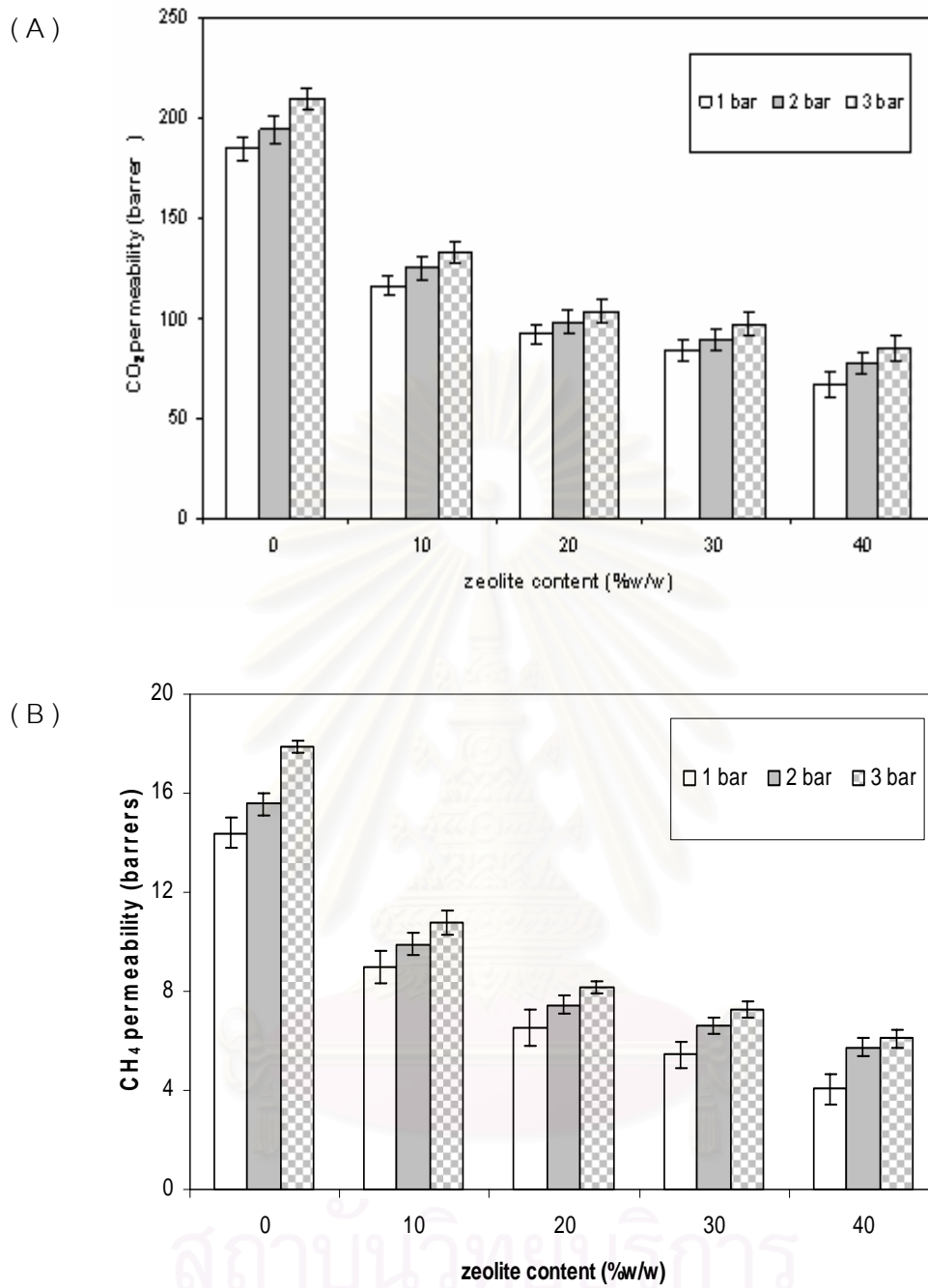


รูปที่ 4.6 ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนต่อค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

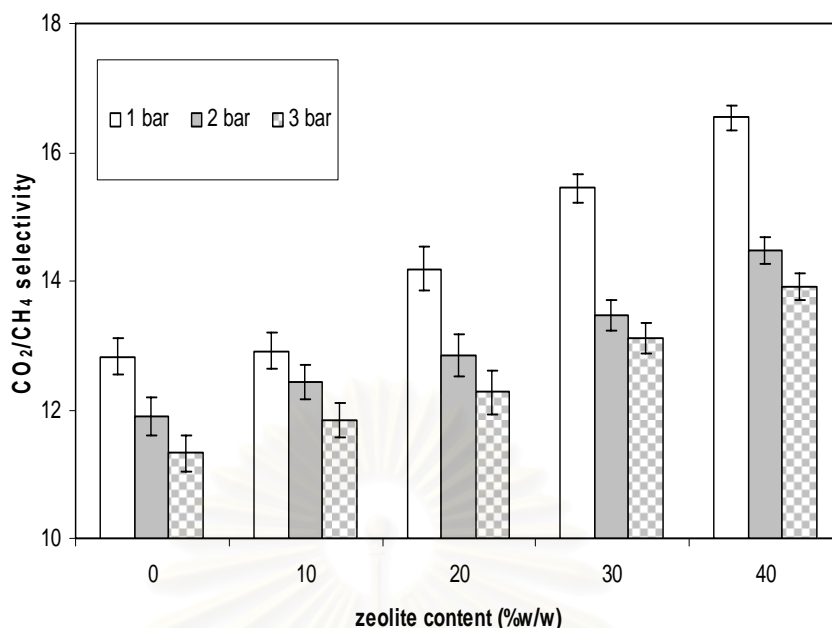
จากผลการทดลองในส่วนนี้ พบว่าเมมเบรนเชื่อมขวางจะให้ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนสูงกว่าเมมเบรนไม่เชื่อมขวาง ทั้งยังมีค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงที่ดีกว่า ส่งผลให้การศึกษาศมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรนในส่วนที่เหลือ จึงเลือกศึกษากับเมมเบรนเชื่อมขวาง

4.6.2 ผลของความดันที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห่งของเมมเบรนแห่ง

จากการศึกษาผลของความดันที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห่งของเมมเบรนเชื่อมขวาง แห่ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากในกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน มีความดันย่อยของสารเพอร์มิเอตเป็นแรงขับ (driving force) [7] ดังนั้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้โมเลกุลของแก๊สสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายกว่าในกรณีที่มีความดันต่ำ จึงเป็นเหตุให้โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้เพิ่มขึ้น ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนของเมมเบรนจึงมีค่าลดลง



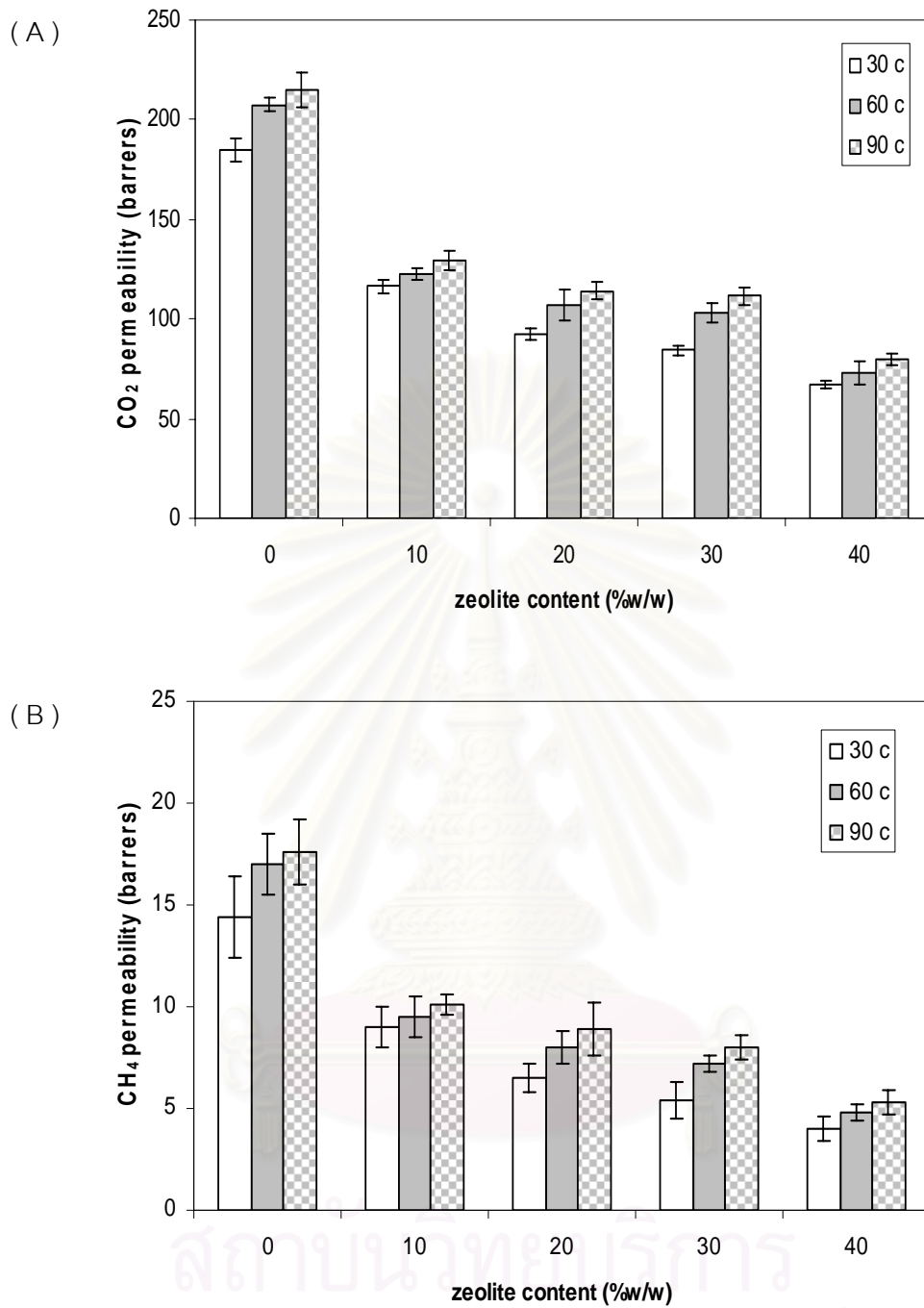
รูปที่ 4.7 ผลของความดันต่อค่าการซึมผ่านแก๊ส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (A : ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ; B : ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน)



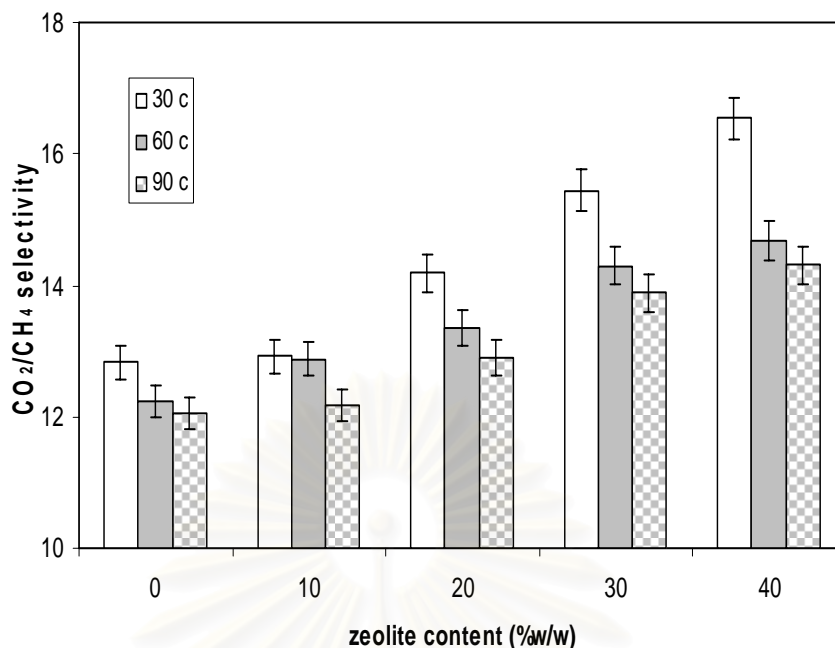
รูปที่ 4.8 ผลของความดันต่อค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

4.6.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้ง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนเชื่อมขวางแห้ง ที่ความดัน 1 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะไปกระตุ้นให้โมเลกุลของแก๊สมีพลังงานภายในเพิ่มขึ้น อีกทั้งสายโซ่พอลิเมอร์จะได้รับพลังงานจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะเกิดการเคลื่อนไหวออกจากการเกี่ยวพันกันภายในสายโซ่พอลิเมอร์ (chain entanglement) ส่งผลให้เกิดปริมาตรหรือช่องว่างระหว่างสายโซ่เพิ่มมากขึ้น [3] เป็นเหตุให้โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนผ่านเมมเบรนจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการซึมผ่านแก๊ส ที่ความดัน 1 บาร์ (A : ค่าการซึมผ่านแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ; B : ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน)



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ที่ความดัน 1 บาร์

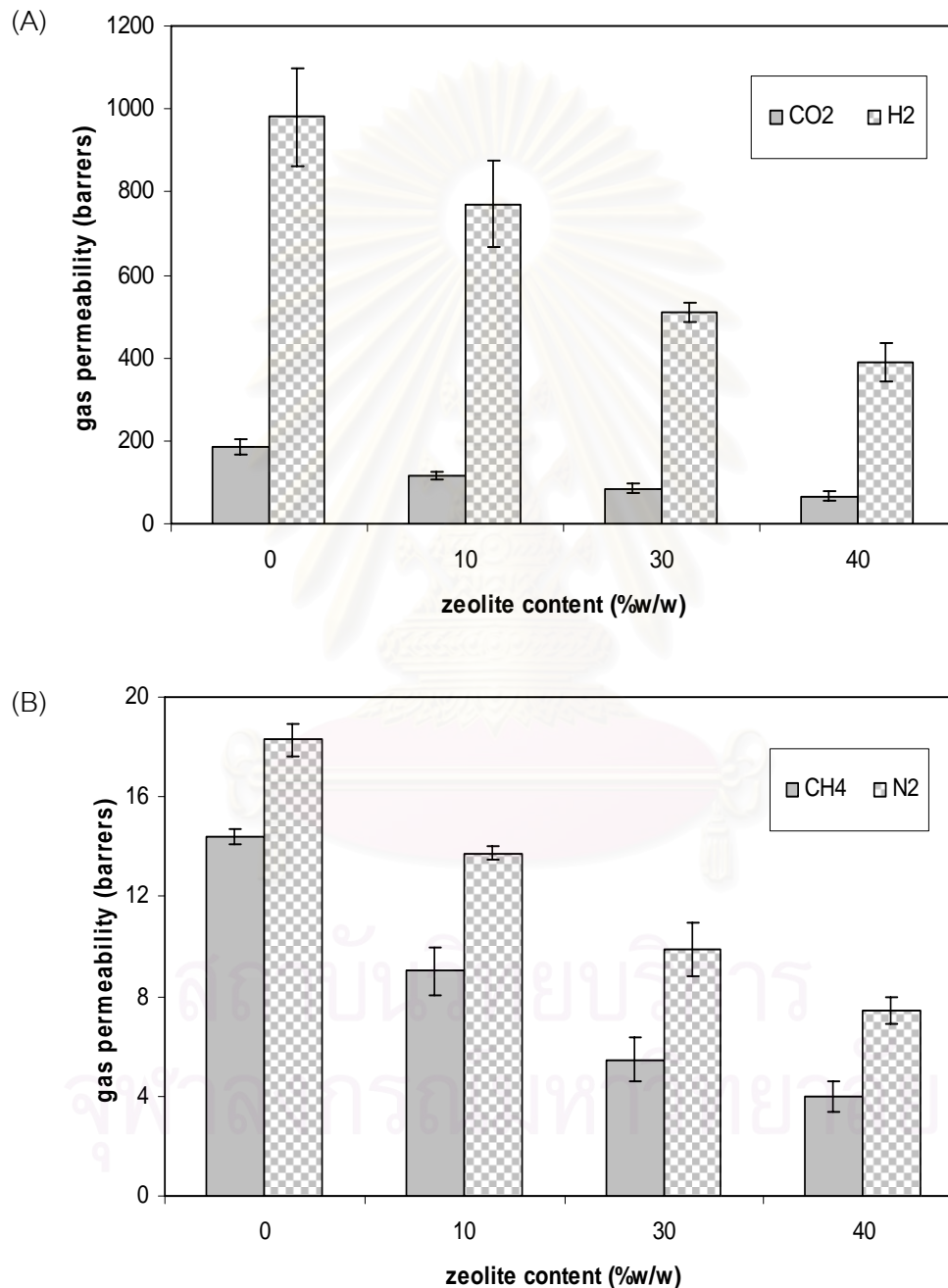
จากผลการทดลองในส่วนนี้ พบว่าเมมเบรนเชื่อมขวางจะให้ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนที่ดีที่สุด ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ จึงเลือกใช้สภาวะดังกล่าว ทำการศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สไฮโดรเจน และไนโตรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบแก๊สส่วนน้อยในแก๊สชีวภาพ

4.6.4 ผลของปริมาณซีโอไลต์ที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้ง

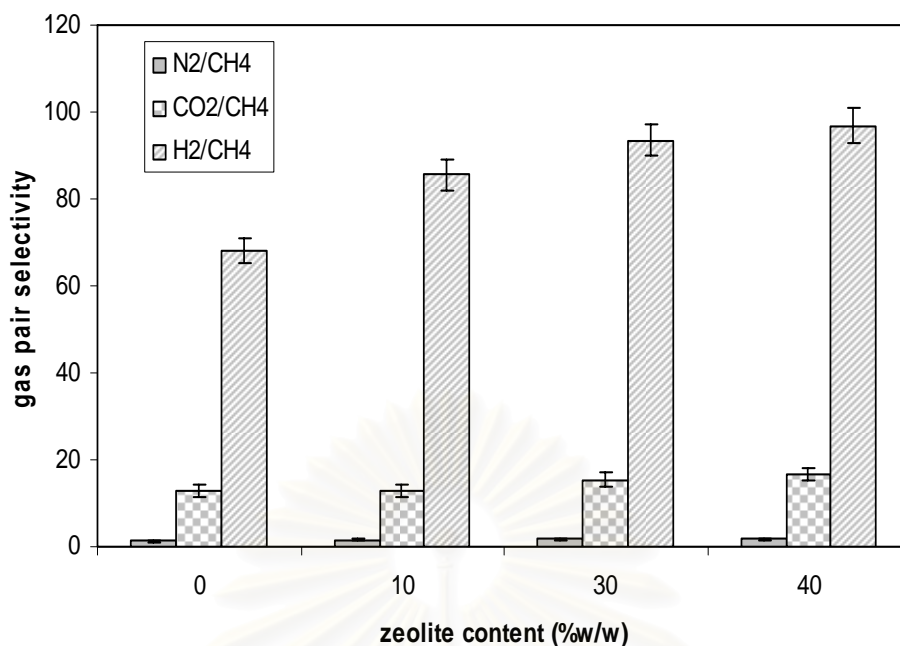
การมีซีโอไลต์ในโคโิตซานเมทริกซ์ ทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง ซึ่งน่าจะเกิดจากผลของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดความแข็งกระด้าง เนื่องจากการมีอนุภาคซีโอไลต์เข้าไปแทรกอยู่ในสายโซ่ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าความไม่อ่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (polymer chain rigidification) หรือเกิดจากการที่สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ไปบดบังรูพรุนของซีโอไลต์บางส่วน เป็นผลให้รูพรุนของซีโอไลต์เกิดการอุดตัน (partial pore blockage of zeolite) ดังกล่าวในหัวข้อ 2.4 ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส ดังผลแสดงในรูปที่ 4.5 - 4.10

ผลการทดสอบสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.12 พบว่าปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น จะให้ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนลดลงจาก 184.7 ± 20.3 , 14.4 ± 2.0 , 980.5 ± 16.8 และ 18.3 ± 0.7 แบเรอร์ เป็น 66.8 ± 6.4 , 4.0 ± 0.6 , 387.5 ± 26.1 และ 7.4 ± 0.6

แบบเรอร์ ตามลำดับ แต่ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ไฮโดรเจนต่อมีเทน และ ไนโตรเจนต่อมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 12.8 ± 1.6 , 68.1 ± 1.5 และ 1.3 ± 0.1 เป็น 16.5 ± 1.6 , 96.9 ± 1.5 และ 1.9 ± 0.1 ตามลำดับ เมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนัก โคลิตซาน



รูปที่ 4.11 ค่าการซึมผ่านแก๊สแห้งผ่านเมมเบรนแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (A: ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน; B: ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนและไนโตรเจน)



รูปที่ 4.12 ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สแห้งผ่านเมมเบรนแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

จากการศึกษาในส่วนนี้สรุปได้ว่า เมมเบรนฐานโคโตซานชอบให้แก๊สผ่านตามลำดับดังนี้ แก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และมีเทน เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงจลน์ศาสตร์ (kinetic diameter) เพียง 2.89 อังสตรอม เมื่อเปรียบเทียบกับ คาร์บอนไดออกไซด์ (3.30 อังสตรอม) ไนโตรเจน (3.64 อังสตรอม) และมีเทน (3.80 อังสตรอม) จึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ดีกว่าแก๊สชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่าเมมเบรนที่มีปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนสูงสุด ซึ่งจะเลือกนำไปทดสอบสมรรถนะการแยกแก๊สด้วยระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง

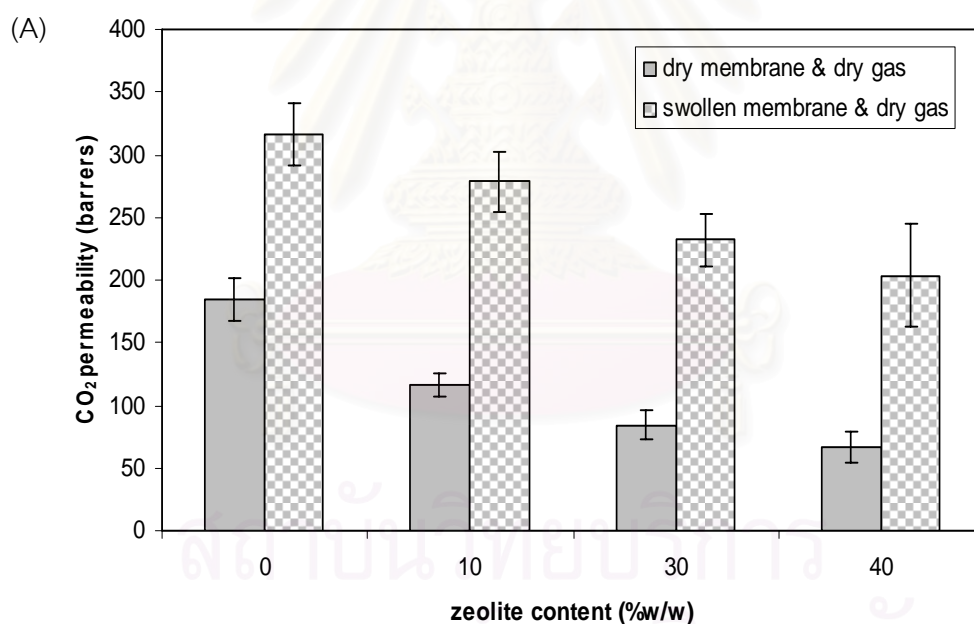
4.7 สมรรถนะการแยกแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพ

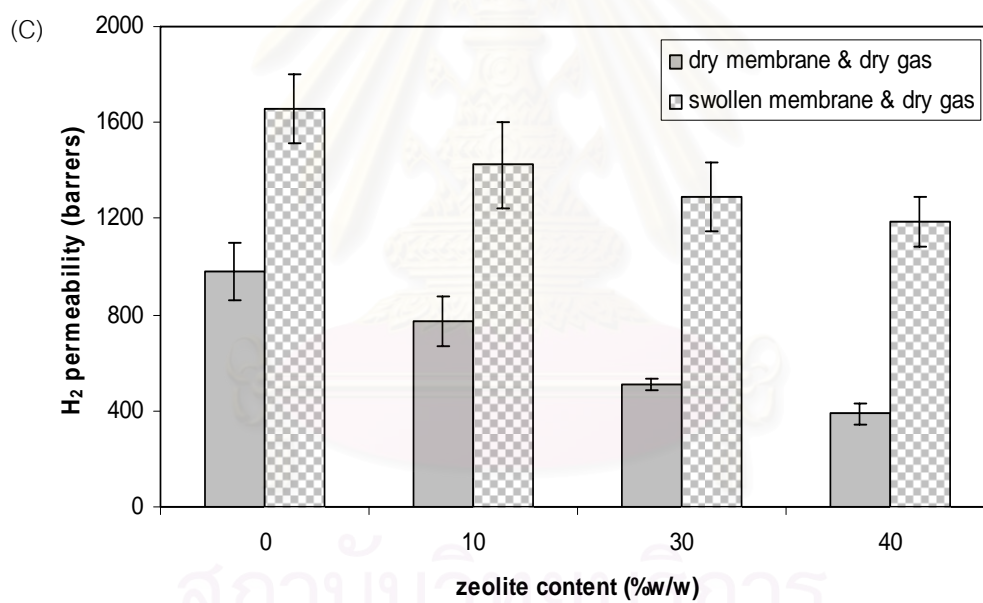
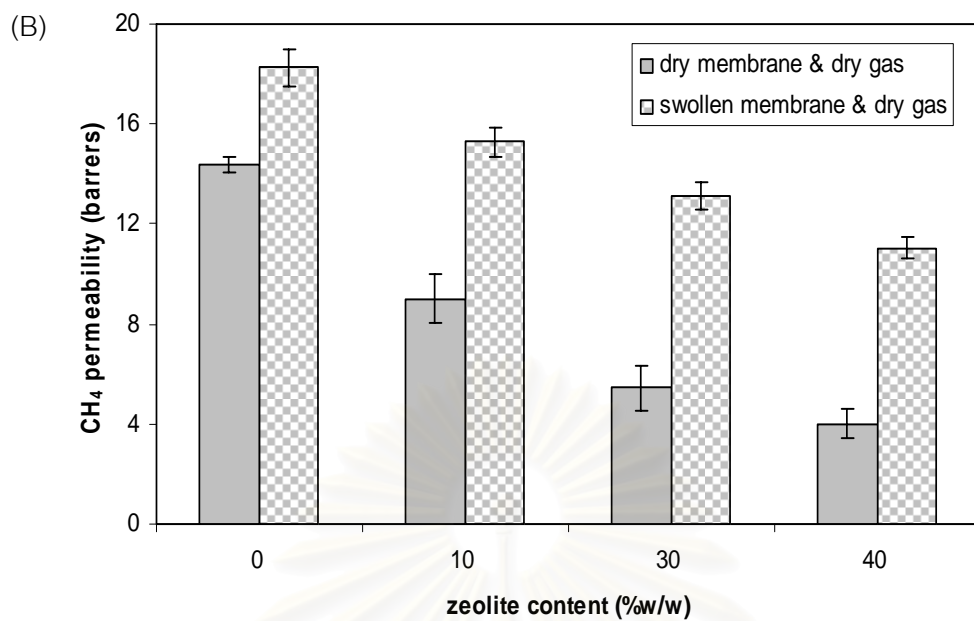
เนื่องจากแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพไม่เป็นแก๊สแห้ง เพื่อให้ผลงานวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง ในการศึกษาจึงได้จำลองสถานการณ์ โดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ

- 1.) ศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำ
- 2.) ศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สเปียกของเมมเบรนแห้ง
- 3.) ศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สเปียกของเมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำ

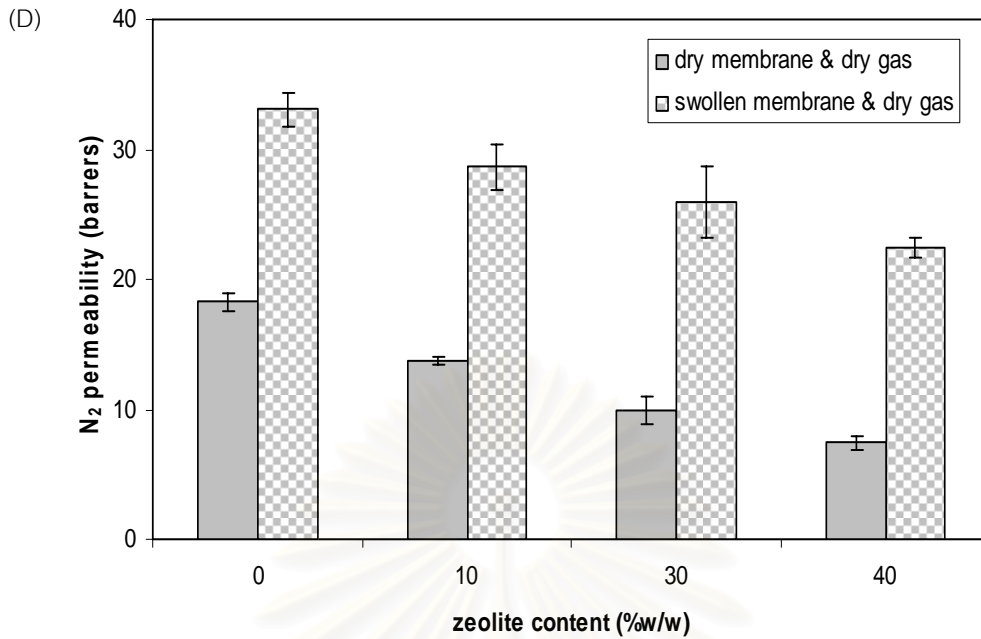
4.7.1 สมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำ

จากการศึกษาค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊สแห้งของเมมเบรนเชื่อมขวางบวมตัวด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.13 – 4.14 พบว่าค่าการซึมผ่านแก๊สทุกชนิดลดลง เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับในกรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนแห้ง แต่ค่าการซึมผ่านแก๊สทุกชนิดมีค่าสูงกว่าของเมมเบรนแห้ง ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัย [24] ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์ของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำมีความอ่อนตัวและอยู่ห่างกันมากขึ้น โมเลกุลของแก๊สจึงสามารถแพร่ผ่านได้มากขึ้น ในกรณีนี้การมีอนุภาคซีโอไลต์ในเมทริกซ์โพลีเมอร์ไม่ได้ช่วยให้ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเหมือนในกรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคู่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ทั้งนี้อาจเนื่องจากซีโอไลต์ก็สามารถดูดซับน้ำได้เช่นเดียวกับโพลีเมอร์ ทำให้ข้อดีในการเลือกสรรแก๊สของอนุภาคอนินทรีย์ซีโอไลต์ถูกปิดบังไป

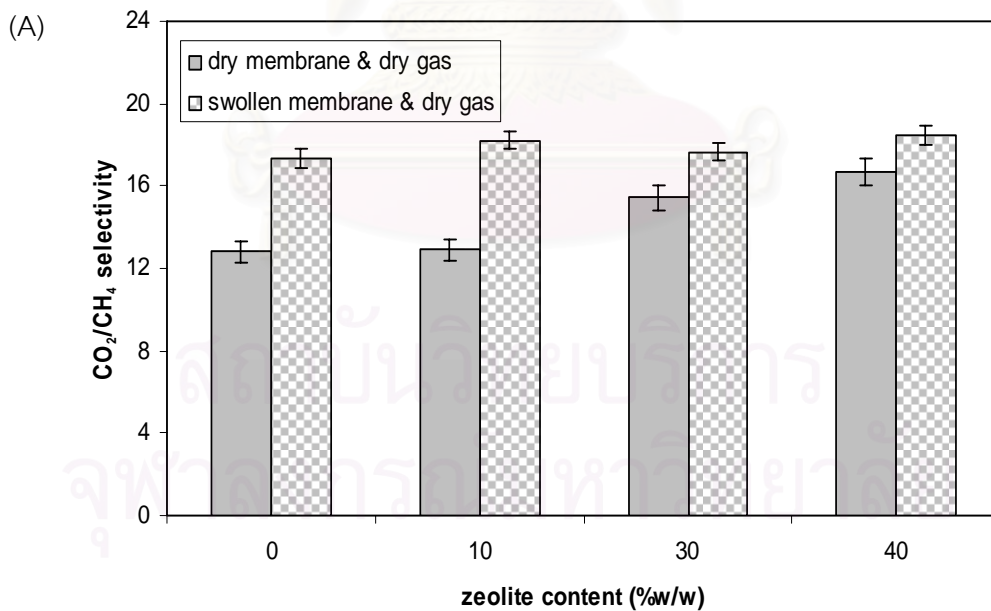


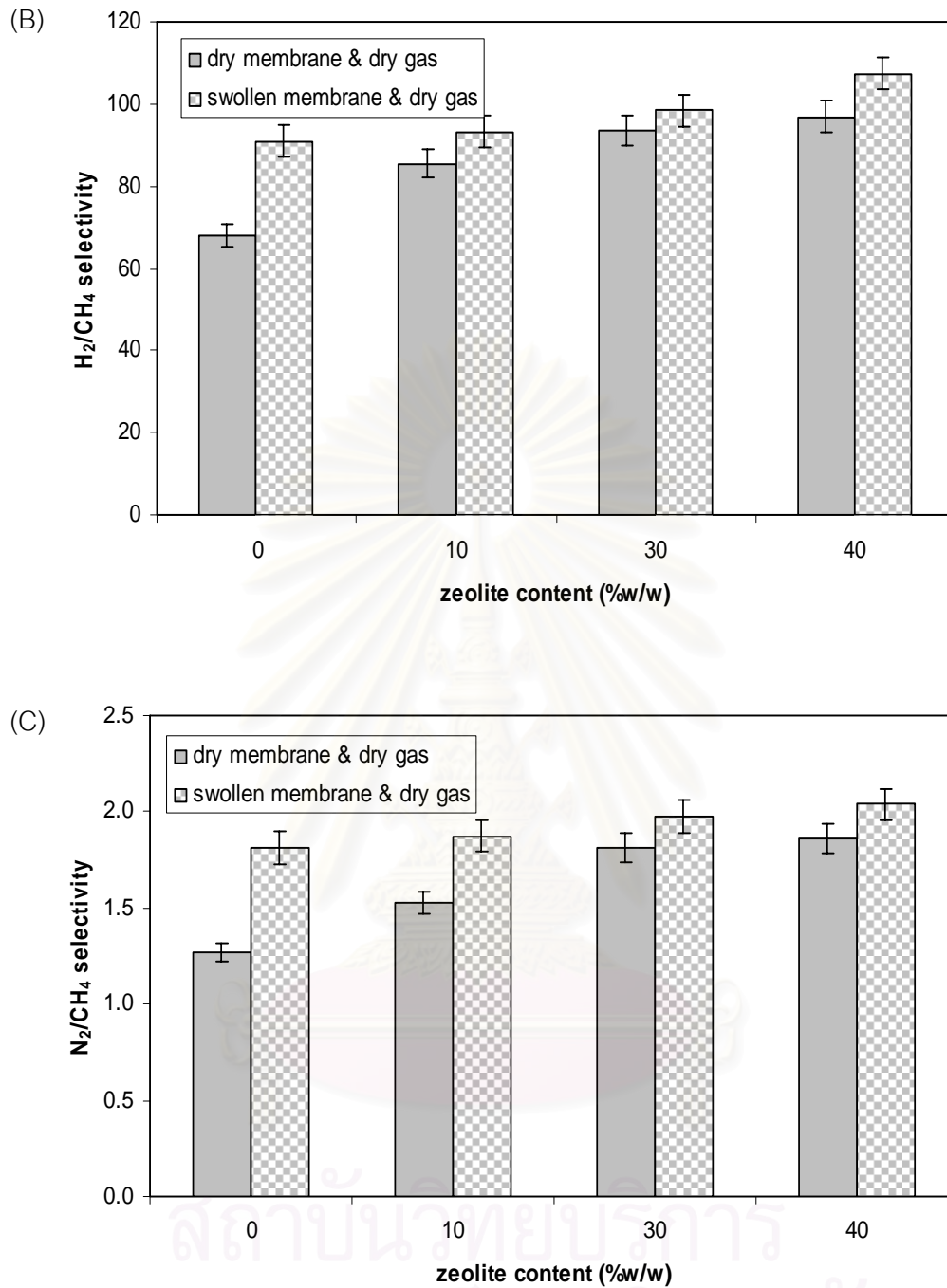


สถาบันวิจัยวิชาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ผลของสภาพเมมเบรนต่อค่าการซึมผ่านแก๊สแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (A: ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์; B: ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน; C: ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน; D: ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน)

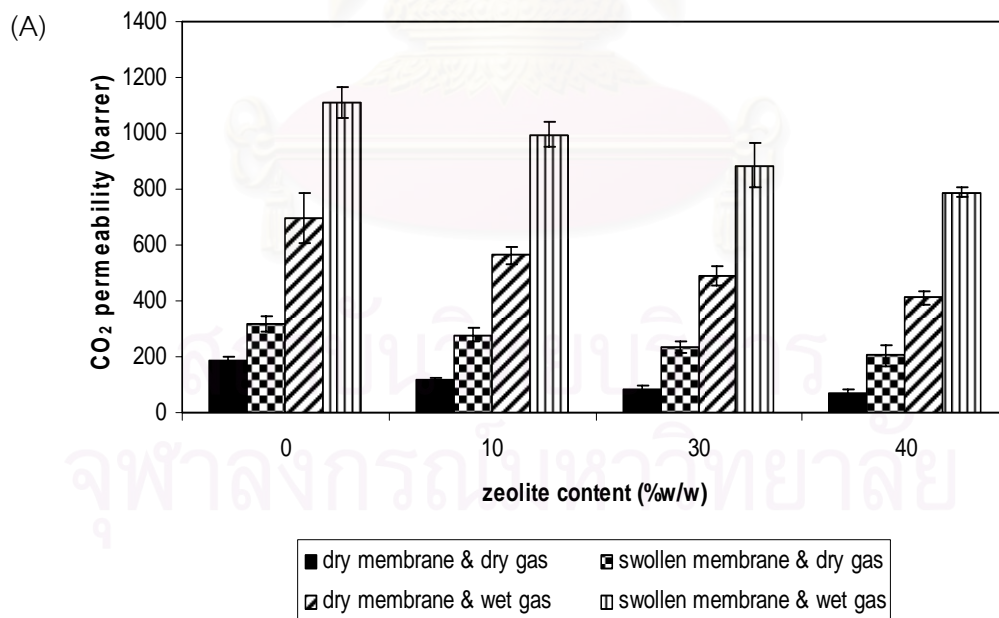


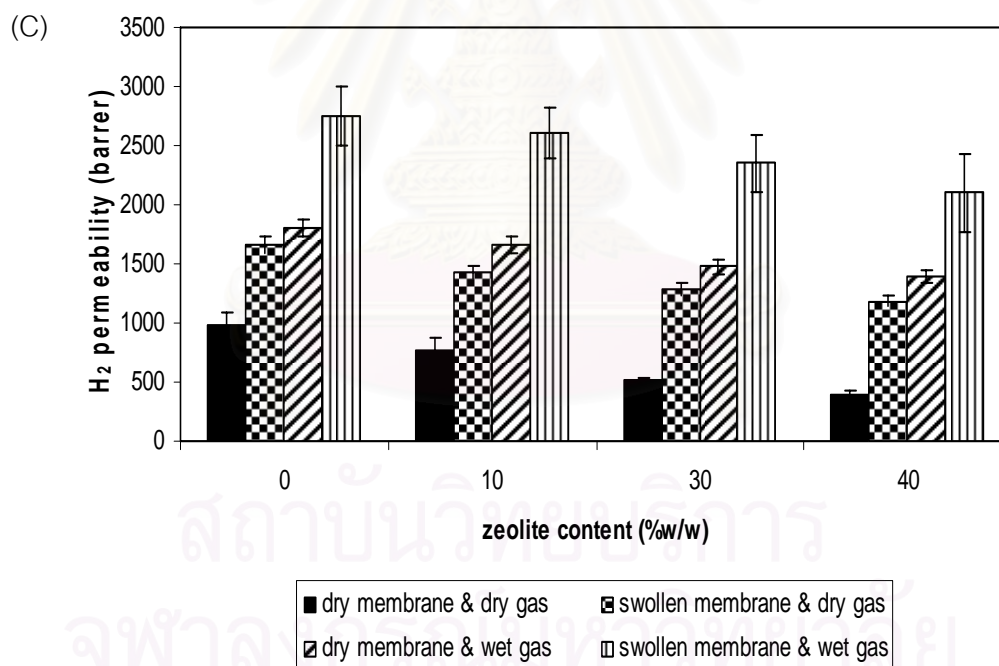
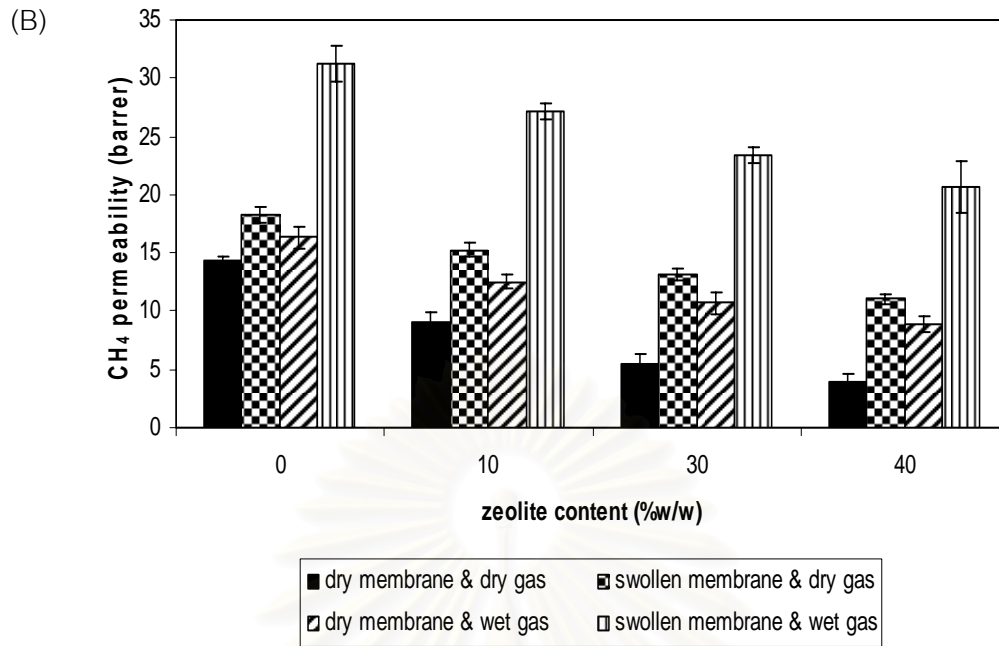


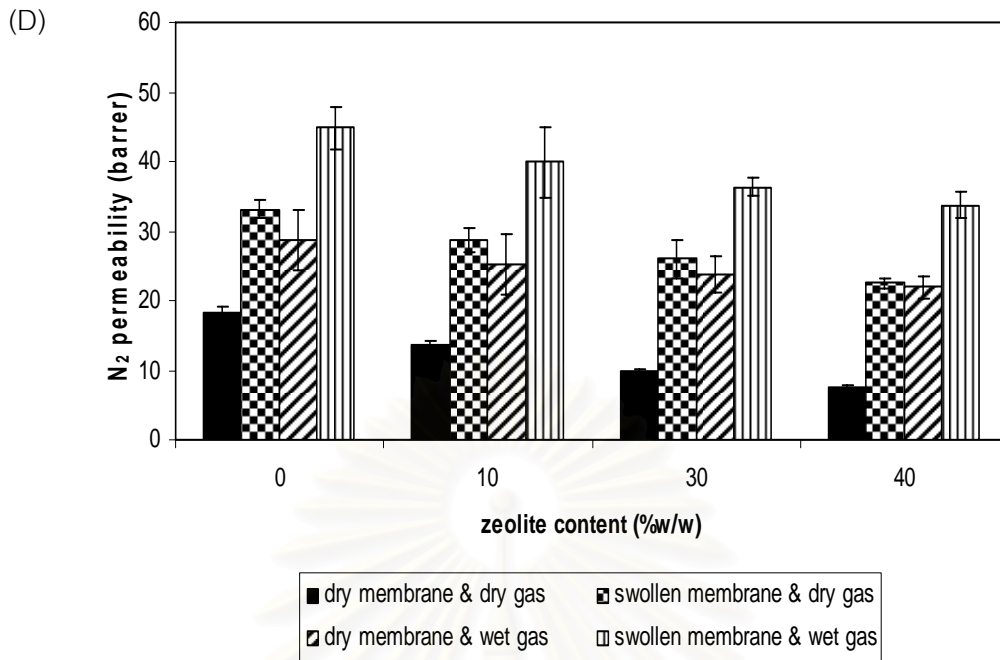
รูปที่ 4.14 ผลของสภาพเมมเบรนต่อค่าการเลือกสรรคู่แก๊สแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (A: ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน; B: ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน; C: ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน)

4.7.2 สมรรถนะการแยกแก๊สเป็ยกของเมมเบรนแห้ง

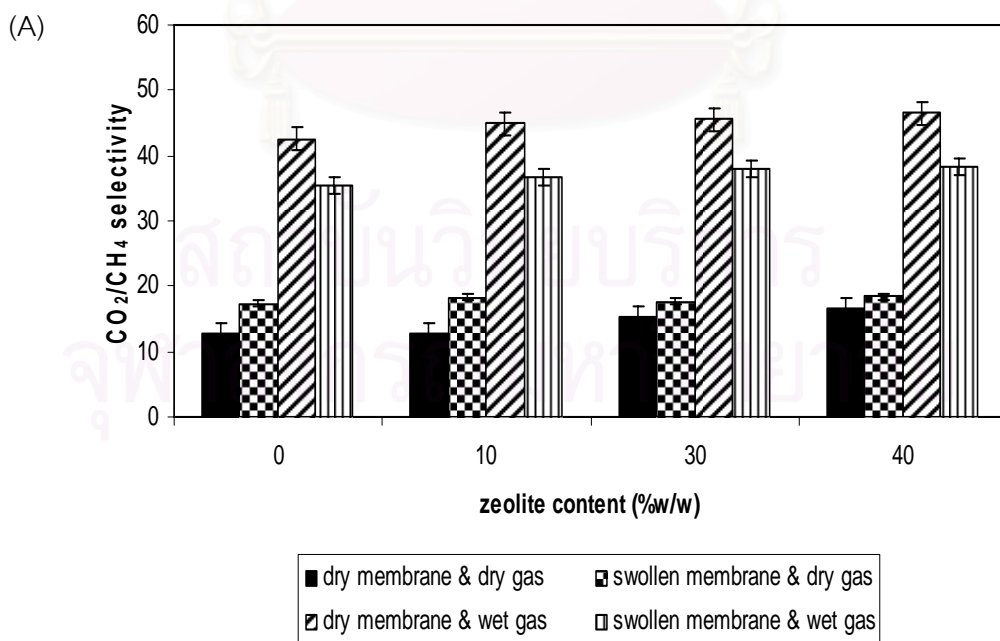
ในการบ่อนแก๊สเป็ยกผ่านเมมเบรนแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.15 – 4.16 พบว่าเมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านแก๊สทุกชนิดลดลงเช่นเดิม แต่จะเริ่มเห็นความแตกต่างจากในกรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนเป็ยกในหัวข้อ 4.7.1 โดยแก๊สที่สามารถละลายน้ำได้มาก และเมมเบรนชอบให้ผ่านได้มากกว่า คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน จะให้ค่าการซึมผ่านมากขึ้นกว่าใน 2 กรณีก่อนหน้า ต่างจากแก๊สที่สามารถละลายน้ำได้น้อย คือ แก๊สมีเทน และไนโตรเจน จะให้ค่าการซึมผ่านแก๊สน้อยกว่ากรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนเป็ยก แต่ยังคงมากกว่ากรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นที่มากับแก๊สเป็ยก ทำให้เมมเบรนบวมตัวได้ต่างกัน เนื่องจากการถ่ายโอนมวลน้ำจากแก๊สสู่เมมเบรน โดยปริมาณน้ำที่มากับแก๊สมีเทน และไนโตรเจน ซึ่งละลายน้ำได้น้อย ไม่มากพอทำให้เมมเบรนบวมได้เท่ากับกรณีทำให้เมมเบรนอิมตัวด้วยน้ำก่อนผลที่ตามมาคือ ทำให้ค่าการเลือกสรรของแก๊สละลายน้ำได้มากกับแก๊สที่ละลายน้ำได้น้อย (ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน และไฮโดรเจนต่อมีเทน) สูงขึ้น โดยเฉพาะคู่แก๊สที่มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกัน คือ ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน

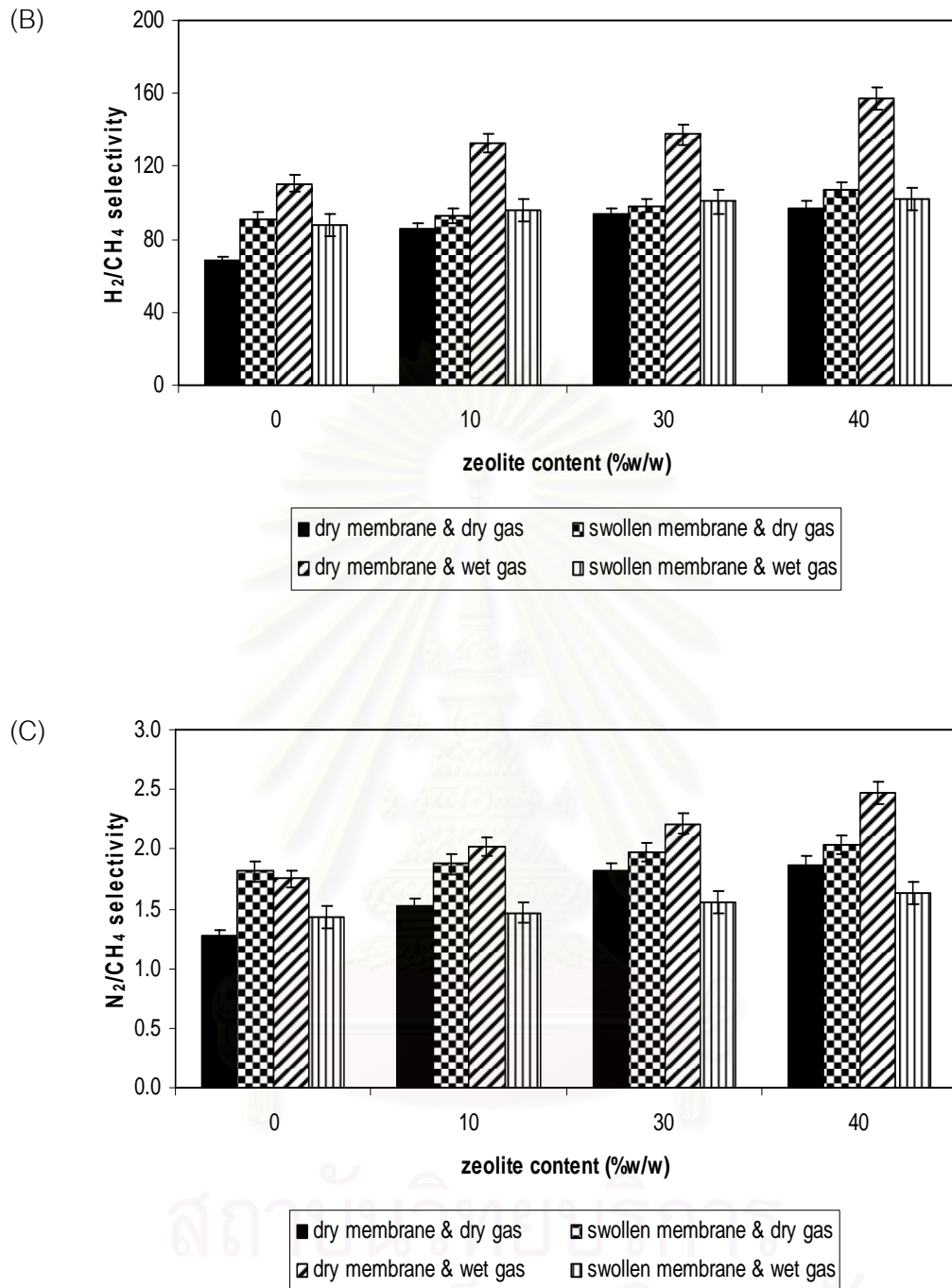






รูปที่ 4.15 ผลของสภาพเมมเบรน และสภาพแก๊สต่อค่าการซึมผ่านแก๊ส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (A: ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์; B: ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน; C: ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน; D: ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน)





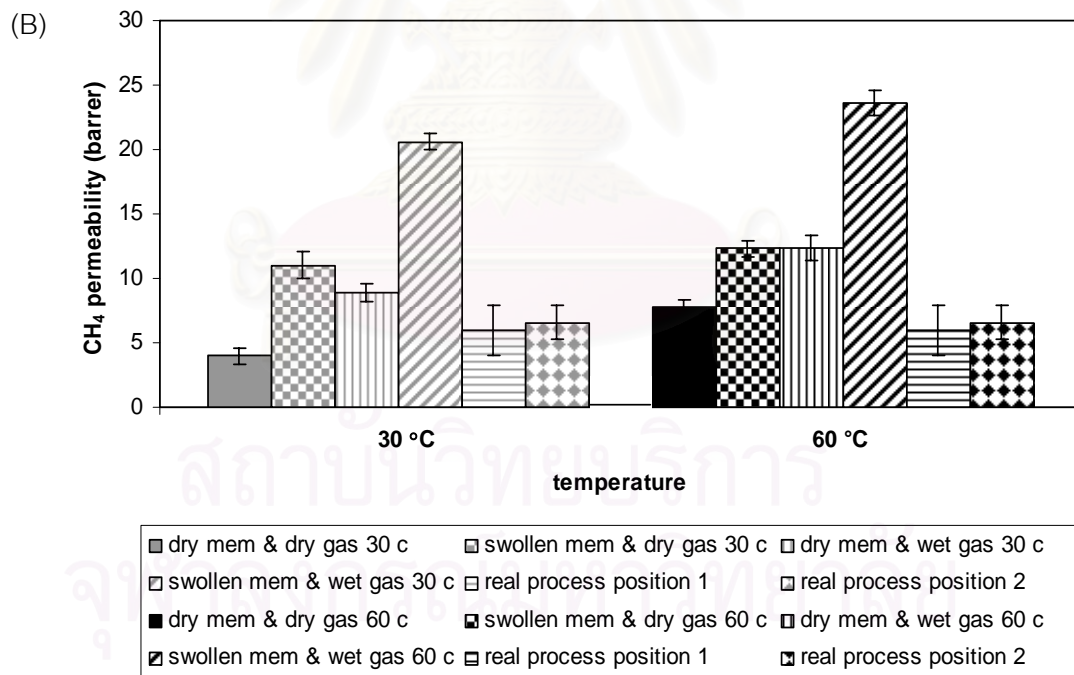
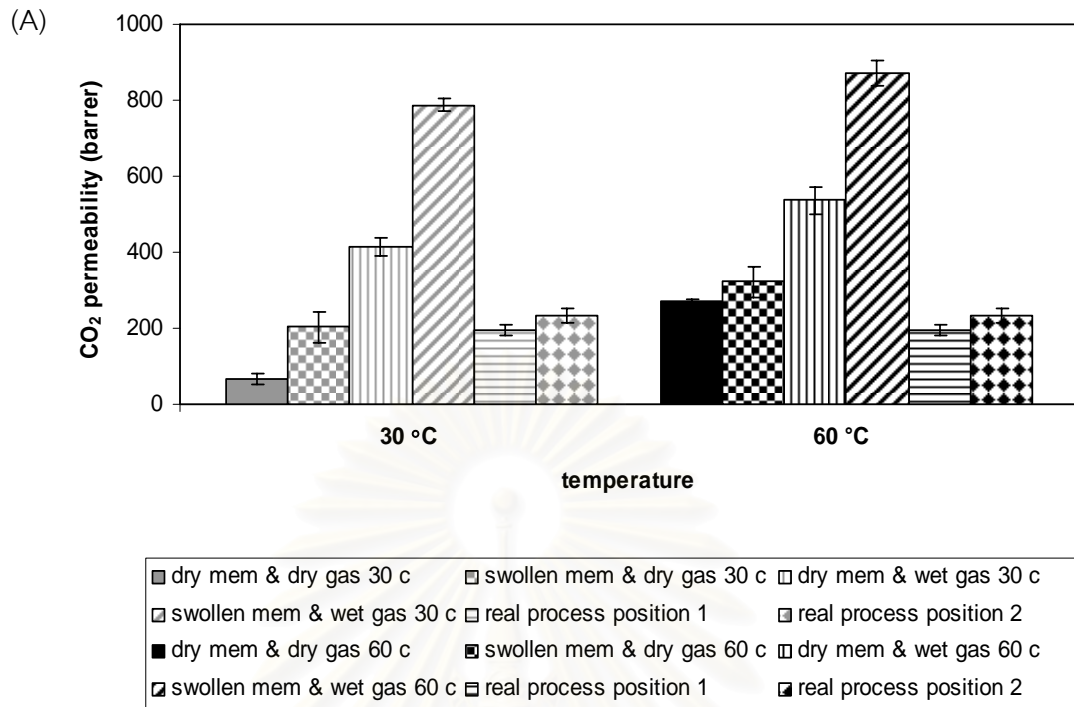
รูปที่ 4.16 ผลของสภาพเมมเบรน และสภาพแก๊สต่อค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (A: ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน; B: ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน; C: ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน)

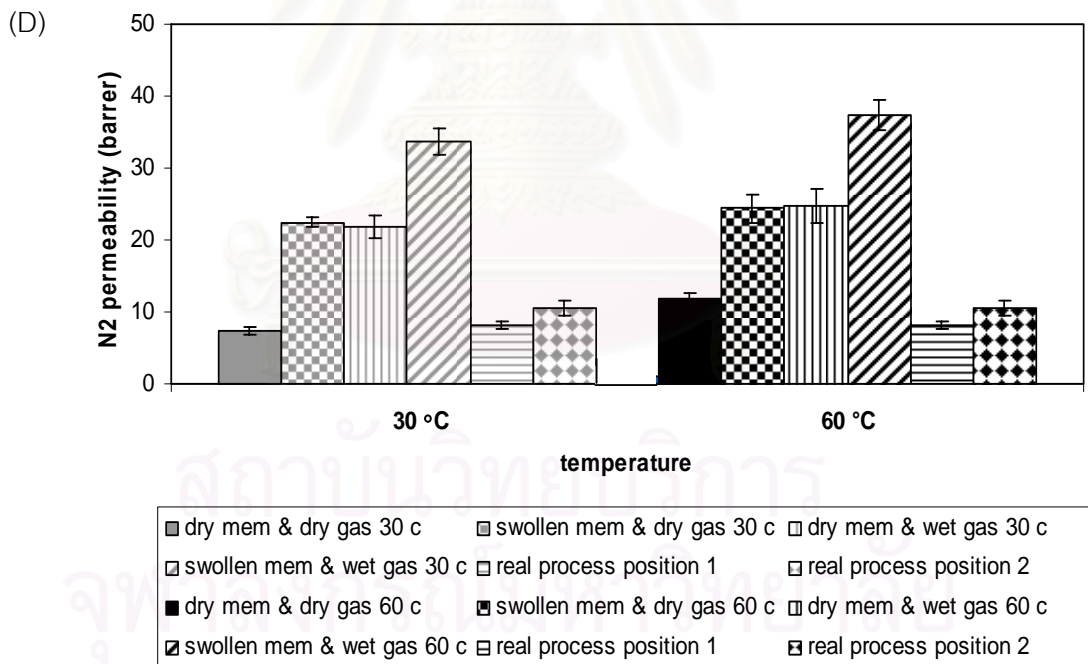
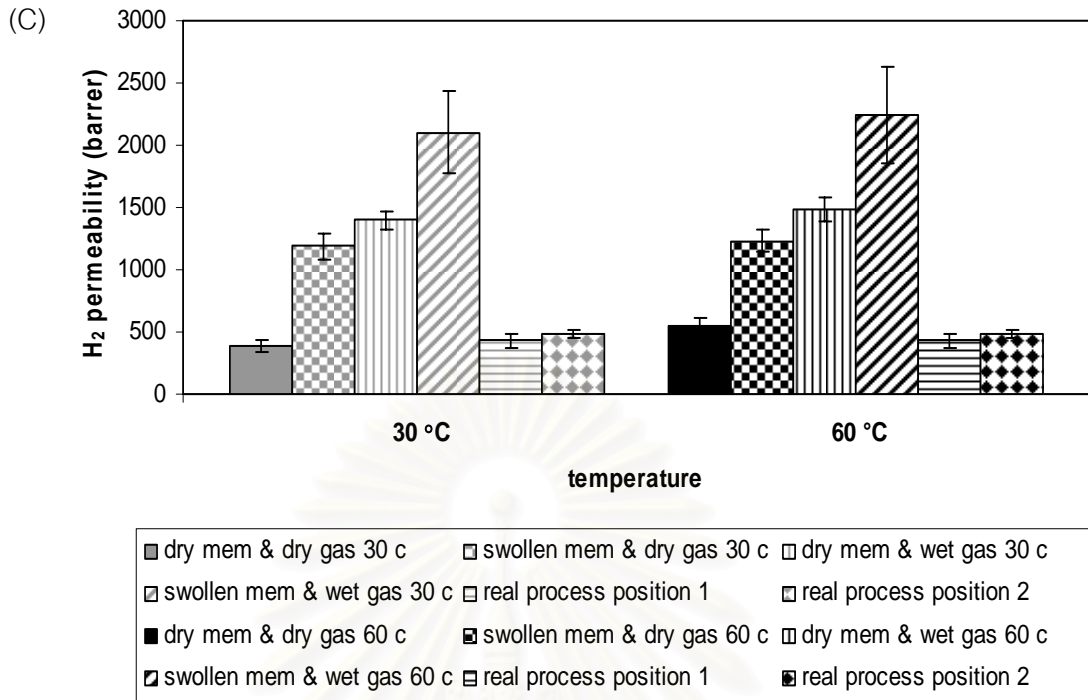
4.7.3 สมรรถนะการแยกแก๊สเป็ยกของเมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำ

ค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊สเป็ยกของเมมเบรนเชื่อมขวางบวมตัวด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.15 – 4.16 พบว่าค่าการซึมผ่านแก๊สเป็ยกทุกชนิดลดลง เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นเช่นเดิม และมีค่าสูงกว่าอีก 3 กรณีที่กล่าวมาแล้ว อธิบายได้ว่าในกรณีนี้ไม่ต้องการถ่ายโอนมวลน้ำข้ามไปมาระหว่างเมมเบรนและแก๊ส เพราะทั้งเมมเบรนและแก๊สได้อิ่มตัวด้วยน้ำ ทำให้สภาพการบวมตัวของเมมเบรนไม่เปลี่ยนแปลง ขณะที่แก๊สถ่ายโอนผ่านเมมเบรน โดยค่าการซึมผ่านแก๊สในกรณีนี้ทุกชนิดสูงกว่ากรณีบ่อนแก๊สแห้งมาก เนื่องจากว่าเมมเบรนชนิดชอบน้ำยอมชอบให้แก๊สเป็ยกผ่านได้มากกว่าแก๊สแห้ง เมื่อแก๊สทุกชนิดอยู่ในสภาพเป็ยก และเมมเบรนบวมตัวเต็มที่ การเลือกสรรแก๊สจึงด้อยลง

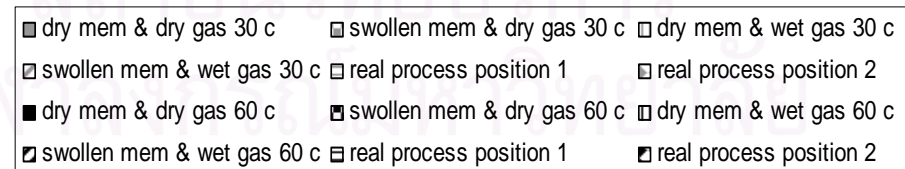
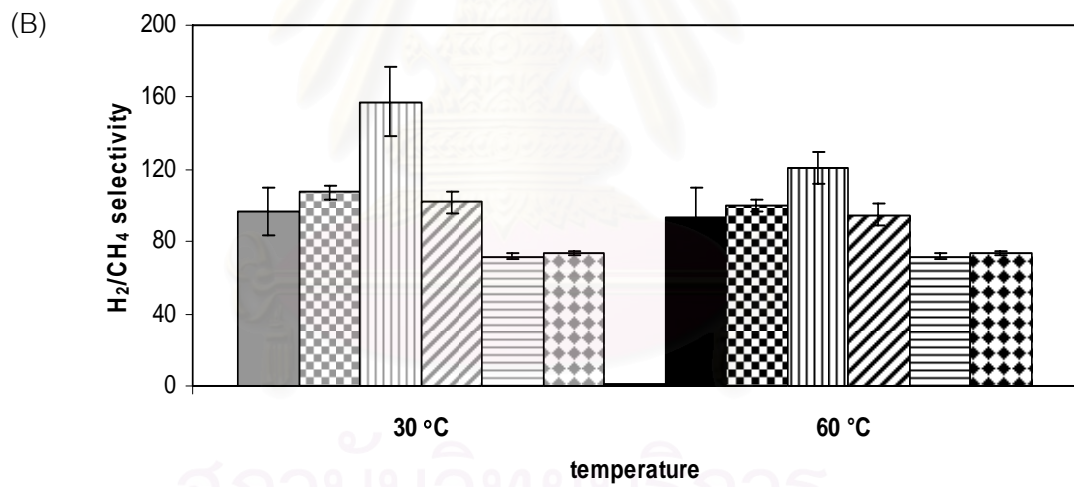
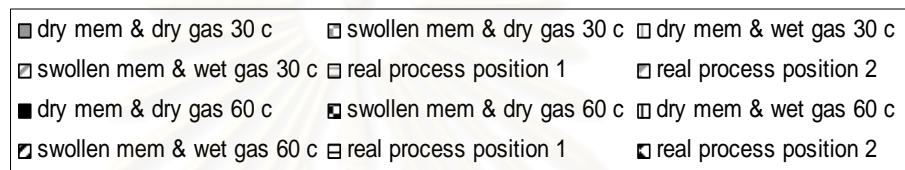
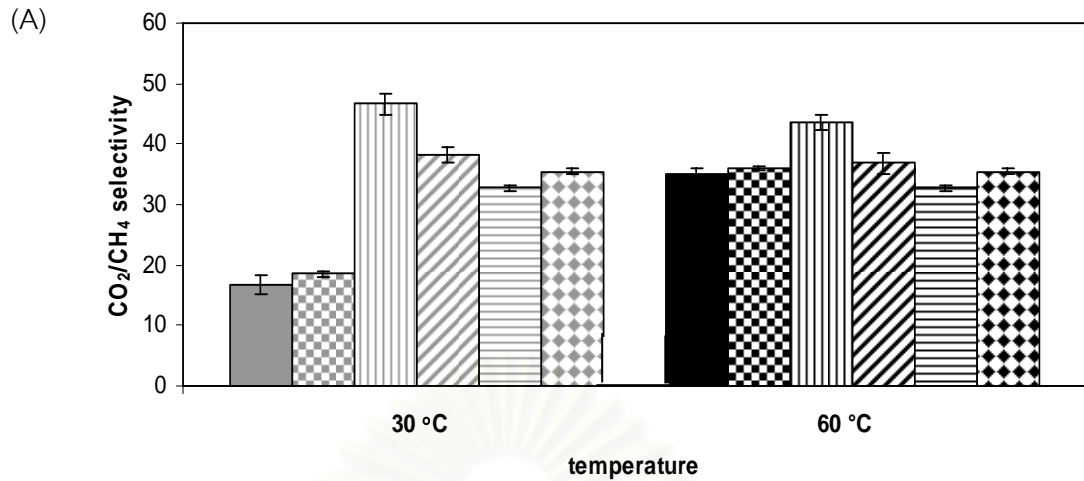
4.8 สมรรถนะการแยกแก๊สกับระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง

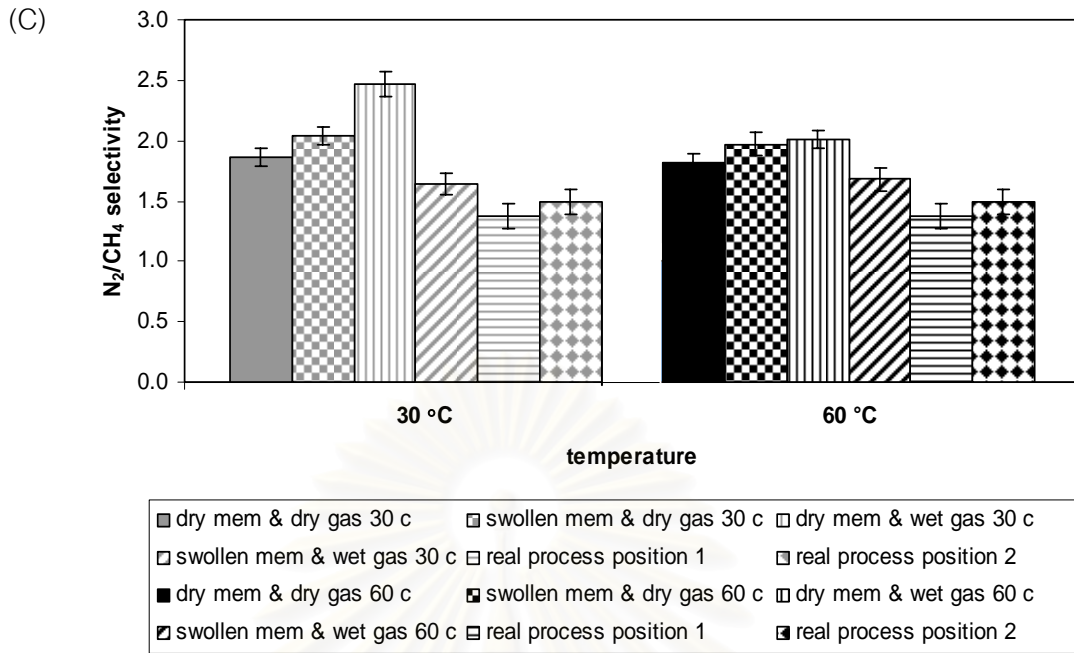
จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.6.4 สรุปเลือกใช้เมมเบรนที่มีปริมาณซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก นำมาทดสอบสมรรถนะการแยกแก๊สกับระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.17 - 4.18 พบว่าบริเวณตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเป็นส่วนของแก๊สชีวภาพที่ออกมาจากบ่อหมัก จะมีค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เท่ากับ 195.6 ± 13.3 , 6.0 ± 1.9 , 428.8 ± 56.4 และ 8.2 ± 0.6 แบนเนอร์ ตามลำดับ ให้ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ไฮโดรเจนต่อมีเทน และไนโตรเจนต่อมีเทน เท่ากับ 32.8 ± 0.5 , 71.9 ± 1.5 และ 1.4 ± 0.02 ตามลำดับ และ ณ ตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนของแก๊สชีวภาพหลังผ่านหอพ่นน้ำเพื่อกำจัดแก๊สกรดต่างๆ ได้ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สตามลำดับดังนี้ 233.6 ± 17.6 แบนเนอร์, 6.6 ± 1.3 แบนเนอร์, 484.2 ± 29.3 แบนเนอร์, 10.5 ± 1.0 แบนเนอร์, 35.5 ± 0.5 , 73.6 ± 1.5 และ 1.6 ± 0.02 จะเห็นว่าค่าการซึมผ่านแก๊สทุกชนิดจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริงทั้ง 2 ตำแหน่ง ให้ค่าสูงกว่าค่าการซึมผ่านแก๊สของเมมเบรนทางอุดมคติที่ดำเนินในสภาพเมมเบรนแห้งกับแก๊สแห้ง แต่ค่อนข้างต่ำทางสมรรถนะที่จะได้จากกรณีเมมเบรนและ/หรือแก๊สไม่แห้ง เมื่อพิจารณาจากค่าการเลือกสรร จะเห็นว่าผลการตรวจวัดจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริงทั้ง 2 ตำแหน่ง สอดคล้องกับกรณีใช้เมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำกับแก๊สเป็ยกมากที่สุด และหากพิจารณาผลรวมของอุณหภูมิต่อสมรรถนะการแยกเข้าด้วยแล้ว ผลการทดสอบกับระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง สอดคล้องกับสมรรถนะการแยกในกรณีใช้เมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำกับแก๊สเป็ยก ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ แสดงว่าแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริงมีอุณหภูมิสูง





รูปที่ 4.17 ผลค่าการซึมผ่านแก๊สจากระบบท่อแก๊สชีวภาพจริง เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (A: ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์; B: ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน; C: ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน; D: ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน)





รูปที่ 4.18 ผลค่าการเลือกสรรแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง เปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกรณีต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (A : ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน; B : ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน; C: ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ชนิดของเมมเบรนที่เตรียมขึ้นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกมีเทนจากแก๊สชีวภาพประกอบด้วย

- เมมเบรนเชื่อมขวางโคโตซาน
- เมมเบรนไม่เชื่อมขวางโคโตซาน
- เมมเบรนเชื่อมขวางโคโตซาน-ซีโอดี
- เมมเบรนไม่เชื่อมขวางโคโตซาน-ซีโอดี
- เมมเบรนเชื่อมขวางโคโตซาน-ซีโอดีที่บวมตัวด้วยน้ำ

โคโตซานที่ใช้ในการเตรียมเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 9.5×10^5 ดอลตัน และร้อยละการกำจัดหมู่แอสีทิลเท่ากับ 90 ± 5 ซีโอดีที่ใช้ในงานวิจัยเป็น ซีโอดีเอ มีขนาดของรูพรุน พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 2551.6 อังสตรอม, 13.9 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.0137 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

1.) ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนต่อสมรรถนะแยกแก๊ส

การเชื่อมขวางเมมเบรนโดยสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง แต่ค่าเลือกสรรคู่แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางเมมเบรน จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง โมเลกุลของแก๊สจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้น้อยลง อีกทั้งการเชื่อมขวางเมมเบรนยังมีความสามารถในการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นด้วย

2.) ผลของอุณหภูมิต่อสมรรถนะการแยกแก๊ส

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านแก๊สเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ปริมาตรอิสระจึงเพิ่มขึ้น โมเลกุลของแก๊สจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น

3.) ผลของความดันต่อสมรรถนะการแยกแก๊ส

การเพิ่มขึ้นของความดัน ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านแก๊สเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สลดลง เนื่องจากในกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนมีความดันย่อยเป็นแรงขับ ดังนั้นความดันที่เพิ่มขึ้น จะทำให้โมเลกุลของแก๊สสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น

4.) ผลของการเติมซีโอไลต์ต่อสมรรถนะการแยกแก๊ส

การเติมซีโอไลต์ในเมมเบรนไคโตซาน ส่งผลต่อสมบัติของเมมเบรนดังนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณซีโอไลต์ในเมมเบรนส่งผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลน้ำไว้ในโพรงได้ดี และค่าการเลือกสรรคู่แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากความมีขั้วของซีโอไลต์ สามารถดึงดูดให้โมเลกุลของแก๊สอยู่ในโพรงของซีโอไลต์ได้ ในขณะที่ความสามารถในการทนต่อแรงดึงลดลง เนื่องจากจะไปทำให้เกิดรอยแยกที่ผิวสัมผัส (interfacial void) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และพื้นผิวซีโอไลต์ และค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง เนื่องจากเส้นทางที่โมเลกุลแก๊สสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

5.) การทดสอบสมรรถนะการแยกแก๊สกับระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง

จากผลของการทดลอง เมมเบรนสูตรที่ให้ค่าการเลือกสรรแก๊สดีที่สุดคือ เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีการเติมปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน จึงเลือกใช้เมมเบรนนี้ทดสอบกับระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง ผลการตรวจวัดพบว่า สอดคล้องกับสมรรถนะการแยกอุดมคติ (ในเทอมของค่าการเลือกสรร) กับกรณีใช้เมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำทดสอบกับแก๊สเปียก ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ ดังแสดงในตาราง แสดงว่าสามารถใช้กระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์กับระบบบ่อแก๊สชีวภาพได้ดี

Parameter	Dry membrane/dry gas		Swollen membrane/wet gas		Real process position 1	Real process position 2
	30 °C	60°C	30 °C	60°C		
CO ₂ permeability, barrer	66.8±6.4	272.9±5.6	788.0±17.8	872.1±33.7	195.6±13.3	233.6±17.6
CH ₄ permeability, barrer	4.0±0.6	7.8±0.6	20.6±2.2	23.7±1.0	6.0±1.9	6.6±1.3
H ₂ permeability, barrer	387.5±26.1	553.0±54.4	2102.1±31.8	2244.6±82.2	428.0±6.4	484.2±29.3
N ₂ permeability, barrer	7.4±0.6	11.8±0.9	33.7±0.9	37.4±2.1	8.2±0.6	10.5±1.0
CO ₂ /CH ₄ selectivity	16.5±1.6	35.0±1.0	38.2±0.2	36.9±1.7	32.8±0.5	35.5±0.2
H ₂ /CH ₄ selectivity	96.9±1.5	93.7±16.1	101.9±0.3	94.9±6.2	71.9±1.5	73.6±5.2
N ₂ /CH ₄ selectivity	1.9±0.1	1.8±0.2	1.6±0.1	1.7±0.1	1.4±0.1	1.5±0.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการทดสอบสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรนเชื่อมขวางโคโตซาน-ซีโอดี โดยใช้แก๊สผสมเป็นสารป้อน และศึกษาอายุการใช้งานเมมเบรน เพราะโคโตซานเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ น่าจะมีอายุการใช้งานสั้น ซึ่งจะเป็นข้อเสียที่สำคัญอย่างหนึ่ง ของความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นเมมเบรนเชิงพาณิชย์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Moulijn, J.A. Cemical process technology. United States of America: John Wiley & Sons, 2001.
- [2] อัญชลี อินตรา. การเตรียมและลักษณะสมบัติของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนชนิดไคโตซานคอมโพสิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [3] ประพจน์ เหล่ามงคลนิมิตร. การเตรียมและลักษณะสมบัติของเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนชนิดไคโตซาน-ซีโอไลต์และพอลิซิลโฟน-ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [4] “Biogas”, Available from: <http://www.nidambe11.net>. [25/12/2008]
- [5] กฤษณา สอนจันทร์ และรณชัย เอกฉัตร. หลักสูตรการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเบื้องต้น. โครงการพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมและประชาสัมพันธ์ความรู้ด้านก๊าซชีวภาพ, 2547.
- [6] “Benefit of biogas”, Available from: http://www.ku.ac.th/emagazine/bio_gass/.html. [25/12/2008]
- [7] ชันทอง สุนทรภา. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [8] รัตนา จิระรัตนานนท์. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [9] Chunga, T.S., Jianga, L.Y., Lia, Y., and Kulprathipanja, S. Mixed matrix membranes (MMMs) comprising organic polymers with dispersed inorganic fillers for gas separation. Journal of Membrane Science 32 (2007): 483–507.
- [10] สุวนุญ จิระกาญจชัย รังรอง ยกสำน และโกสุม สมัครรัตน์. สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคติน-ไคโตซาน. การประชุมเชิงปฏิบัติการไคตินและไคโตซานจากวัตถุดิบธรรมชาติสู่การประยุกต์ใช้, 2544.
- [11] “Chitin–chitosan”, Available from: <http://www.mtec.or.th/th/imager/pdf/chitin-chitosan/chapter 6.pdf>. [10/03/2009]
- [12] “Zeolite”, Available from: <http://www.oknation.net/blog/zeolite-saponin>. [10/03/2009]

- [13] ทรรตินา จรัสรัตนมงคล. การผลิตซีโอไลต์ด้วยดินเบาให้เป็นสารดูดซับและการทดลองบำบัดน้ำเสียในนาุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2542.
- [14] Sen, D., Kalıpcilar, H., and Yilmaz, L. Development of polycarbonate based zeolite 4A filled mixed matrix gas separation membranes. Journal of Membrane Science 303 (2007): 194–203.
- [15] Li, Y., Chunga, T.S., Caoa, C., and Kulprathipanja, S. The effects of polymer chain rigidification, zeolite pore size and pore blockage on polyethersulfone (PES)-zeolite A mixed matrix membranes. Journal of Membrane Science 260 (2005): 45–55.
- [16] Li, Y., Guan, H.M., Chung, T.S., and Kulprathipanja., S. Effects of novel silane modification of zeolite surface on polymer chain rigidification and partial pore blockage in polyethersulfone (PES)–zeolite A mixed matrix membranes. Journal of Membrane Science 275 (2006): 17–28.
- [17] Ansona, M., Marchese, J., Garis, E., Ochoaa, N., and Pagliero., C. ABS copolymer-activated carbon mixed matrix membranes for CO₂/CH₄ separation. Journal of Membrane Science 243 (2004): 19–28.
- [18] Pechar, T.W., Kim, S., Vaughan, B., Maranda, E., Baranauskas, V., Riffle, J. Jeong, H.K., and Tsapatsis., M. Preparation and characterization of a poly(imide siloxane) and zeolite L mixed matrix membrane. Journal of Membrane Science 277 (2006): 210–218.
- [19] Tin, P.S., Chung, T.S., Liu, Y., Wang, R., Liu, S.L., and Pramoda, K.P. Effects of cross-linking modification on gas separation performance of Matrimid membrane. Journal of Membrane Science 225 (2003): 77–90.
- [20] Cui, Z., Xiang, Y., Si, J., Yang, M., Zhang, Q., and Zhang, T. Ionic interactions between sulfuric acid and chitosan membranes. Carbohydrate Polymers 73 (2008) : 111–116.
- [21] Kittur, A.A., Kulkarni, S.S., Aralaguppi, M.I., and Kariduraganavar, M.Y. Preparation and characterization of novel pervaporation membranes for the separation of water–isopropanol mixtures using chitosan and NaY zeolite. Journal of Membrane Science 247(2005): 75–86.

- [22] Hong, W., Bin, Z., Xiaohong, Z., Jingtao, W., Weikang, and Y., Zhongyi, J. Surface-modified Y zeolite-filled chitosan membrane for direct methanol fuel cell. Journal of Power Sources 173(2007): 842–852.
- [23] Sridhar, S., Suryamurali, R., Smitha, B., and Aminabhavi, T.M. Development of crosslinked poly(ether-block-amide) membrane for CO₂/CH₄ separation. Journal of Membrane Science 297(2007): 267–274.
- [24] Liu, L., Chakma, A., and Feng, X. Gas permeation through water-swollen hydrogel membrane. Journal of Membrane Science 310(2008): 66–75.
- [25] Tomita, T., Nakayama, K., and Sakai, H. Gas separation characteristics of DDR type zeolite membrane. Microporous and mesoporous materials 68(2004): 71-75.
- [26] ชัยนนต์ กิมยงค์. การพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรในถังปฏิกรณ์แบบสองขั้นตอนที่มีการไหลวนกลับของน้ำเสีย. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, 2545.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

1. ค่าปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน

ตารางที่ ก.1 ค่าปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนของเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์

ชนิดของเมมเบรน	ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน
Crosslinked chitosan	0.66 ± 0.02
Crosslinked chitosan-zeolite 10%	0.76 ± 0.03
Crosslinked chitosan-zeolite 20%	0.83 ± 0.02
Crosslinked chitosan-zeolite 30%	0.87 ± 0.04
Crosslinked chitosan-zeolite 40%	0.94 ± 0.02

2. ค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึง

ตารางที่ ก.2.1 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าความสามารถทนต่อแรงดึง (เมกะปาสคาล)
Crosslinked chitosan	65.8 ± 6.2
Crosslinked chitosan-zeolite 10%	63.6 ± 5.0
Crosslinked chitosan-zeolite 20%	51.2 ± 3.0
Crosslinked chitosan-zeolite 30%	47.0 ± 1.9
Crosslinked chitosan-zeolite 40%	36.1 ± 2.3

ตารางที่ ก.2.2 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไม่เชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าความสามารถทนต่อแรงดึง (เมกะปาสคาล)
Crosslinked chitosan	63.5 ± 5.1
Crosslinked chitosan-zeolite 10%	59.3 ± 0.6
Crosslinked chitosan-zeolite 20%	46.8 ± 3.7
Crosslinked chitosan-zeolite 30%	45.8 ± 2.3
Crosslinked chitosan-zeolite 40%	33.6 ± 1.8

ตารางที่ ก.2.3 ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรน เชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่บวมตัวด้วยน้ำ

ชนิดของเมมเบรน	ค่าความสามารถทนต่อแรงดึง (เมกะปาสคาล)
Crosslinked chitosan	12.6 ± 0.8
Crosslinked chitosan-zeolite 20%	10.9 ± 1.0
Crosslinked chitosan-zeolite 40%	8.0 ± 0.6

3. ค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ก.3.1 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	184.7 ± 20.3
Crosslinked chitosan-zeolite 10%	116.3 ± 9.7
Crosslinked chitosan-zeolite 20%	92.3 ± 7.3
Crosslinked chitosan-zeolite 30%	84.2 ± 8.8
Crosslinked chitosan-zeolite 40%	66.8 ± 6.4

ตารางที่ ก.3.2 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	185.5 ± 16.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	123.2 ± 29.6
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	95.9 ± 8.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	89.3 ± 8.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	77.3 ± 13.3

ตารางที่ ก.3.3 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	209.9 ± 19.0
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	127.7 ± 26.3
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	103.4 ± 11.4
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	97.1 ± 6.8
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	84.9 ± 13.8

ตารางที่ ก.3.4 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	207.5 ± 33.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	122.7 ± 22.8
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	107.2 ± 8.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	103.1 ± 4.8
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	72.9 ± 25.6

ตารางที่ ก.3.5 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	212.0 ± 23.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	124.0 ± 28.7
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	114.2 ± 15.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	98.1 ± 14.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	84.0 ± 20.9

ตารางที่ ก.3.6 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	228.8 ± 13.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	132.9 ± 27.4
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	127.1 ± 11.7
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	112.0 ± 19.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	87.5 ± 20.2

ตารางที่ ก.3.7 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	211.8 ± 26.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	123.5 ± 27.0
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	114.3 ± 17.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	111.7 ± 9.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	75.6 ± 21.0

ตารางที่ ก.3.8 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	217.3 ± 19.1
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	132.6 ± 27.9
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	125.0 ± 9.5
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	113.1 ± 27.8
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	89.0 ± 27.3

ตารางที่ ก.3.9 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	235.1 ± 18.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	135.2 ± 33.3
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	127.5 ± 16.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	120.5 ± 16.5
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	89.4 ± 19.6

ตารางที่ ก.3.10 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	191.7 ± 9.1
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	119.5 ± 16.5
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	105.8 ± 10.4
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	99.2 ± 1.7
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	84.7 ± 3.4

ตารางที่ ก.3.11 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	192.1 ± 11.8
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	127.1 ± 17.6
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	109.6 ± 31.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	99.8 ± 14.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	86.8 ± 38.6

ตารางที่ ก.3.12 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	218.3 ± 15.4
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	135.5 ± 22.3
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	113.1 ± 34.9
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	111.5 ± 16.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	90.3 ± 7.3

ตารางที่ ก.3.13 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	218.4 ± 11.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	126.7 ± 17.2
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	112.2 ± 26.5
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	111.7 ± 18.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	88.5 ± 32.7

ตารางที่ ก.3.14 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	230.8 ± 22.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	132.1 ± 15.2
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	131.3 ± 26.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	113.2 ± 19.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	98.2 ± 26.6

ตารางที่ ก.3.15 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	256.2 ± 18.4
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	147.1 ± 27.1
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	130.7 ± 19.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	122.3 ± 18.4
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	99.9 ± 29.5

ตารางที่ ก.3.16 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	225.1 ± 16.1
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	134.3 ± 14.2
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	122.0 ± 27.8
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	116.1 ± 14.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	91.6 ± 32.9

ตารางที่ ก.3.17 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	234.2 ± 17.7
Crosslinked chitosan-zeolite 10%	140.6 ± 17.6
Crosslinked chitosan-zeolite 20%	136.0 ± 26.1
Crosslinked chitosan-zeolite 30%	119.8 ± 20.3
Crosslinked chitosan-zeolite 40%	104.2 ± 34.2

ตารางที่ ก.3.18 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	263.3 ± 17.4
Crosslinked chitosan-zeolite 10%	156.2 ± 27.2
Crosslinked chitosan-zeolite 20%	147.8 ± 21.3
Crosslinked chitosan-zeolite 30%	124.8 ± 22.2
Crosslinked chitosan-zeolite 40%	119.8 ± 31.6

ตารางที่ ก.3.19 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางที่บวมตัว ด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	316.2 ± 25.2
Crosslinked chitosan-zeolite 10%	278.5 ± 23.5
Crosslinked chitosan-zeolite 30%	232.0 ± 20.4
Crosslinked chitosan-zeolite 40%	203.8 ± 20.7

ตารางที่ ก.3.20 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	353.9 ± 34.1
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	288.5 ± 6.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	243.2 ± 28.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	222.5 ± 20.3

ตารางที่ ก.3.21 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปียกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	694.2 ± 30.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	562.7 ± 20.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	489.7 ± 34.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	413.0 ± 24.1

ตารางที่ ก.3.22 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปียกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	782.1 ± 33.8
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	670.5 ± 21.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	587.1 ± 18.8
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	535.8 ± 33.7

ตารางที่ ก.3.23 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปียกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	1110.1 ± 32.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	995.8 ± 27.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	885.7 ± 17.6
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	788.0 ± 17.8

ตารางที่ ก.3.24 ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปียกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	1159.3 ± 33.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1084.3 ± 20.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	959.6 ± 26.4
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	872.1 ± 33.7

4. ค่าการซึมผ่านของแก๊สมีเทน

ตารางที่ ก.4.1 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30
องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	14.4 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	9.0 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	6.5 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	5.4 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	4.0 ± 0.6

ตารางที่ ก.4.2 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	15.6 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	9.9 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	7.5 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	6.6 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	5.7 ± 1.0

ตารางที่ ก.4.3 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	17.9 ± 1.7
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	10.8 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	8.2 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	7.3 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	6.1 ± 0.8

ตารางที่ ก.4.4 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	17.0 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	9.5 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	8.0 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	7.2 ± 0.4
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	4.8 ± 0.6

ตารางที่ ก.4.5 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	17.8 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	10.1 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	9.0 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	8.1 ± 0.4
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	5.9 ± 0.8

ตารางที่ ก.4.6 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	20.3 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.4 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	10.8 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	9.4 ± 0.0
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	6.7 ± 0.8

ตารางที่ ก.4.7 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	17.6 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	10.2 ± 0.5
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	8.9 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	8.0 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	5.3 ± 0.6

ตารางที่ ก.4.8 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	18.9 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.1 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	10.0 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	8.2 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	6.3 ± 0.9

ตารางที่ ก.4.9 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	21.1 ± 1.7
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.7 ± 1.1
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	11.0 ± 1.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	10.2 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	7.0 ± 0.8

ตารางที่ ก.4.10 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	15.0 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	9.3 ± 1.7
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	7.6 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	6.5 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	5.5 ± 0.3

ตารางที่ ก.4.11 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	16.3 ± 1.4
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	10.4 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	8.7 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	7.5 ± 0.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	6.5 ± 0.6

ตารางที่ ก.4.12 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	18.8 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.6 ± 1.9
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	9.2 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	8.5 ± 0.5
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	6.6 ± 0.9

ตารางที่ ก.4.13 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	18.0 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	9.9 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	8.4 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	8.1 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	6.3 ± 0.6

ตารางที่ ก.4.14 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	20.2 ± 2.4
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.0 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	10.4 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	8.3 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	7.1 ± 0.5

ตารางที่ ก.4.15 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	23.0 ± 2.4
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.9 ± 2.2
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	11.4 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	10.5 ± 0.4
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	7.4 ± 0.8

ตารางที่ ก.4.16 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	18.9 ± 1.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.0 ± 1.7
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	9.9 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	8.8 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	6.8 ± 0.6

ตารางที่ ก.4.17 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	20.8 ± 2.1
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.8 ± 1.7
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	11.2 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	9.1 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	7.8 ± 0.6

ตารางที่ ก.4.18 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	23.9 ± 3.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	13.6 ± 2.2
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.8 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	10.5 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	8.5 ± 1.2

ตารางที่ ก.4.19 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	18.2 ± 2.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	15.3 ± 3.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.1 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	11.0 ± 1.0

ตารางที่ ก.4.20 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	21.2 ± 2.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	16.9 ± 3.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.8 ± 2.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	12.4 ± 1.9

ตารางที่ ก.4.21 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนเปียกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30
องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	16.3 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.5 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	10.7 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	8.9 ± 0.7

ตารางที่ ก.4.22 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนเปียกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60
องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	19.3 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	16.1 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.7 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	12.3 ± 1.0

ตารางที่ ก.4.23 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนเป็ยกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	31.3 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	27.2 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	23.4 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	20.6 ± 2.2

ตารางที่ ก.4.24 ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทนเป็ยกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	34.9 ± 1.7
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	31.8 ± 1.8
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	26.7 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	23.7 ± 1.0

5. ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน

ตารางที่ ก.5.1 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30
องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	980.5 ± 16.8
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	770.5 ± 13.7
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	509.8 ± 23.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	387.5 ± 26.1

ตารางที่ ก.5.2 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	1037.6 ± 11.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	824.5 ± 18.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	654.0 ± 15.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	453.0 ± 14.4

ตารางที่ ก.5.3 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	1657.7 ± 43.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1423.1 ± 11.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	1292.6 ± 11.6
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	1185.7 ± 12.6

ตารางที่ ก.5.4 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	1873.7 ± 15.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1517.5 ± 19.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	1312.4 ± 22.0
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	1232.5 ± 24.6

ตารางที่ ก.5.5 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนเป็ยกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	1808.3 ± 11.1
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1664.6 ± 17.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	1477.9 ± 19.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	1395.3 ± 17.0

ตารางที่ ก.5.6 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนเป็ยกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	1949.9 ± 23.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1766.9 ± 22.9
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	1588.3 ± 19.4
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	1488.0 ± 17.2

ตารางที่ ก.5.7 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนเป็ยกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	2745.8 ± 20.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	2611.5 ± 22.7
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	2349.4 ± 25.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	2102.1 ± 31.8

ตารางที่ ก.5.8 ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจนเป็ยกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	2838.4 ± 19.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	2703.3 ± 26.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	2444.3 ± 39.6
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	2244.6 ± 32.2

6. ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน

ตารางที่ ก.6.1 ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	18.3 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	13.7 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	9.9 ± 1.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	7.4 ± 0.6

ตารางที่ ก.6.2 ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	21.7 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	15.1 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	12.7 ± 2.0
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	8.8 ± 0.9

ตารางที่ ก.6.3 ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	33.1 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	28.6 ± 1.8
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	25.9 ± 2.7
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	22.5 ± 0.8

ตารางที่ ก.6.4 ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	35.7 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	30.6 ± 2.5
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	27.1 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	24.4 ± 1.9

ตารางที่ ก.6.5 ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจนเปียกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30
องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	28.7 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	25.3 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	23.8 ± 2.7
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	21.9 ± 1.5

ตารางที่ ก.6.6 ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจนเปียกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	31.0 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	28.7 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	27.0 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	24.7 ± 1.4

ตารางที่ ก.6.7 ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจนเปียกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	44.8 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	39.9 ± 1.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	36.3 ± 1.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	33.7 ± 0.9

ตารางที่ ก.6.8 ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจนเปียกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการซึมผ่านแก๊สไนโตรเจน (แบเรอร์)
Crosslinked chitosan	48.7 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	44.3 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	39.6 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	37.4 ± 1.1

7. ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน

ตารางที่ ก.7.1 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห่งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	12.8 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.9 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	14.2 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	15.4 ± 1.6
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	16.5 ± 1.6

ตารางที่ ก.7.2 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห่งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.9 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.4 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.8 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.5 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	13.5 ± 0.7

ตารางที่ ก.7.3 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห่งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.7 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.8 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.7 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.4 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	13.9 ± 0.9

ตารางที่ ก.7.4 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	12.2 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.9 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	13.4 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	14.3 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	14.7 ± 1.0

ตารางที่ ก.7.5 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.9 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.3 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.8 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.8 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	14.2 ± 1.0

ตารางที่ ก.7.6 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.3 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.7 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	11.8 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	11.9 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	13.0 ± 0.6

ตารางที่ ก.7.7 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	12.4 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.2 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.9 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.9 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	14.3 ± 1.0

ตารางที่ ก.7.8 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.5 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.0 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.5 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.8 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	14.2 ± 1.2

ตารางที่ ก.7.9 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.1 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.5 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	11.6 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	11.9 ± 0.6
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	12.8 ± 0.6

ตารางที่ ก.7.10 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	12.8 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.9 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	13.9 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	15.2 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	15.4 ± 1.2

ตารางที่ ก.7.11 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.8 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.2 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.6 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.3 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	13.4 ± 0.7

ตารางที่ ก.7.12 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.6 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.7 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.3 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.1 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	13.7 ± 0.9

ตารางที่ ก.7.13 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	12.1 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.8 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	13.3 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.9 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	14.0 ± 0.8

ตารางที่ ก.7.14 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.6 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.0 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.6 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.7 ± 1.0
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	13.8 ± 1.0

ตารางที่ ก.7.15 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.1 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.4 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	11.5 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	11.7 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	13.5 ± 0.9

ตารางที่ ก.7.16 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.9 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	12.2 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.4 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.2 ± 0.7
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	13.5 ± 0.7

ตารางที่ ก.7.17 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 2 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.3 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.9 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	12.2 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	13.2 ± 0.9
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	13.3 ± 0.9

ตารางที่ ก.7.18 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบไม่
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และความดัน 3 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	11.0 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	11.5 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 20%	11.6 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	11.9 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	14.2 ± 1.2

ตารางที่ ก.7.19 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วย
น้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	17.3 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	18.2 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	17.7 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	18.5 ± 0.3

ตารางที่ ก.7.20 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วย
น้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	16.7 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	17.1 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	17.6 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	18.0 ± 0.2

ตารางที่ ก.7.21 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนเปียกของเมมเบรนแห้งแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	42.5 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	44.8 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	45.6 ± 0.8
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	46.6 ± 0.8

ตารางที่ ก.7.22 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนเป็ยกของเมมเบรนแห้งแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	40.6 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	41.8 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	42.9 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	43.6 ± 0.3

ตารางที่ ก.7.23 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนเป็ยกของเมมเบรนที่บวมตัว
ด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	35.5 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	36.6 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	37.9 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	38.2 ± 0.2

ตารางที่ ก.7.24 ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน เป็ยกของเมมเบรนที่บวมตัว
ด้วยน้ำแบบเชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	33.2 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	34.1 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	36.0 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	36.9 ± 0.2

8. ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน

ตารางที่ ก.8.1 ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	68.1 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	85.5 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	93.6 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	96.9 ± 1.5

ตารางที่ ก.8.2 ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	61.1 ± 1.1
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	86.6 ± 1.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	90.8 ± 1.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	93.7 ± 1.1

ตารางที่ ก.8.3 ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	90.8 ± 0.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	93.1 ± 0.5
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	98.4 ± 0.5
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	107.4 ± 0.5

ตารางที่ ก.8.4 ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	88.5 ± 0.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	89.8 ± 0.5
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	94.0 ± 0.5
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	99.8 ± 0.5

ตารางที่ ก.8.5 ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทนเปียกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	110.6 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	132.7 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	137.6 ± 1.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	157.4 ± 1.2

ตารางที่ ก.8.6 ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทนเปียกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	101.2 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	110.1 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	116.2 ± 1.5
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	121.0 ± 1.5

ตารางที่ ก.8.7 ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทนเปือกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	87.9 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	96.1 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	100.6 ± 0.3
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	101.9 ± 0.3

ตารางที่ ก.8.8 ค่าการเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทนเปือกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	81.3 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	85.1 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	91.6 ± 0.2
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	94.9 ± 0.2

9. ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน

ตารางที่ ก.9.1 ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	1.3 ± 0.1
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1.5 ± 0.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	1.8 ± 0.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	1.9 ± 0.1

ตารางที่ ก.9.2 ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	1.2 ± 0.03
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1.5 ± 0.03
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	1.8 ± 0.03
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	1.8 ± 0.03

ตารางที่ ก.9.3 ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	1.8 ± 0.03
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1.9 ± 0.03
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	2.0 ± 0.03
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	2.0 ± 0.03

ตารางที่ ก.9.4 ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทนแห้งของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	1.7 ± 0.02
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1.8 ± 0.02
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	2.0 ± 0.02
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	2.0 ± 0.02

ตารางที่ ก.9.5 ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทนเป็ยกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	1.8 ± 0.03
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	2.0 ± 0.03
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	2.2 ± 0.03
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	2.5 ± 0.03

ตารางที่ ก.9.6 ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทนเป็ยกของเมมเบรนแห้งแบบเชื่อมขวาง ที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	1.6 ± 0.02
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1.8 ± 0.02
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	2.0 ± 0.02
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	2.0 ± 0.02

ตารางที่ ก.9.7 ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทนเป็ยกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	1.4 ± 0.1
Crosslinked chitosan–zeolite 10%	1.5 ± 0.1
Crosslinked chitosan–zeolite 30%	1.6 ± 0.1
Crosslinked chitosan–zeolite 40%	1.6 ± 0.1

ตารางที่ ก.9.8 ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทนเป็ยกของเมมเบรนที่บวมตัวด้วยน้ำแบบ
เชื่อมขวาง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

ชนิดของเมมเบรน	ค่าการเลือกสรรแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน
Crosslinked chitosan	1.4 ± 0.1
Crosslinked chitosan-zeolite 10%	1.4 ± 0.1
Crosslinked chitosan-zeolite 30%	1.5 ± 0.1
Crosslinked chitosan-zeolite 40%	1.6 ± 0.1

10. ค่าการซึมผ่าน และค่าการเลือกสรรแก๊สของระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริง

ตารางที่ ก.10.1 ค่าการซึมผ่านแก๊สของระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริงของเมมเบรนที่มีปริมาณซีโอไลต์
ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก บริเวณตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพออกจากบ่อหมัก

ชนิดของแก๊ส	ค่าการซึมผ่านแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์	195.6 ± 13.3
มีเทน	6.0 ± 1.9
ไฮโดรเจน	428.0 ± 16.4
ไนโตรเจน	8.2 ± 0.6

ตารางที่ ก.10.2 ค่าการซึมผ่านแก๊สของระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริงของเมมเบรนที่มีปริมาณซีโอไลต์
ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก บริเวณตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพผ่านหอพ่นน้ำ

ชนิดของแก๊ส	ค่าการซึมผ่านแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์	233.6 ± 17.6
มีเทน	6.6 ± 1.3
ไฮโดรเจน	484.2 ± 29.3
ไนโตรเจน	10.5 ± 1.0

ตารางที่ ก.10.3 ค่าการเลือกสรรแก๊สของระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริงของเมมเบรนที่มีปริมาณ
ซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก บริเวณตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพออกจากบ่อหมัก

ชนิดของแก๊ส	ค่าการเลือกสรรแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน	32.8 ± 0.5
ไฮโดรเจนต่อมีเทน	71.9 ± 1.5
ไนโตรเจน ต่อมีเทน	1.4 ± 0.1

ตารางที่ ก.10.4 ค่าการเลือกสรรแก๊สของระบบบ่อแก๊สชีวภาพจริงของเมมเบรนที่มีปริมาณ
ซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก บริเวณตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพผ่านหอพ่นน้ำ

ชนิดของแก๊ส	ค่าการเลือกสรรแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน	35.5 ± 0.2
ไฮโดรเจนต่อมีเทน	73.6 ± 5.2
ไนโตรเจน ต่อมีเทน	1.5 ± 0.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

1. ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน

น้ำหนักของเมมเบรนแห้ง	=	0.0458	กรัม
น้ำหนักของเมมเบรนเปียก	=	0.0756	กรัม

$$\begin{aligned} \text{Water uptake} &= \frac{(\text{Weight}_{\text{wet}} - \text{Weight}_{\text{dry}})}{\text{Weight}_{\text{dry}}} \\ &= \frac{(0.0756 - 0.0458)}{0.0458} = 0.6507 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

2. ค่าการซึมผ่านแก๊ส

อัตราการไหลของแก๊สผ่านของเมมเบรน	=	0.0202	Sccs
ความดันต่าง	=	77.0070	cmHg
เส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน	=	3.20	cm
ความหนาของเมมเบรน	=	0.0018	cm
พื้นที่ของเมมเบรน	=	8.0457	cm ²

$$P = \frac{QL}{\Delta PA}$$

P = สภาพให้แก๊สซึมผ่านได้ (cm³ (STP)*cm)/(s*cm²*cmHg)

Q = อัตราการไหลผ่านเมมเบรน (Sccs)

L = ความหนาของเมมเบรน (cm)

ΔP = ความดันต่าง (cmHg)

A = พื้นที่ของเมมเบรน (cm²)

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{0.0202 \times 0.0018}{77.0070 \times 8.0457} = 5.8685 \times 10^{-8} (\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}) / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg}) \\
 &= 586.8536 \text{ barrer} \\
 1 \text{ barrer} &= 10^{-10} (\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}) / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})
 \end{aligned}$$

3. ค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส

$$\text{ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์} = 184.7 \text{ แบเรอร์}$$

$$\text{ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน} = 14.4 \text{ แบเรอร์}$$

$$\alpha_{\text{CO}_2/\text{CH}_4} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CH}_4}}$$

$$\alpha_{\text{CO}_2/\text{CH}_4} = \text{ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน}$$

$$P_{\text{CO}_2} = \text{ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์}$$

$$P_{\text{CH}_4} = \text{ค่าการซึมผ่านแก๊สมีเทน}$$

$$\alpha_{\text{CO}_2/\text{CH}_4} = \frac{184.7}{14.4} = 12.8$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชมพูนุช อัครัตนิवास เกิดเมื่อวันที่ 22 มีนาคม พุทธศักราช 2528 จบการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค ในปี 2550 จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2551



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย