

รายงานฉบับสมบูรณ์ ปีที่ 1

เรื่อง

“การจัดการเทคโนโลยีในฟาร์มสุกรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบ
แก๊สชีวภาพ”

ทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2552

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.ชั้นทอง สุนทรามาและคณะ

พฤษภาคม 2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ในปีที่ 1 นี้ได้เตรียมเมมเบรนฐานไคโตซานเพื่อนำมาใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทนในระบบแก๊สชีวภาพ ไคโตซานที่ใช้มีมวลโมเลกุลและร้อยละการกำจัดหมู่แอสซิติล 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 เมมเบรนที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ได้แก่ เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน เมมเบรนไม่เชื่อมขวางไคโตซาน, เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์, เมมเบรนไม่เชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ และเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ชนิดบวมตัวด้วยน้ำ ในการเชื่อมขวางเมมเบรนไคโตซานใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ปริมาณการใช้ซีโอไลต์เอร้อยละ 10–40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน ได้ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของเมมเบรน ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี, ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน, ลักษณะพื้นฐานวิทยา, ความสามารถทนต่อแรงดึง, ค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส พบว่าผลของการเติมซีโอไลต์ทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนและค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส เพิ่มขึ้น แต่ค่าความสามารถทนต่อแรงดึงและค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง ผลการศึกษาพบว่า เมมเบรนที่มีศักยภาพมากที่สุดคือเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ เมื่อใช้เมมเบรนแห่งทดสอบกับแก๊สแห้งให้ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, มีเทน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เท่ากับ 66.8 ± 6.4 , 4.0 ± 0.6 , 387.5 ± 26.1 และ 7.4 ± 0.6 แบนเนอร์ ตาม ลำดับ ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน, ไฮโดรเจนต่อมีเทน และไนโตรเจนต่อ มีเทน เท่ากับ 16.5 ± 1.6 , 96.9 ± 1.5 และ 1.9 ± 0.1 ตามลำดับ แต่ผลข้างต้นจะเปลี่ยนไปถ้า เมมเบรนและ/หรือแก๊สไม่แห้ง โดยกรณีที่ใช้แก๊สเปียกและเมมเบรนเปียก ค่าการซึมผ่านแก๊ส และค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส จะเป็น 788.0 ± 17.8 แบนเนอร์, 20.6 ± 2.2 แบนเนอร์, 2102.1 ± 31.8 แบนเนอร์, 33.7 ± 0.9 แบนเนอร์, 38.2 ± 0.2 , 101.9 ± 0.3 และ 1.6 ± 0.1 ตามลำดับ ผลการศึกษา สมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรน 2 ชนิด คือเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน และเมมเบรน เชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จากระบบบ่อแก๊ส ชีวภาพของฟาร์มสุกรกรณีศึกษาพบว่าเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ มีค่าสมรรถนะ การแยกแก๊สสูงกว่าเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซานสอดคล้องกับสมรรถนะการแยกอุดมคติ และ สอดคล้องกับสมรรถนะการแยกอุดมคติจากเมมเบรนแห้ง/แก๊สแห้ง

Abstract

In the 1st year, we have prepared several chitosan based membranes for separation of CO₂ from CH₄ in biogas system. The molecular weight and degree of deacetylation of chitosan were 9.5×10^5 dalton and $90 \pm 5\%$, respectively. Zeolite A having particle size, surface area and pore size of 2551.6 angstrom, 13.9 m²/g and 0.0137 cm³/g was used. The studied types were crosslinked chitosan, uncrosslinked chitosan, crosslinked chitosan–zeolite, uncrosslinked chitosan–zeolite and swollen crosslinked chitosan–zeolite membranes. The crosslinking was done by immersing the membrane in 4% by weight of sulfuric acid solution. Zeolite A contents were varied in the range of 0–40% by weight of chitosan. The membranes were characterized for chemical structure, water uptake, morphology, tensile strength, gas permeability and gas pair selectivity. It was found that water uptake and gas pair selectivity increased with zeolite contents. However, tensile strength and gas permeability were decreased. It was found that the most potential type was 40% crosslinked chitosan–zeolite membrane. In testing dry gas with dry membrane at 30 °C and 1 bar, the permeability of CO₂, CH₄, H₂ and N₂ were 66.8 ± 6.4 , 4.0 ± 0.6 , 387.5 ± 26.1 and 7.4 ± 0.6 barrers, respectively. The selectivity of CO₂/CH₄, H₂/CH₄ and N₂/CH₄ were 16.5 ± 1.6 , 96.9 ± 1.5 and 1.9 ± 0.1 , respectively. These would be differed in testing non dry membrane and/or gas. Those results for swollen membrane and wet gas were 788.0 ± 17.8 , 20.6 ± 2.2 , 2102.1 ± 31.8 , 33.7 ± 0.9 barrers, 38.2 ± 0.2 , 101.9 ± 0.3 and 1.6 ± 0.1 , respectively. In onsite testing of crosslinked chitosan and 40% crosslinked chitosan–zeolite membranes at selected pig farm, it was found that 40% crosslinked chitosan–zeolite membranes showed better performance than the other corresponding to the ideal separation performance and corresponding to the ideal performance of dry membrane and dry gas.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยด้วยเงินงบประมาณแผ่นดินปี 2552 ขอขอบคุณบริษัท เอส พี เอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ใช้เป็นฟาร์มกรณีศึกษาทดสอบการใช้กระบวนการหมักเบรอนแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทน ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ต้นสังกัดของคณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการวิจัยของปีที่ 1	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology)	3
2.2 ปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นในฟาร์มสุกร	4
2.3 แก๊สชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน	6
2.4 รูปแบบบ่อแก๊สชีวภาพสำหรับฟาร์มสุกร	8
2.5 เทคโนโลยีการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน	9
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
3. วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์	14
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.2.1 ชนิดของเมมเบรนที่เตรียมในงานวิจัย	14
3.2.2 วิธีการเตรียมเมมเบรน	14
3.2.3 การทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน	15
3.2.4 ความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength)	16
3.2.5 การทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส	16

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	
4.1 สมบัติของโคโตซานและซีโอไลต์	18
4.2 โครงสร้างทางเคมี	18
4.3 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน	19
4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยา	20
4.5 ความสามารถทนต่อแรงดึง	21
4.6 สมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้ง	
4.6.1 ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรน	22
4.6.2 ผลของความดัน	22
4.6.3 ผลของอุณหภูมิ	25
4.6.4 ผลของปริมาณซีโอไลต์	25
4.7 สมรรถนะการแยกแก๊สจากสภาพจำลองระบบบ่อแก๊สชีวภาพ	
4.7.1 สมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำ	28
4.7.2 สมรรถนะการแยกแก๊สเปียกของเมมเบรนแห้ง	28
4.7.3 สมรรถนะการแยกแก๊สเปียกของเมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำ	29
4.8 ผลการศึกษาการใช้กระบวนการเมมเบรนกับฟาร์มสุกรกรณีศึกษา	33
5. สรุปผลการศึกษาและงานที่จะดำเนินการต่อไป	
5.1 สรุปผลการศึกษาปีที่ 1 “การใช้กระบวนการเมมเบรนเพื่อแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทน”	36
5.2 งานที่จะดำเนินการต่อไปในปีที่ 2 “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทั้งหมด”	38
รายการอ้างอิง	39

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณและลักษณะของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตามขนาดฟาร์ม	5
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานขนาดฟาร์มสุกร	5
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของโคโคซานและซีโอไลต์เอ	18
ตารางที่ 4.2 สมรรถนะการแยกแก็สของเมมเบรนจากระบบบ่อกักชีวิภาพของฟาร์มสุกร กรณีศึกษา	35

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
รูปที่ 2.1	หลักการดำเนินงานเทคโนโลยีสะอาด	3
รูปที่ 2.2	ลักษณะขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้ออกซิเจน	7
รูปที่ 2.3	ลักษณะการแพร่ของแก๊สผ่านเมมเบรน (ก) แบบมีรู (ข) แบบเนื้อแน่น	10
รูปที่ 3.1	เครื่อง Universal Testing LLOYD Instruments LR 5	16
รูปที่ 3.2	ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส	17
รูปที่ 4.1	FTIR spectra ของเมมเบรนไคโตซาน (a) แบบไม่เชื่อมขวาง (b) แบบเชื่อมขวาง	19
รูปที่ 4.2	ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์	20
รูปที่ 4.3	ลักษณะพื้นผิวของเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ (a) 0% zeolite (b) 10% zeolite (c) 20% zeolite	20
รูปที่ 4.4	ความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์	21
รูปที่ 4.5	ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนต่อค่าการซึมผ่านแก๊สที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บาร์ (a) คาร์บอนไดออกไซด์ (b) มีเทน	23
รูปที่ 4.6	ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนต่อค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์	23
รูปที่ 4.7	ผลของความดันต่อค่าการซึมผ่านแก๊สที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (a) คาร์บอนไดออกไซด์ (b) มีเทน	24
รูปที่ 4.8	ผลของความดันต่อค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	24
รูปที่ 4.9	ผลของอุณหภูมิต่อค่าการซึมผ่านแก๊สที่ความดัน 1 บาร์ (a) คาร์บอนไดออกไซด์ (b) มีเทน	26
รูปที่ 4.10	ผลของอุณหภูมิต่อค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนที่ความดัน 1 บาร์	26
รูปที่ 4.11	ผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อค่าการซึมผ่านแก๊สแห้งผ่านเมมเบรนแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศา เซลเซียสและความดัน 1 บาร์ (a) คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (b) มีเทน และไนโตรเจน	27
รูปที่ 4.12	ผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อค่าการเลือกสรรคู่แก๊สแห้งผ่านเมมเบรนแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์	27

- รูปที่ 4.13 ผลของสภาพเมมเบรนและสภาพแก๊สต่อค่าการซึมผ่านแก๊สที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (a) คาร์บอนไดออกไซด์ (b) มีเทน (c) ไฮโดรเจน (d) ไนโตรเจน 31
- รูปที่ 4.14 ผลของสภาพเมมเบรนและสภาพแก๊สต่อค่าการเลือกสรรคู่แก๊สที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (a) คาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน (b) ไฮโดรเจนต่อมีเทน (c) ไนโตรเจนต่อมีเทน 32
- รูปที่ 4.15 ตำแหน่งตรวจวัด ณ ฟาร์มสุกรกรณีศึกษา (ก) ตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพออกมาจากบ่อหมัก (ข) ตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพผ่านหอกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 34

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ของเสียจากฟาร์มสุกรก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยของเสียส่วนที่เป็นน้ำเสียเกิดจากน้ำล้างคอก (เพื่อล้างมูลสุกรที่เกิดขึ้นจากการขับถ่ายทุกวัน และเศษอาหารที่สุกรทำตกลงบนพื้นคอก) น้ำล้างตัวสุกร และปัสสาวะของสุกร โดยปริมาณของเสียขึ้นกับลักษณะต่าง ๆ เฉพาะตัวของสุกร เช่น เพศ อายุ ขนาด การเคลื่อนไหว ความเคยชินต่อสภาพแวดล้อม ปริมาณและส่วนประกอบของอาหารที่สุกรกิน รวมทั้งอิทธิพลทางจิตใจ เช่น การตื่นตกใจ ความกลัว และความเครียด ทำให้ปริมาณและลักษณะน้ำเสียขึ้นอยู่กับประเภทของฟาร์มสุกร ที่เลี้ยง จำนวนการเลี้ยง ลักษณะการทำความสะอาด และลักษณะการใช้น้ำของแต่ละฟาร์ม ส่วนใหญ่ในปัจจุบันเพื่อความอยู่รอดมีการนำเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพมาใช้เพื่อแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม น้ำเสีย ในขณะที่เดียวกันได้ใช้พลังงานจากแก๊สชีวภาพทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) ในครัวเรือน หรือใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในฟาร์ม นอกจากนี้ ก่อนนำแก๊สชีวภาพไปใช้งานต้องปรับลดปริมาณแก๊สกรดทั้งหลาย ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ให้ลดลงเพื่อลดปัญหาการกัดกร่อนเครื่องจักร ซึ่งส่วนใหญ่ ปัจจุบันรวมทั้งฟาร์มสุกรกรณีศึกษาใช้ระบบการฟอกแก๊สด้วยน้ำหรือน้ำปูนขาว แต่ยังมีประสิทธิภาพไม่มากนัก

โครงการวิจัยนี้จึงต้องการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการจัดการตามหลักการของ เทคโนโลยีสะอาดปรับปรุงระบบการดำเนินการในโรงเรือนเลี้ยงสุกร เพื่อมุ่งหวังให้ระบบการย่อย สลายสารอินทรีย์ในถังหมักมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และปรับเปลี่ยนเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพ แก๊สเป็นกระบวนการเมมเบรน

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีระยะเวลาศึกษา 2 ปี มีวัตถุประสงค์ตลอดการศึกษา คือ

- 1) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพถังหมัก
- 2) การใช้กระบวนการเมมเบรนเพื่อแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทน

1.3 ขอบเขตการวิจัยของปีที่ 1

- 1) เตรียมเมมเบรนไคโตซานแบบไม่มีการเชื่อมขวาง เมมเบรนไคโตซานแบบมีการเชื่อมขวางด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

- 2) เตรียมเมมเบรนคอมโพสิตไคโตซาน-ซีโอไลต์ แบบไม่มีการเชื่อมขวาง และแบบมีการเชื่อมขวาง อย่างละ 5 สูตร ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณไคโตซานต่อ ซีโอไลต์ ดังนี้ 10:0, 10:1, 10:2, 10:3 และ 10:4
- 3) วิเคราะห์สมบัติของเมมเบรน ดังนี้
 - ก. สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความสามารถทนต่อแรงดึง, ร้อยละการดูดซับน้ำ และ ลักษณะพื้นฐานวิทยา
 - ข. สมบัติทางเคมี ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี
 - ค. สมบัติการซึมผ่านได้ของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ และที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส
 - ง. สมบัติการคัดเลือกของคู่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน แก๊สไฮโดรเจนต่อมีเทน และแก๊สไนโตรเจนต่อมีเทน ที่ความดัน 1, 2 และ 3 บาร์ และที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90 องศาเซลเซียส
- 4) ทดสอบการใช้กระบวนการเมมเบรนเพื่อแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทนจากฟาร์มสุกรบริษัท เอส พี เอ็ม อาหารสัตว์ จำกัด ซึ่งตั้งอยู่เลขที่ 125 หมู่ 8 ตำบลอนทราয় อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี 70140

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทนในระบบแก๊สชีวภาพ
- 2) ลดต้นทุนด้านพลังงานในฟาร์มสุกรได้ โดยการใช้ประโยชน์แก๊สมีเทนที่บริสุทธิ์ขึ้น
- 3) ลดปัญหาการกัดกร่อนของท่อและเครื่องจักรเนื่องจากแก๊สกรดในระบบแก๊สชีวภาพ

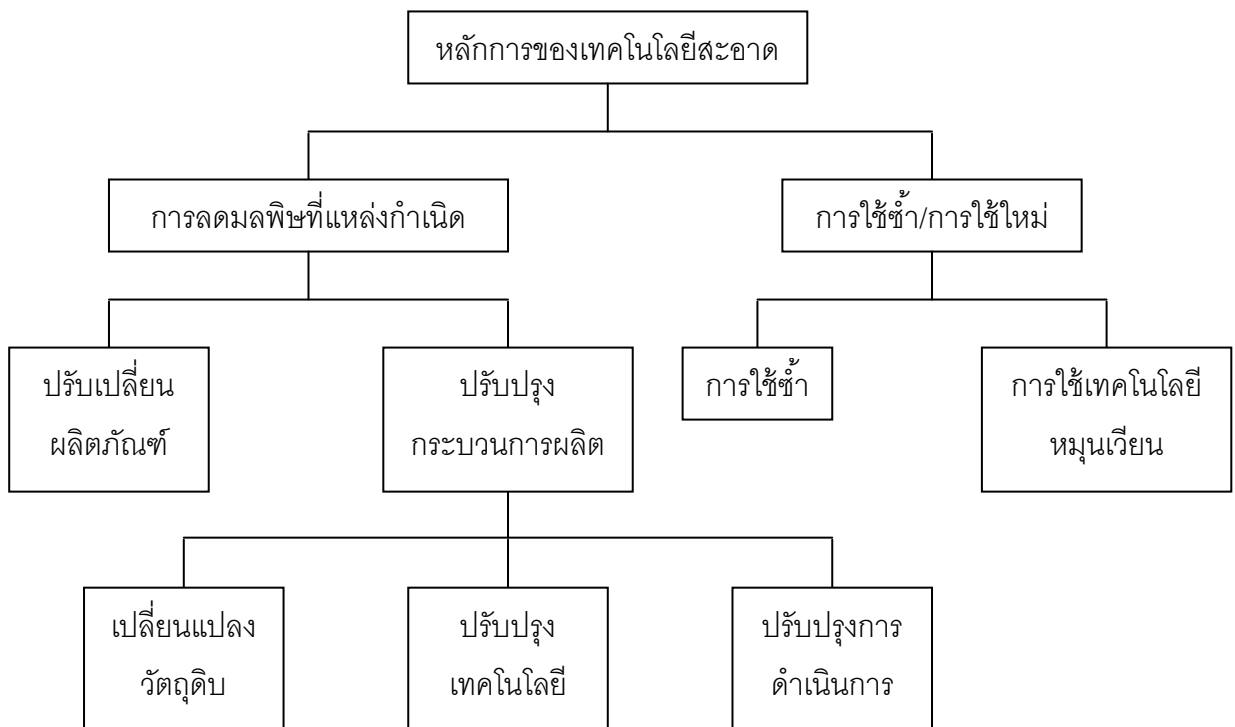
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology)

เทคโนโลยีสะอาดเป็นวิธีการจัดการของเสียจากกระบวนการผลิตโดยใช้กลยุทธ์ในการแยกของเสียหรือลดของเสียที่แหล่งกำเนิด แล้วจึงหาวิธีการนำของเสียที่แยกได้กลับไปใช้งานซ้ำ (Reuse) หรือนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle & Recovery) ส่วนของเสียที่ไม่สามารถหาวิธีการจัดการได้อย่างเหมาะสมก็จะทำการบำบัดตามหลักวิชาการต่อไป

แนวคิดเรื่องการป้องกันมลพิษที่แหล่งกำเนิด อาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป เช่น การป้องกันมลพิษ (Pollution Prevention: P2) หรือการผลิตที่สะอาดขึ้น (Cleaner Production: CP) ซึ่งอาจมีความแตกต่างกันในรายละเอียดเล็กน้อย แต่มีหลักการมุ่งเน้น "มลพิษที่แหล่งกำเนิด เพื่อให้มีของเสียน้อยที่สุด และหากมีของเสียเกิดขึ้น ต้องหาวิธีนำของเหล่านี้นกลับมาใช้ซ้ำ หรือนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้เหลือของเสียสำหรับการบำบัดที่ปลายท่อให้น้อยที่สุด" ซึ่งเป็น หลักการเดียวกันกับเทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology: CT)

หลักการของเทคโนโลยีสะอาดแสดงดังแผนผังตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการดำเนินงานเทคโนโลยีสะอาด [1]

2.2 ปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นในฟาร์มสุกร

ปัญหามลพิษในฟาร์มสุกรที่สำคัญ ได้แก่ กลิ่นเหม็น น้ำเสีย ของเสียและขยะ เสียงรบกวน แอมโมเนียและยูเรีย ซึ่งสามประเภทแรกมีความสัมพันธ์กันสูงมาก นั่นคือหากมีการสะสมของมูลและน้ำเสียมากและไม่ได้ได้รับการจัดการถูกต้องและเหมาะสม ปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นและแอมโมเนีย รบกวนก็จะตามมา

ปัญหากลิ่นเหม็นจะพบทั่วไปในฟาร์มที่ขาดการจัดการที่ดีหรือมีความสกปรกสะสมสูง โดยความเข้มข้นของกลิ่นบริเวณระบรวบรวบและบำบัดน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงสุด 9,770 OU (Odor Unit คือ จำนวนเท่าของอากาศปราศจากกลิ่นที่ต้องใช้ในการเจือจางกลิ่นตัวอย่างจนไปถึงระดับที่ไม่มีกลิ่น) บริเวณกองมูลสุกรและลานตากมูลมีความเข้มข้น 1,479 OU บริเวณที่มีการนำมูลสุกรไปใช้มีความเข้มข้น 818 OU และบริเวณโรงเรือนเลี้ยงสุกรมีความเข้มข้น 213 OU [2]

ปริมาณและลักษณะทั่วไปของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตามขนาดฟาร์มแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะแตกต่างกันตามวิธีการทำความสะอาดคอก ปริมาณน้ำใช้ และความถี่ของการทำความสะอาด รวมทั้งวิธีการจัดการมูล หากมีการแยกมูลสุกรออกก่อนการฉีดล้างทำความสะอาด ความเข้มข้นของน้ำเสียก็จะน้อยลง นอกจากนี้ประเภทของสุกรที่เลี้ยงก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปผู้เลี้ยงจะเน้นความสะอาดของพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์มากกว่าสุกรขุน ทำให้น้ำเสียจากฟาร์ม สุกรพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์มีปริมาณสูงกว่าน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขุนแต่ความเข้มข้นต่ำ

ฟาร์มสุกรมีการแบ่งขนาดฟาร์มเป็น 3 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยใช้น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ (นปส.) หรือ Livestock Unit เป็นเกณฑ์ เมื่อน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ 1 หน่วย เท่ากับ น้ำหนักสุกรรวม 500 กิโลกรัม โดยน้ำหนักเฉลี่ยสุกรพ่อพันธุ์-แม่พันธุ์เท่ากับ 170 กิโลกรัม น้ำหนักเฉลี่ยสุกรขุนเท่ากับ 60 กิโลกรัม และน้ำหนักเฉลี่ยลูกสุกรเท่ากับ 12 กิโลกรัม สำหรับฟาร์มสุกรกรณีศึกษาของโครงการวิจัยนี้มีกำลังการผลิตสุกรขุนจำนวน 150,000 ตัวต่อปี จัดเป็นฟาร์มขนาดใหญ่

ตารางที่ 2.1 ปริมาณและลักษณะของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตามขนาดฟาร์ม [2]

ลักษณะน้ำเสีย	ขนาดฟาร์ม	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
บีโอดี (BOD); มิลลิกรัม/ลิตร	ขนาดใหญ่	1,225	9,000	3,000
	ขนาดกลาง	460	7,650	2,500
	ขนาดเล็ก	239	19,280	1,500
ซีโอดี (COD); มิลลิกรัม/ลิตร	ขนาดใหญ่	2,152	18,388	7,000
	ขนาดกลาง	2,578	31,096	6,800
	ขนาดเล็ก	778	40,000	4,000
สารแขวนลอย (SS); มิลลิกรัม/ลิตร	ขนาดใหญ่	1,304	9,530	4,800
	ขนาดกลาง	149	14,500	3,000
	ขนาดเล็ก	82	1,887	2,000
ไนโตรเจนในรูป TKN; มิลลิกรัม/ลิตร	ขนาดใหญ่	367	981	540
	ขนาดกลาง	235	3,371	540
	ขนาดเล็ก	261	24,480	400
อัตราการเกิดน้ำเสีย; ลิตร/ตัว/วัน	ขนาดใหญ่	-	-	10
	ขนาดกลาง	-	-	15
	ขนาดเล็ก	-	-	20

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานขนาดฟาร์มสุกร [3]

ขนาดฟาร์ม	ประเภท	เทียบเท่าจำนวนสุกร (ตัว)	น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ (นปส.)
ใหญ่	ก	>5,000	>600
กลาง	ข	500–5,000	60–600
เล็ก	ค	50 ถึงน้อยกว่า 500	6 ถึงน้อยกว่า 60

2.3 แก๊สชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน

แก๊สชีวภาพเป็นพลังงานที่เกิดจากการนำของเสีย เช่น มูลสัตว์ น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ขยะ และของเหลือใช้ทางการเกษตร มาผ่านกระบวนการหมัก เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) โดยแบคทีเรียหลายชนิด เมื่อภาวะแวดล้อมเหมาะสม แบคทีเรียจะเจริญ และย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จนกระทั่งในที่สุดเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สชีวภาพ

ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้ออกซิเจนเกิดขึ้น 4 ขั้นตอนตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนี้

ขั้นที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อน (Complex organic compound) ที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน ตามลำดับ

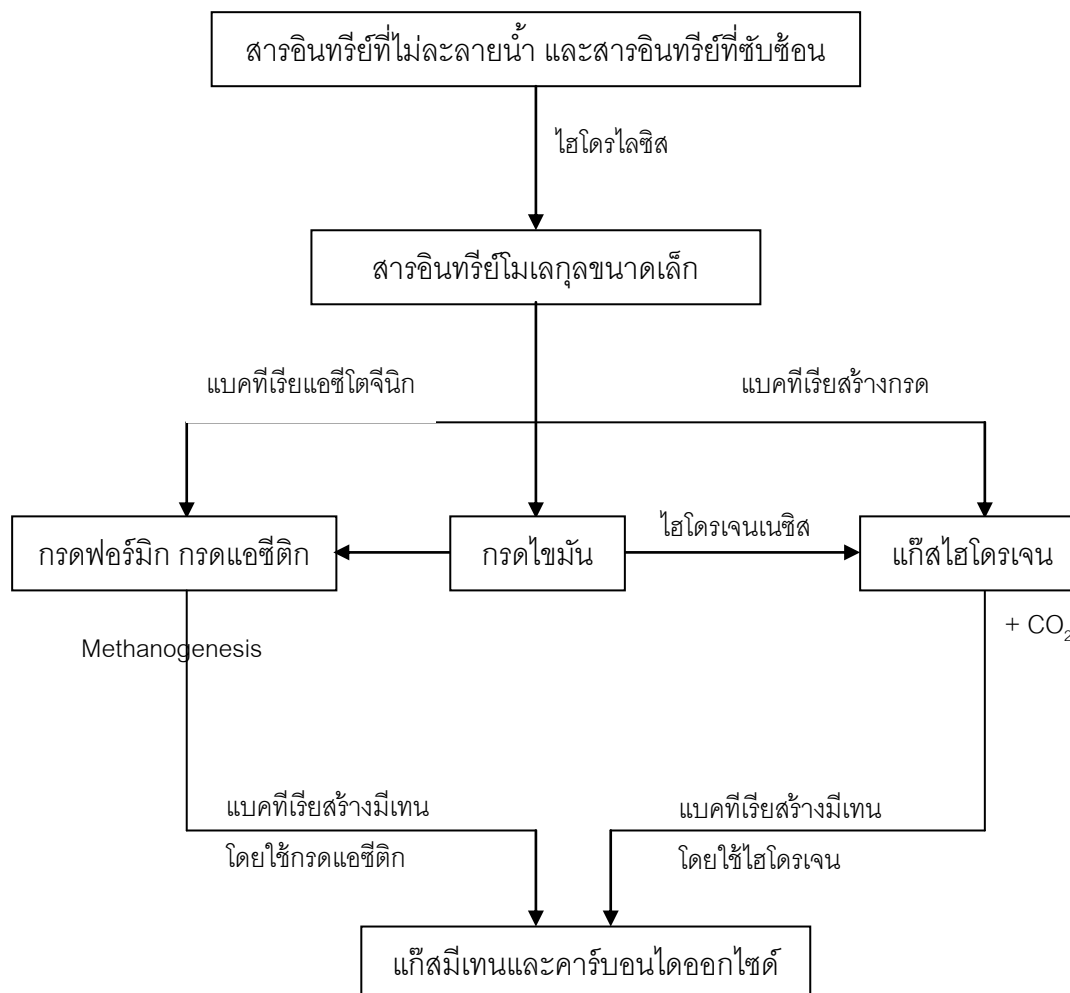
ขั้นที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) ขั้นตอนนี้เป็นการย่อยสลายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิสเพื่อนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่และเพื่อใช้เป็นพลังงาน สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กจากขั้นตอนไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียพวกสร้างกรดนำไปใช้เพื่อผลิตกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid) ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 อะตอม เช่น กรดแอสติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดบิวทิริก (Butyric acid) และกรดแวริลิก (Valeric acid) เป็นต้น

ขั้นที่ 3 กระบวนการสร้างกรดแอสติกจากกรดไขมันระเหย (Acetogenesis) กรดไขมันระเหยที่ได้จากกระบวนการสร้างกรดจะถูกแบคทีเรียแอสโตจีนิก (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นกรดแอสติก กรดฟอร์มิก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างแก๊สมีเทนต่อไป ปฏิกริยานี้มีความสำคัญเนื่องจากการลดการสะสมของกรดไขมันระเหย ซึ่งการสะสมของกรดไขมันระเหยในปริมาณที่สูงสามารถยับยั้ง กระบวนการสร้างมีเทนได้

ขั้นที่ 4 กระบวนการผลิตแก๊สมีเทน (Methanogenesis) แบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน (Methanogenic bacteria) จะผลิตแก๊สมีเทนจากกรดแอสติก กรดฟอร์มิก แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

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 ที่ประกอบด้วย

มีเทนร้อยละ 60 จะมีค่าความร้อนประมาณ 5,000–5,500 กิโลแคลอรี ซึ่งเทียบเท่ากับน้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร หรือน้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร หรือน้ำมันเตา 0.81 ลิตร หรือพลังงานไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือแก๊สหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม หรือไม้ฟืน 1.5 กิโลกรัม



รูปที่ 2.2 ลักษณะขั้นตอนของปฏิกิริยาไร้ออกซิเจน [4]

การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตแก๊สมีปัจจัยต่าง ๆ เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิ (Temperature) การย่อยสลายอินทรีย์และการผลิตแก๊สในสภาพปราศจากออกซิเจน สามารถเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากตั้งแต่ 40–60 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์

2. ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเป็นกรด-ด่าง มีความสำคัญต่อการหมักมาก ช่วง pH ที่เหมาะสมอยู่ในระดับ 6.6–7.5 ถ้า pH ต่ำเกินไปจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้าง แก๊สมีเทน
3. สภาพด่าง (Alkalinity) สภาพด่างหมายถึง ความสามารถในการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่าง สภาพด่างที่เหมาะสมต่อการหมักมีค่าประมาณ 1,000–5,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)
4. สารอาหาร (Nutrients) มีรายงานการศึกษาพบว่า สารอินทรีย์ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ต้องมีสารอาหารในสัดส่วน C:N และ C:P ในอัตรา 25:1 และ 20:1 ตามลำดับ
5. สารยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting and toxic materials) เช่น กรดไขมันระเหยได้ ไฮโดรเจน หรือแอมโมเนีย สามารถทำให้กระบวนการย่อยสลายในสภาพไร้ออกซิเจนหยุดชะงักได้
6. สารอินทรีย์และลักษณะของสารอินทรีย์สำหรับกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เข้าเกี่ยวข้อง
7. ชนิดและแบบของบ่อแก๊สชีวภาพ (Biogas plant)

2.4 รูปแบบบ่อแก๊สชีวภาพสำหรับฟาร์มสุกร [5]

รูปแบบบ่อแก๊สชีวภาพที่มีการส่งเสริมให้นำมาใช้จัดการน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรเพื่ออนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ได้แก่

1. บ่อโดมคงที่ (Fixed dome)

เป็นบ่อแก๊สชีวภาพที่มีการส่งเสริมให้ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดเล็ก (ฟาร์มที่เลี้ยงสุกรเทียบเท่าสุกรขุนไม่เกิน 500 ตัว) โดยได้มีการส่งเสริมในช่วงปี พ.ศ.2538–2544 ในโครงการส่งเสริมการผลิตแก๊สชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ส่วนที่ 2: เกษตรกรรายย่อย (ระยะที่ 1 และระยะที่ 2) ซึ่งดำเนินโครงการโดยกรมส่งเสริมการเกษตร (กสก.) กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ สนับสนุนงบประมาณโครงการโดยกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สพช.) หรือสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ในปัจจุบัน

2. บ่อหมักแบบรางตามด้วยบ่อหมักเรว่น้ำใส (Channel digester + UASB)

เป็นบ่อแก๊สชีวภาพที่พัฒนาขึ้นโดยหน่วยบริการแก๊สชีวภาพ (ปัจจุบันคือสถานเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพ) ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลักทำงานต่อเนื่องกัน คือ บ่อหมักแบบราง (Channel digester) ทำงานต่อเนื่องด้วยบ่อหมักเรว่น้ำใส (UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket) ซึ่งบ่อหมักดังกล่าวได้มีการส่งเสริมให้ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดกลางและขนาดใหญ่มาตั้งแต่ปี พ.ศ.

2538–2546 ในโครงการส่งเสริมการผลิตแก๊สชีวภาพในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ส่วนที่ 1: ฟาร์มขนาดกลางและขนาดใหญ่ (ระยะที่ 1 และระยะที่ 2) ดำเนินโครงการโดยหน่วยบริการแก๊สชีวภาพหรือสถานเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สนับสนุนงบประมาณโครงการโดยกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สพช.) หรือสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ในปัจจุบัน

3. บ่อหมักเรื้อน้ำขึ้น (H-UASB)

บ่อหมักเรื้อน้ำขึ้น (H-UASB: High Suspension Solids – Upflow Anaerobic Sludge Blanket) เป็นบ่อหมักที่หน่วยบริการแก๊สชีวภาพพัฒนาขึ้นโดยปรับปรุงจากบ่อหมักแบบ Channel Digester + UASB เพื่อให้สามารถรองรับและบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น บ่อหมักดังกล่าวได้เริ่มนำมาใช้งานในฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดใหญ่ในโครงการฯ ระยะที่ 2 จำนวน 2 ฟาร์ม คิดเป็นปริมาตรบ่อหมักรวม 12,000 ลบ.ม. ซึ่งพบว่าบ่อหมักดังกล่าวสามารถทำงานได้ดีเกินคาดหมาย จึงถูกนำมาใช้ส่งเสริมในฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดใหญ่ให้แพร่หลายมากยิ่งขึ้นในโครงการฯ ระยะที่ 3

4. บ่อ Covered Lagoon

บ่อ Covered Lagoon เป็นบ่อแก๊สชีวภาพอีกรูปแบบหนึ่ง ส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นบ่อดินด้านบนคลุมด้วยผืนพลาสติกขนาดใหญ่เพื่อรวบรวมแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นก่อนนำแก๊สไปใช้ประโยชน์ บ่อหมักแบบนี้ได้มีการนำมาใช้งานเมื่อประมาณ 3–5 ปีที่ผ่านมา จึงถือว่ายังอยู่ในช่วงต้น ๆ ของอายุการใช้งานของบ่อซึ่งประเมินไว้ที่ประมาณ 15 ปี ปัจจุบันจึงยังไม่มีข้อมูลผลการทำงานของบ่อ Covered Lagoon ที่สมบูรณ์เพียงพอ และจำเป็นต้องติดตามผลการใช้งานของบ่อดังกล่าวต่อไป

2.5 เทคโนโลยีการแยกแก๊สด้วยเมมเบรน

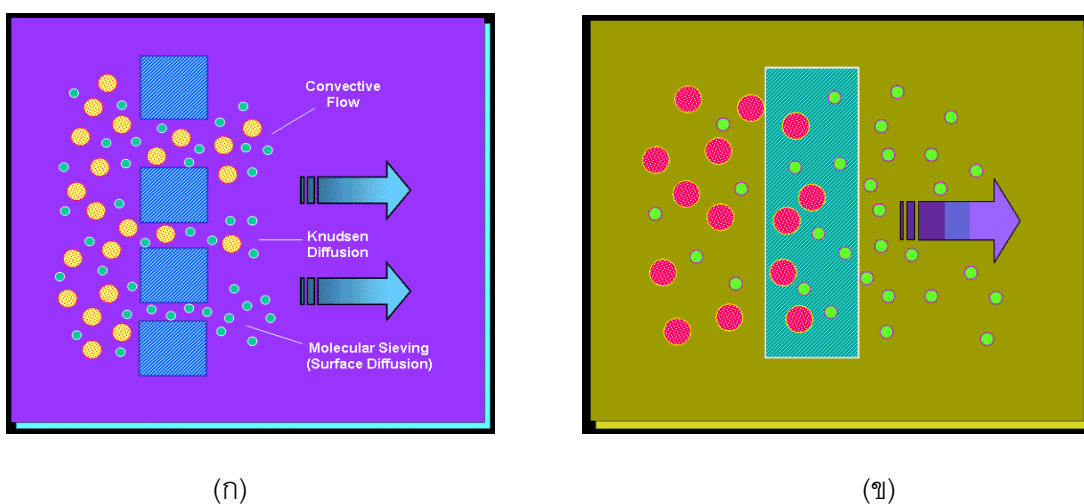
การแยกแก๊สด้วยเมมเบรนเกิดขึ้นได้จากสมบัติการเลือกของเมมเบรน ซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะคือ เมมเบรนมีรูพรุน และเมมเบรนเนื้อแน่น โดยกลไกการแพร่ซึมผ่านของแก๊สในเมมเบรนมีรูพรุนแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 (ก) ดังนี้

- 1) ถ้ารูมีขนาดค่อนข้างใหญ่ กล่าวคือ ในช่วง 0.1–10 ไมครอน แก๊สจะแพร่ซึมผ่าน เมมเบรนโดยกลไกการพาและไม่มีแก๊สเกิดขึ้น
- 2) ถ้ารูมีขนาดน้อยกว่า 0.1 ไมครอน ซึ่งทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรูมีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่าวิถีเสรีเฉลี่ย (Mean free path) กลไกการเคลื่อนที่ของโมเลกุลผ่านรูเป็นแบบ Knudsen diffusion

- 3) ถ้ารูของเมมเบรนเล็กมากในระดับ 5–20 อังสตรอม การแยกแก๊สเกิดขึ้นด้วยกลไกการคัดขนาดโมเลกุล ซึ่งมีทั้งการแพร่ในเฟสแก๊ส และการแพร่ของโมเลกุลที่ถูกดูดซับอยู่ตามผนังของรู ซึ่งเรียกว่า Surface diffusion

แต่กลไกการแพร่ซึมของแก๊สผ่านเมมเบรนเนื้อแน่น คือ การละลาย–การแพร่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

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



รูปที่ 2.3 ลักษณะการแพร่ของแก๊สผ่านเมมเบรน (ก) แบบมีรู (ข) แบบเนื้อแน่น [6]

โดยค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สนั้นจะขึ้นอยู่กับการที่โมเลกุล ของแก๊สต่างชนิดกันมีการละลายในเมมเบรน และสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเมมเบรนต่างกัน ค่าการซึมผ่านแก๊ส (P: permeability) เป็นผลคูณของสัมประสิทธิ์การแพร่ (D: diffusion coefficient) และสัมประสิทธิ์การละลาย (S: solubility coefficient) นิยามดังสมการที่ 2.1 โดย สัมประสิทธิ์การละลายเป็นคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล ของแก๊สกับเมมเบรน ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นตัวแปรทางจลนศาสตร์ซึ่งสามารถหาค่าได้จาก การทดลอง ค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส (α_{AB} : separation factor or permselectivity) เป็น ค่าแสดง ความสามารถของเมมเบรนในการแยกแก๊สผสม 2 ชนิดออกจากกัน นิยามดังสมการที่ 2.2

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

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

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sen และคณะ (2007) [7] ได้ทำการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน (Mixed matrix membrane) ของพอลิคาร์บอเนตและซีโอไลต์ 4A โดยมีการเติมพาราไนโตรแอนิลิน (*p*-nitroaniline) เป็นสารเติมแต่ง ปริมาณของพาราไนโตรแอนิลินและซีโอไลต์ 4A อยู่ในช่วงร้อยละ 1–5 และ 5–30 โดยน้ำหนักของเมมเบรน ตามลำดับ พบว่าการเติมพาราไนโตรแอนิลินลงไปจะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์และพื้นผิวของซีโอไลต์สามารถเชื่อมติดกันได้ดี ส่งผลให้มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนมีค่าการซึมผ่านแก๊ส (Permeability) ลดลง แต่จะให้ค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส (Selectivity) สูงขึ้น โดยมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนพอลิคาร์บอเนต/ซีโอไลต์ 4A ที่มีปริมาณของพาราไนโตรแอนิลินและซีโอไลต์ 4A เท่ากับร้อยละ 1 และ 20 โดยน้ำหนักของเมมเบรน แสดงค่าการเลือกสรรคู่แก๊สของ H₂/CH₄ และ CO₂/CH₄ เป็น 3 และ 2 เท่าของเมมเบรนพอลิคาร์บอเนต ตามลำดับ

Li และคณะ (2005) [8] ได้ทำการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนของพอลิเอทีเทอร์ซิลโฟนและซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วของพอลิเมอร์ เพื่อศึกษาผลของวิธีการเตรียมเมมเบรน ปริมาณของซีโอไลต์ และขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ที่มีต่อสมบัติการแยกแก๊สของเมมเบรน พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่ทำให้เย็นลงตามธรรมชาติ (Natural cooling) จะแสดงพื้นผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์และซีโอไลต์ที่ดี และให้ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สสูงกว่ามิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่ทำให้เกิดการเย็นตัวลงทันทีทันใด (Immediate quenching) เมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนจะทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง แต่ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สสูงขึ้น เนื่องจากผลของความไม่อ่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer chain rigidification) การอุดตันของรูพรุนในซีโอไลต์ (Partial pore blockage of zeolite) และเมื่อรูพรุนของซีโอไลต์มีขนาดใหญ่ขึ้น มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่ได้จะแสดงค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สเพิ่มขึ้น

Li และคณะ (2005) [9] ต้องการปรับปรุงสมบัติการแยกแก๊สของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน ที่เตรียมได้ก่อนหน้านี้ โดยการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์ด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) พบว่ามิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนภายหลังจากทำการปรับปรุงพื้นผิวของซีโอไลต์ด้วยสารคู่ควบไซเลน จะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ดีขึ้น ทำให้ได้ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สเพิ่มขึ้น

Anson และคณะ (2004) [10] ได้ทำการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนของพอลิเมอร์ร่วมอะครีโลไนไทรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS copolymer) และถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

สำหรับนำมาใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทน พบว่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่มีปริมาณของถ่านกัมมันต์ 1 เท่ากับร้อยละ 10 หรือที่มี ปริมาณของถ่านกัมมันต์ 2 เท่ากับ 40 โดยน้ำหนักของเมมเบรน จะให้ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Permeability) และค่าการคัดเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน (CO_2/CH_4 Selectivity) สูงสุดเท่ากับ 11–21 บาร์เรอร์ และ 35–51 ตามลำดับ ส่วนความดันไม่มีผลต่อค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าการคัดเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนอย่างมีนัยสำคัญ

Pechar และคณะ (2005) [11] ได้ทำการเตรียมมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนโดยมีซีโอไลต์แอลกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มของพอลิอิมิด (Polyimide) และพอลิไดเมทิลซิล็อกเซน (Polydimethylsiloxane) จากการศึกษาผลของการเติมพอลิไดเมทิลซิล็อกเซนลงไป ในมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน ด้วยเทคนิค Gel permeation chromatography (GPC) และเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่าการเติมพอลิไดเมทิลซิล็อกเซนเป็นผลให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิไดเมทิลซิล็อกเซนเป็นสองเท่าของพอลิอิมิด และปรากฏพีคของ C-N-C ที่ 1373 cm^{-1} ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างพอลิอิมิดและพอลิไดเมทิลซิล็อกเซน เมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของมิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนที่มีการเติมซีโอไลต์แอลลงไปในพอลิอิมิดซิล็อกเซน (Polyimide siloxane) ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักของเมมเบรน ตามลำดับ พบว่าไม่ปรากฏการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของซีโอไลต์ เนื่องจากซีโอไลต์สามารถเชื่อมติดกับพอลิเมอร์ร่วมส่วนที่เป็นพอลิ ไดเมทิลซิล็อกเซนซึ่งมีความยืดหยุ่นได้ดี และเมื่อศึกษาสมบัติการแยกแก๊สของมิกซ์เมทริกซ์ เมมเบรนพบว่าเมื่อปริมาณของพอลิไดเมทิลซิล็อกเซนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 41 โดยน้ำหนัก ของเมมเบรน มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรนจะทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์แอลเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของเมมเบรน มิกซ์เมทริกซ์เมมเบรน จะทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สลดลง เนื่องมาจาก สายโซ่ที่ยืดหยุ่นของพอลิไดเมทิลซิล็อกเซนจะไปทำให้รูพรุนของซีโอไลต์เกิดการอุดตัน

Tin และคณะ (2003) [12] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการแยกแก๊สของ Matrimid membrane โดยการเชื่อมขวางเมมเบรนด้วยสารละลายพาราไซลีนไดเอมีน (*p*-xylenediamine) ที่อุณหภูมิห้อง ศึกษาสมบัติของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางและแบบไม่เชื่อมขวางด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่าเมมเบรนภายหลังจากทำการจุ่มลงในสารละลายพาราไซลีนไดเอมีนผ่านไปเป็นเวลา 61 วัน ก็จะมีการเชื่อมขวางที่สมบูรณ์ เห็นได้จากการยืดออกของพีคแอมไนด์ (N-H stretching) ที่ 3300 cm^{-1} เมื่อศึกษา สมบัติการมีเสถียรภาพทางความร้อนด้วย Thermomechanical analysis (TMA) พบว่าเมื่อ พิจารณาค่า

สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 75–150 องศาเซลเซียส ปรากฏว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเมมเบรนแบบเชื่อมขวางจะให้ค่าที่ต่ำกว่าเมมเบรนแบบไม่เชื่อมขวาง เนื่องจากการเชื่อมขวางจะไปทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบอยู่ในแนวเดียวกัน และเมื่อศึกษาผลของเวลาที่นำเมมเบรนไปแช่ในสารละลายพาราไซคลินไดเอมีนต่อสมบัติการแยกแก๊สของเมมเบรน พบว่าเมื่อทำการแช่เป็นเวลา 1 วัน เมมเบรนจะให้ค่าการซึมผ่านแก๊สสูงที่สุด ต่อจากนั้นก็ลดลงตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สของเมมเบรนเชื่อมขวางก็จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าการเลือกสรรคู่แก๊สของ He/N_2 จะให้ค่าการเลือกคู่แก๊สที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ O_2/N_2 , CO_2/CH_4 และ CO_2/N_2 เนื่องจากเวลาในการแช่เพิ่มขึ้นทำให้เมมเบรนเกิดการเชื่อมขวางกันได้มากขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและอยู่ใกล้ชิดกัน โมเลกุลของแก๊สจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ยากขึ้น

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมีที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย ไคโตซาน (Chitosan) (Commercial grade) จาก Eland Corporation Ltd., ซีโอไลต์ เอ (Linde type A) (Commercial grade) จาก Thai Silicate Ltd., กรดแอซีติก (CH_3COOH) ความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก (Commercial grade), กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก (Commercial grade), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (Commercial grade), แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99 ของ PRAXAIR, แก๊สไนโตรเจน (N_2) ความเข้มข้น ร้อยละ 99.99 ของ PRAXAIR, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99 ของ PRAXAIR, แก๊สมีเทน (CH_4) ความเข้มข้นร้อยละ 99.99 ของ PRAXAIR

การทดสอบสมบัติ ได้แก่ ความสามารถทนต่อแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing, ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy, วิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer, โครงสร้างทางเคมีของเมมเบรน ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านแก๊ส

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 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

3.2.2 วิธีการเตรียมเมมเบรน

- 1) เมมเบรนไคโตซานไม่เชื่อมขวาง

- เตรียมสารละลายโคโตซานร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดแอสซิติค เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
 - เทสารละลายพอลิเมอร์ปริมาณ 17–18 กรัมบนแผ่นกระจกขนาด 15×15 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้ได้ความหนาของเมมเบรนเมื่อแห้งแล้วประมาณ 30 ไมครอน
 - อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
 - แห้เมมเบรนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 20 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง แล้วอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้เมมเบรนโคโตซานไม่เชื่อมขวาง
- 2) เมมเบรนโคโตซานเชื่อมขวางด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก มีขั้นตอนเช่นเดียวกับการเตรียมเมมเบรนโคโตซานไม่เชื่อมขวางในข้อ 1) แต่จะเพิ่มขั้นตอนของการนำเมมเบรนไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งเป็นกลาง อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้เมมเบรนโคโตซานแบบ เชื่อมขวาง
- 3) เมมเบรนโคโตซานคอมโพสิตแบบไม่เชื่อมขวาง และแบบเชื่อมขวาง มีวิธีการเช่นเดียวกับการเตรียมเมมเบรนโคโตซานแบบไม่เชื่อมขวางและแบบเชื่อมขวาง ในข้อ 1) และ 2) ตามลำดับ แต่จะเพิ่มขั้นตอนการผสมผงซีโอไลต์เอ โดยจะแบ่งกรดแอสซิติคเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ปริมาณหนึ่งมาผสมกับผงซีโอไลต์เอ ให้อยู่ในลักษณะที่เป็นสารแขวนลอย จากนั้นทำการผสมส่วนของสารละลาย โคโตซานกับสารแขวนลอยของผงซีโอไลต์เอในอ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic water bath) แล้วทำตามขั้นตอนเดิม
- 4) เมมเบรนอิมิตัวด้วยน้ำ แห้เมมเบรนโคโตซานแบบเชื่อมขวาง และเมมเบรนโคโตซานแบบเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์เอที่เตรียมได้ในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั้บสารละลายที่ผิวหน้า เมมเบรนให้แห้งด้วยกระดาษซับก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.2.3 การทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน

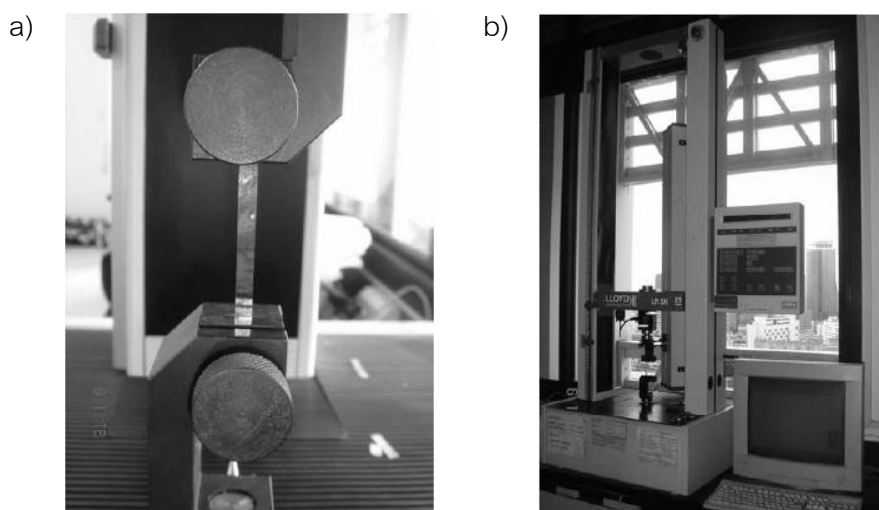
- 1) ชั่งน้ำหนักของเมมเบรนแห้ง
- 2) แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) ชั้บน้ำที่ผิวหน้าเมมเบรนออกให้แห้งด้วยกระดาษซับแล้วนำไปชั่งน้ำหนักอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในเมมเบรน

- 4) นำค่าน้ำหนักของเมมเบรนแห้งและหลังการดูดซับน้ำ มาคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน ตามสมการที่ 3.1

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

3.2.4 ความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile strength)

- 1) ตัดเมมเบรนให้มีขนาด 5×150 ตารางมิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 a)
- 2) วัดความหนาของเมมเบรนด้วยไมโครมิเตอร์
- 3) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 ด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามรูปที่ 3.1 b) โดยใช้ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 5 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.1 เครื่อง Universal Testing LLOYD Instruments LR 5K

3.2.5 การทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าการซึมผ่านแก๊สของเมมเบรน โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบ คือ การวัดโดยใช้ความดันคงที่ และการวัดโดยใช้ปริมาตรคงที่ สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการวัดแบบความดันคงที่โดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเองดังรูปที่ 3.2 โดยผ่านแก๊สที่ต้องการทดสอบเข้าไปทางด้านบนของเมมเบรน ควบคุมความดันขาเข้าของแก๊สให้คงที่ ส่วนด้านขาออกเปิดสู่บรรยากาศ และทำการวัดอัตราการไหลของแก๊สขาออก เพื่อนำไปคำนวณค่าการซึมผ่านแก๊ส ดังสมการที่ 3.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนที่ทดสอบ คือ 3.1 เซนติเมตร

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

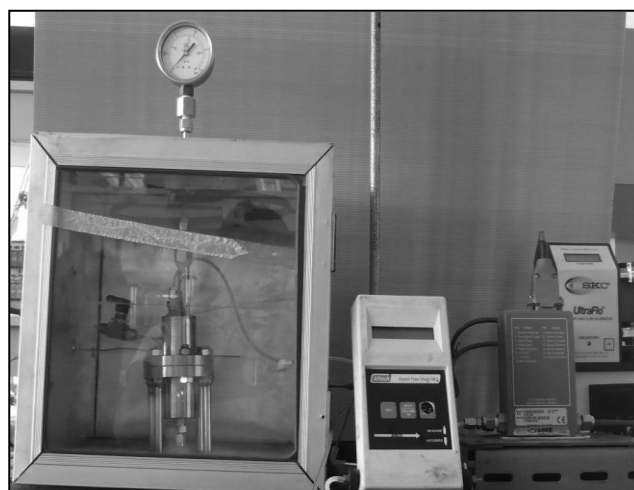
P = ค่าการซึมผ่านแก๊ส ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$) และแปลงเป็นหน่วยแบเรอร์ (Barrer) โดย $1 \text{ Barrer} = 10^{-10} (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}) / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cmHg})$

Q = อัตราการไหลของแก๊สผ่านเมมเบรน (cm^3/s)

L = ความหนาของเมมเบรน (cm)

A = พื้นที่ของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายโอนมวล (cm^2)

ΔP = ความดันต่าง (cmHg)



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบค่าการซึมผ่านของแก๊ส

จากค่าการซึมผ่านแก๊สที่ได้ นำมาคำนวณค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส ตามสมการที่ 3.3

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

$\alpha_{A/B}$ = ค่าการเลือกสรรแก๊ส A ต่อ B

P_A และ P_B คือค่าการซึมผ่านแก๊ส A และ B (แบเรอร์) ตามลำดับ

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 สมบัติของโคโตซานและซีโอไลต์

สมบัติของโคโตซานและซีโอไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยโคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) และร้อยละการกำจัดหมู่แอสีทิล (% Deacetylation) เท่ากับ 9.5×10^5 ดอลตัน และ 90 ± 5 ตามลำดับ สมบัติของซีโอไลต์ทดสอบด้วยเครื่อง Surface Area Analyzer พบว่ามีขนาดของรูพรุน 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	
ร้อยละการกำจัดหมู่แอสีทิล	%	90 ± 5	
ขนาดรูพรุน	อังสตรอม (Å)		2551.6
พื้นที่ผิว	m^2/g		13.9
ปริมาตรรูพรุน	cm^3/g		0.0137

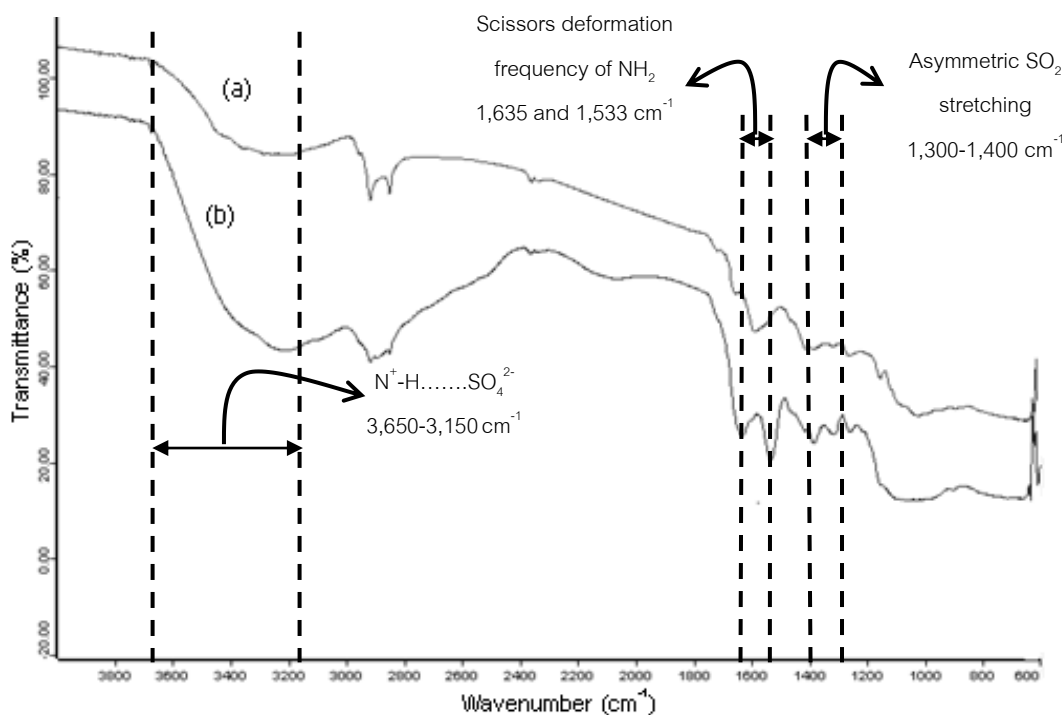
หมายเหตุ * ข้อมูลจากบริษัท Eland Corporation Ltd.

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 $1074\text{--}1076 \text{ cm}^{-1}$ พีกของหมู่ C–H stretching ที่ช่วงหมายเลขคลื่นประมาณ $2849\text{--}2916 \text{ cm}^{-1}$ และพีกของหมู่ O–H และ N–H stretching ที่ช่วงหมายเลขคลื่นประมาณ $3358\text{--}3589 \text{ cm}^{-1}$

ผลจากการเชื่อมขวางเมมเบรนด้วยกรดซัลฟิวริกดังแสดงในรูปที่ 4.1(b) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนี้ เกิดพีกคู่ของหมู่ NH_3^+ ที่หมายเลขคลื่น 1533 และ 1635 cm^{-1} อย่างชัดเจน เนื่องจากหมู่เอมีนในโคโตซานถูก Protonated โดยโปรตอนจากกรดซัลฟิวริก นอกจากนี้ยังเกิดพีกลักษณะกว้างที่ช่วงหมายเลขคลื่นใกล้เคียง 3150 cm^{-1} และเกิดการเลื่อนไปของ C–H

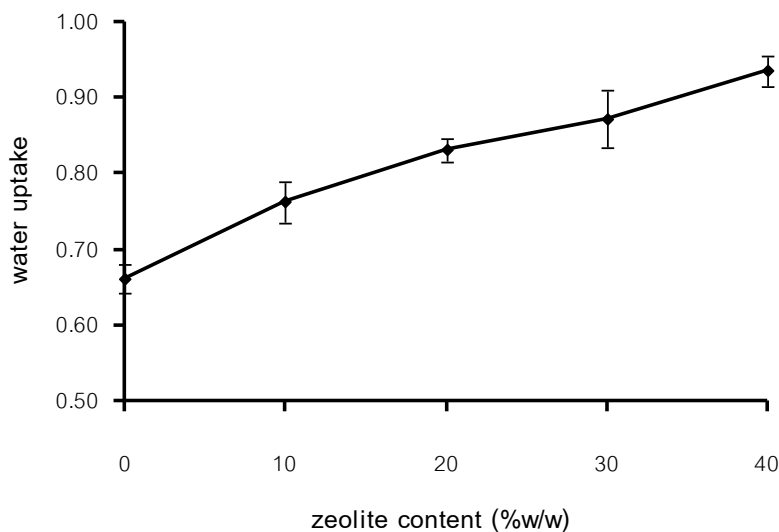
stretching ไปยังหมายเลขคลื่นที่สูงขึ้น เนื่องจากการเกิดพันธะไฮออนิกระหว่างหมู่ NH_3^+ และ SO_4^{2-} รวมทั้งยังมีพีคของหมู่กรดซัลฟอนิก ได้แก่ Asymmetric SO_2 stretching ที่ช่วงหมายเลขคลื่นประมาณ $1300\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$ พีคของเกลือกรดซัลฟอนิกที่หมายเลขคลื่นประมาณ 1386 cm^{-1} จึงยืนยันได้ว่ากรดซัลฟิวริกเข้าไปสร้างพันธะในสายโซ่ของไคโตซาน



รูปที่ 4.1 FTIR spectra ของเมมเบรนไคโตซาน (a) แบบไม่เชื่อมขวาง (b) แบบเชื่อมขวาง

4.3 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรน

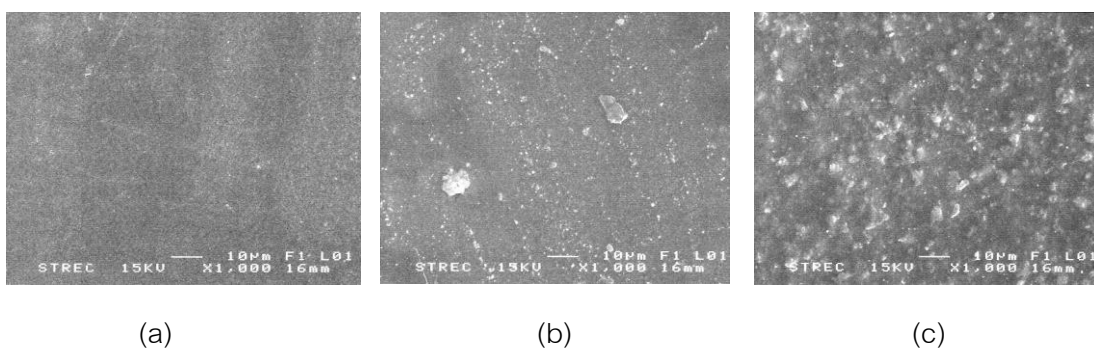
รูปที่ 4.2 แสดงปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง และเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีไอไลต์ พบว่าเมื่อเติมซีไอไลต์ลงไปจะทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำใน เมมเบรนเพิ่มขึ้น ตามปริมาณซีไอไลต์ที่มากขึ้น จาก 0.70 ± 0.02 เป็น 0.94 ± 0.02 เมื่อปริมาณ ซีไอไลต์ที่เติมเท่ากับ 0 และ 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน ตามลำดับ เนื่องจากซีไอไลต์ เป็นสารที่มีความเป็นรูพรุนสูง และโครงสร้างของซีไอไลต์แสดงควมมีขั้วซึ่งเกิดจากไอออนของ โซเดียม (Na^+) ที่เป็น Counter ion ของซีไอไลต์ เป็นผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้ำกับ พื้นผิวของซีไอไลต์ ทำให้ซีไอไลต์สามารถดูดซับโมเลกุลน้ำไว้ภายในรูพรุนได้ดี ทำให้เมมเบรน ไคโตซาน-ซีไอไลต์สามารถดูดซับน้ำไว้ในเมมเบรนได้สูงกว่าเมมเบรนไคโตซานที่ไม่ได้ทำการเติม ซีไอไลต์



รูปที่ 4.2 ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์

4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์เท่ากับร้อยละ 10 และ 40 โดย น้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน ตามลำดับ พบว่าเมมเบรนเมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวางมีลักษณะ พื้นผิวที่เป็นเนื้อแน่นและราบเรียบ ในขณะที่เมมเบรนไคโตซานเชื่อมขวาง-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณ ของซีโอไลต์ร้อยละ 10 และ 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน จะเห็นอนุภาคของแข็งสีขาวซึ่ง คาดว่าเป็นอนุภาคซีโอไลต์กระจายอยู่ทั่วผิวหน้า โดยมีบางตำแหน่งจะเห็นอนุภาคของแข็งจับตัว กันเป็นก้อนใหญ่ เนื่องจากขั้นตอนการทำให้ซีโอไลต์กระจายตัวในสารละลายไคโตซานไม่ดี โดย ขนาดอนุภาคซีโอไลต์ในเมมเบรนจะใหญ่ขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์ที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3(c) การ รวมตัวกันของอนุภาคซีโอไลต์จะส่งผลต่อค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึง และสมรรถนะ การ แยกแก๊สของเมมเบรนซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

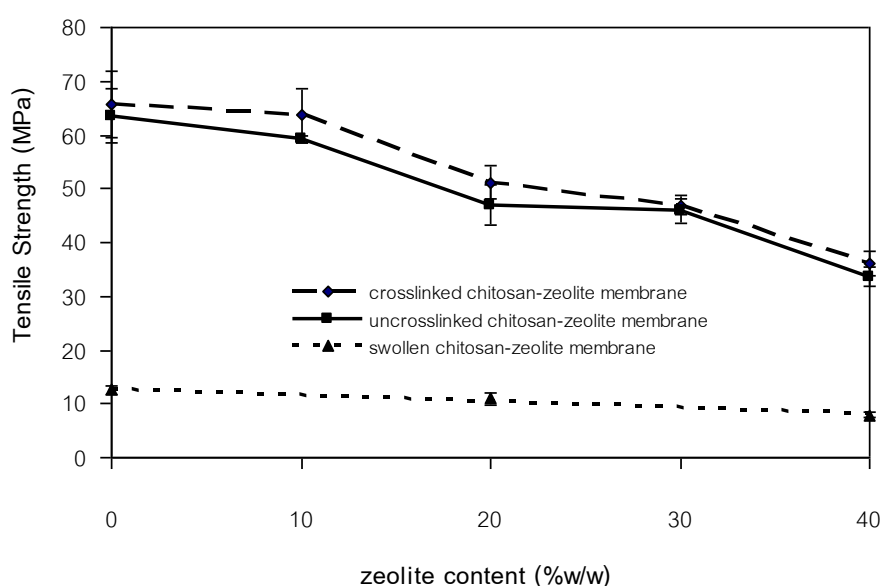


รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์

(a) 0% zeolite (b) 10% zeolite (c) 20% zeolite

4.5 ความสามารถทนต่อแรงดึง

รูปที่ 4.4 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์ พบว่าเมมเบรนเชื่อมขวางมีค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงสูงกว่าเมมเบรนไม่เชื่อมขวาง เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่แนบชิดทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวภายในของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงจะลดลง เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดรอยแยกที่ผิวสัมผัส (Interfacial void) ระหว่างพื้นผิวของซีโอไลต์และไคโตซาน [8, 9] ดังที่ได้กล่าวในส่วนของลักษณะพื้นฐานวิทยابนพื้นผิวของเมมเบรน ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นลดลง จากผลการทดลองในส่วนนี้จะนำไปยืนยันผลของสมรรถนะ การแยกแก๊สของเมมเบรนเชื่อมขวาง ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป และเมื่อศึกษาความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่บวมตัวด้วยน้ำ พบว่าความสามารถทนต่อแรงดึงน้อยกว่าเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์มาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไป ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีปริมาตรอิสระมากขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวภายในสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง



รูปที่ 4.4 ความสามารถทนต่อแรงดึงของเมมเบรนไคโตซาน-ซีโอไลต์

4.6 สมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้ง

โดยปกติในการศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรน จะศึกษาในลักษณะใช้เมมเบรนแห้งแยกแก๊สแห้ง แต่ในความเป็นจริงแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพไม่แห้งซึ่งอาจทำให้สมรรถนะการแยกแตกต่างจากระบบแก๊สแห้ง/เมมเบรนแห้งได้ ในส่วนนี้จะพิจารณาสมรรถนะ

การแยกของระบบแก๊สแห้ง/เมมเบรนแห้งก่อน โดยศึกษาเกี่ยวกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพ

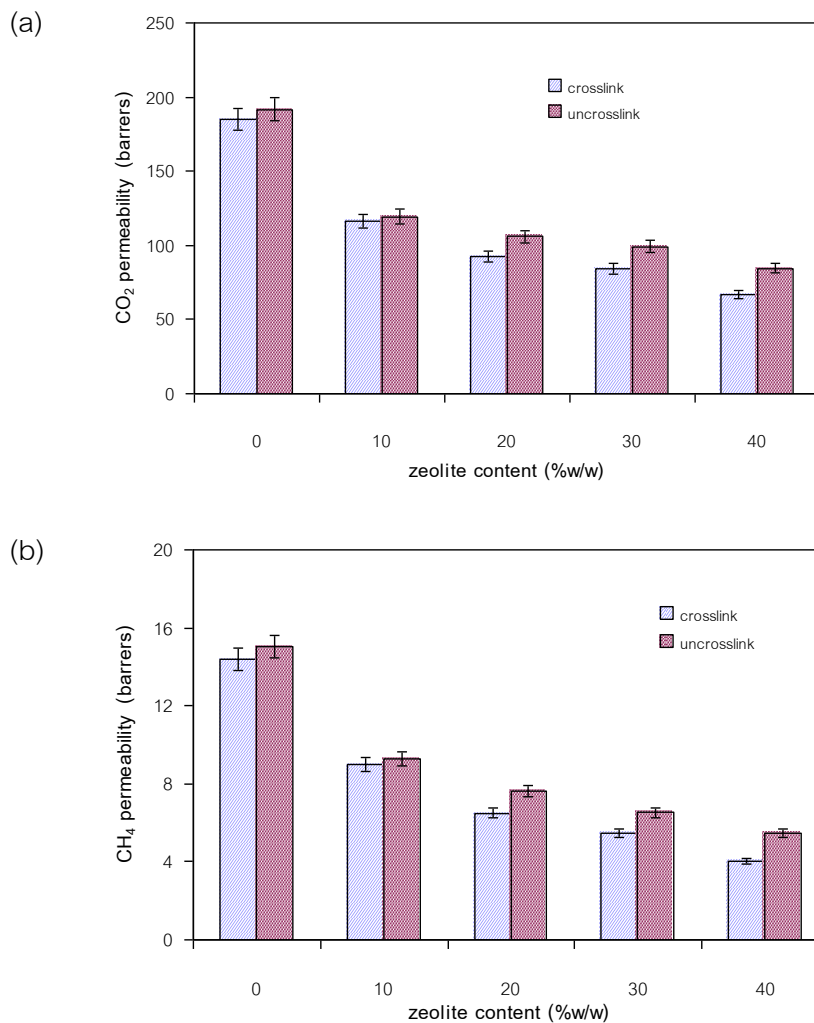
4.6.1 ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรน

ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้งที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเมมเบรนเชื่อมขวางให้ ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนต่ำกว่าเมมเบรนไม่เชื่อมขวาง นอกจากนั้นยัง พบว่าเมมเบรนไคโตซานชอบให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้มากกว่าแก๊สมิเทน ทำให้ค่าการ เลือกรองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนสูง โดยเมมเบรนเชื่อมขวางแสดงค่าการเลือกรองแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนสูงกว่าเมมเบรนไม่เชื่อมขวางที่ทุก ๆ สัดส่วนของซีโอไลต์ในไคโตซาน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เนื่องจากการเชื่อมขวางเมมเบรนจะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัว เป็นระเบียบมากขึ้น ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง จึงเป็นเหตุให้โมเลกุลของแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์และมีเทนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ลดลง ค่าการเลือกรองแก๊สคาร์บอนได ออกไซด์ต่อมีเทนผ่านเมมเบรนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

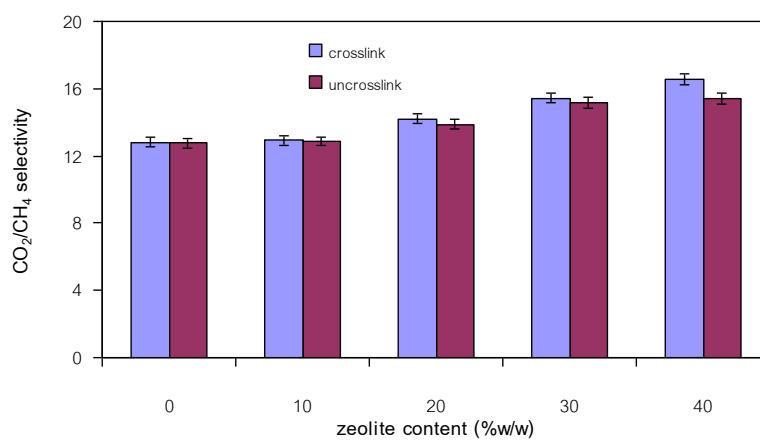
จากผลการทดลองในส่วนนี้ พบว่าเมมเบรนเชื่อมขวางจะให้ค่าการเลือกรองแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ต่อมีเทนสูงกว่าเมมเบรนไม่เชื่อมขวาง ทั้งยังมีค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงที่ดี กว่า จึงเลือกศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรนในส่วนต่อไปกับเมมเบรนเชื่อมขวาง

4.6.2 ผลของความดัน

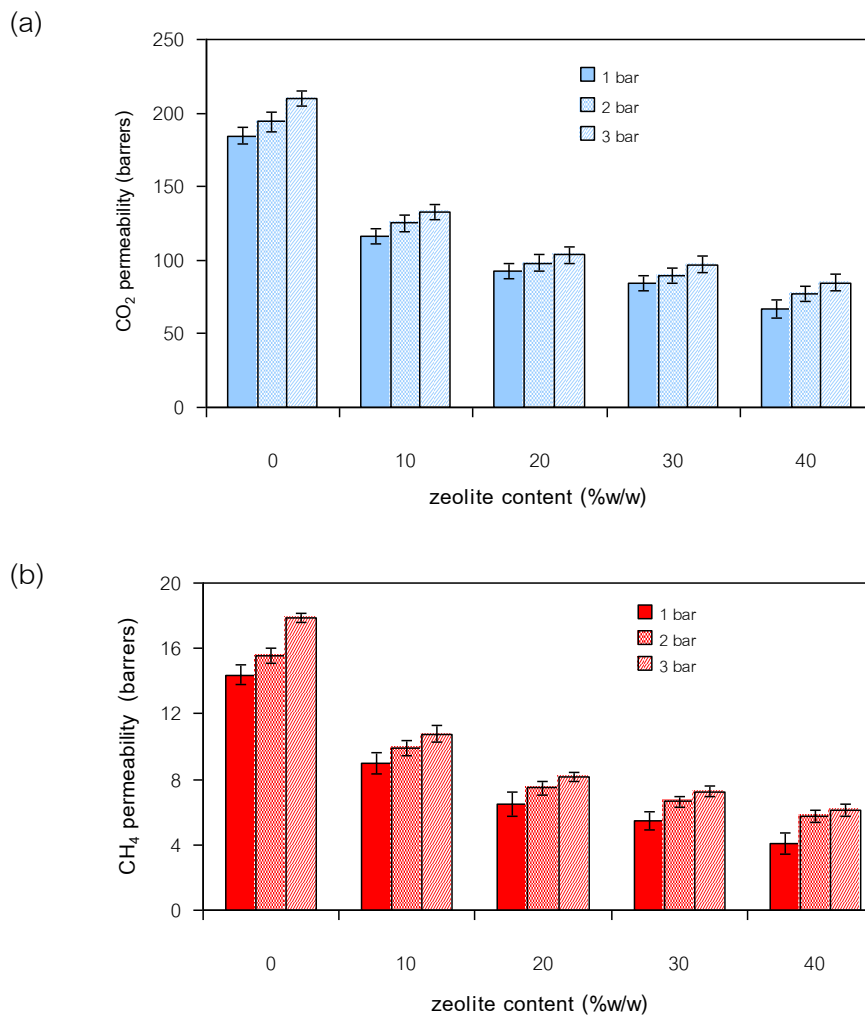
ผลของความดันที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนเชื่อมขวางแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนได ออกไซด์และมีเทนจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกรองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากในกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนมีความดันย่อยของสาร เพอร์ มิเทตเป็นแรงขับ (Driving force) ดังนั้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้โมเลกุลของแก๊ส สามารถ เคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายกว่าในกรณีที่มีความดันต่ำ จึงเป็นเหตุให้โมเลกุลของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้เพิ่มขึ้น ค่าการเลือกรองแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนของเมมเบรนจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.5 ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนต่อค่าการซึมผ่านแก๊สที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ (a) คาร์บอนไดออกไซด์ (b) มีเทน

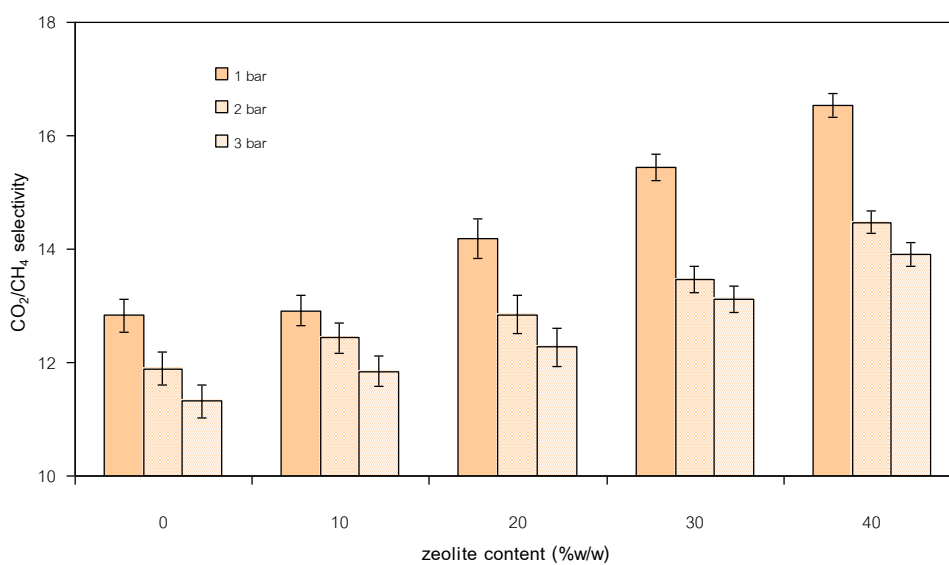


รูปที่ 4.6 ผลของการเชื่อมขวางเมมเบรนต่อค่าการเลือกสรรแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์



รูปที่ 4.7 ผลของความดันต่อค่าการซึมผ่านแก๊สที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

(a) คาร์บอนไดออกไซด์ (b) มีเทน



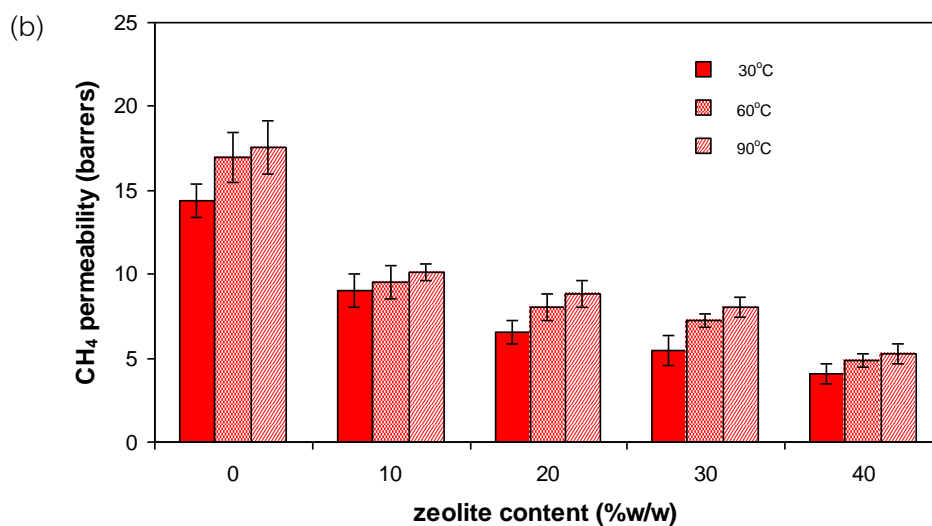
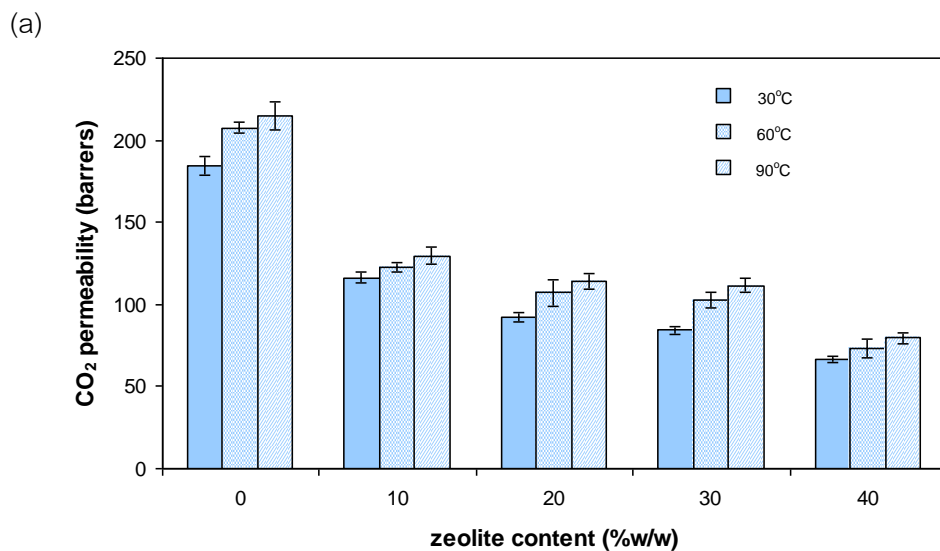
รูปที่ 4.8 ผลของความดันต่อค่าการเลือกสรรแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ต่อมมีเทนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

4.6.3 ผลของอุณหภูมิ

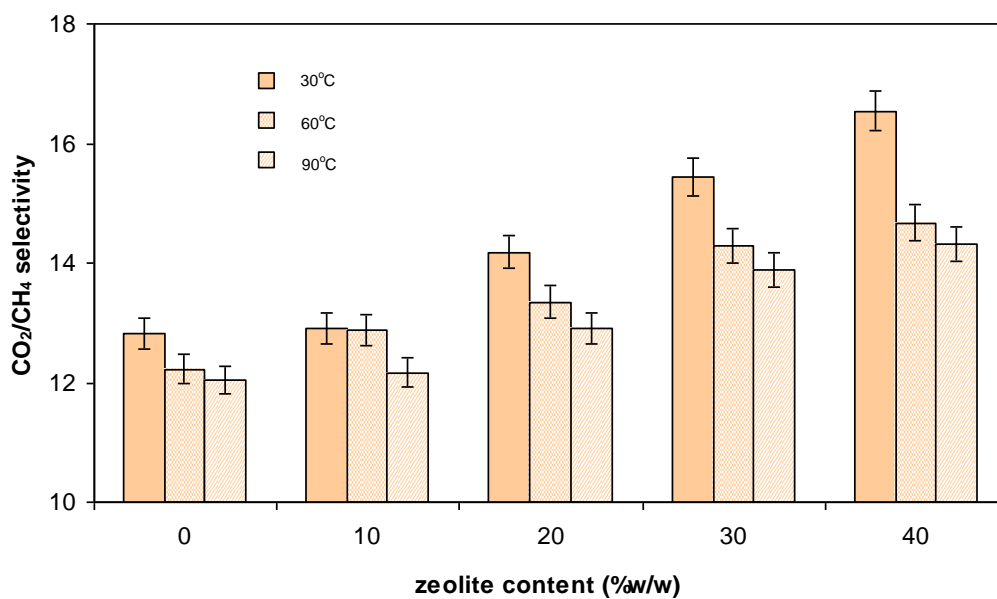
เนื่องจากความดันของแก๊สชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนอยู่ที่ 1 บาร์ แต่อุณหภูมิในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการไร้ออกซิเจนที่เหมาะสมมีอยู่ 2 ช่วง ช่วงการทำงานของ Mesophilic bacteria ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30–40 องศาเซลเซียส และช่วงการทำงานของ Thermophilic bacteria ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 45–55 องศาเซลเซียส ในส่วนนี้จึงได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนเชื่อมขวางแห้ง ที่ความดัน 1 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะไปกระตุ้นให้โมเลกุลของแก๊สมีพลังงานภายในเพิ่มขึ้น อีกทั้งสายโซ่พอลิเมอร์จะได้รับพลังงานจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เกิดการเคลื่อนไหวออกจากการเกี่ยวพันกันภายในสายโซ่พอลิเมอร์ (Chain entanglement) ส่งผลให้เกิดปริมาตรหรือช่องว่างระหว่างสายโซ่เพิ่มมากขึ้นเป็นเหตุให้โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนสามารถเคลื่อนที่ผ่าน เมมเบรนได้มากขึ้น ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนผ่านเมมเบรนจึงมีค่าลดลง

4.6.4 ผลของปริมาณซีโอไลต์

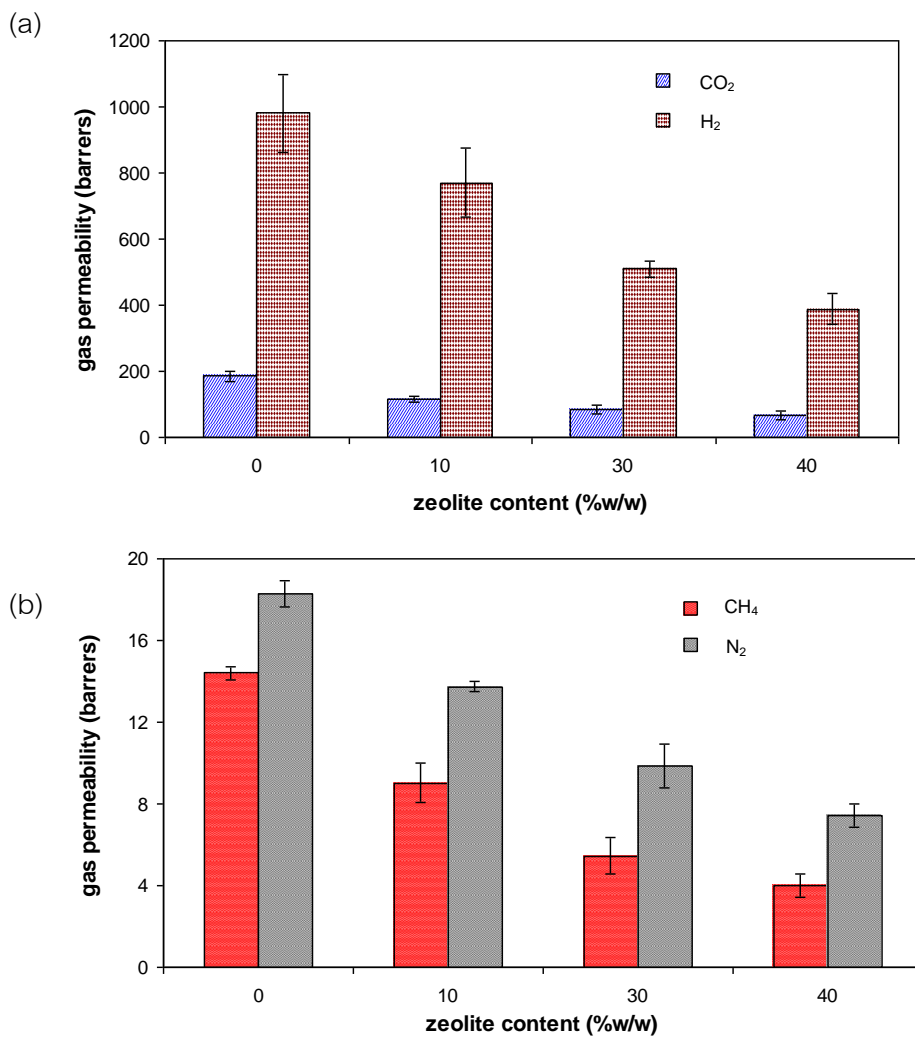
การมีซีโอไลต์ในโคโตซานเมทริกซ์ทำให้ค่าการซึมผ่านแก๊สลดลงซึ่งน่าจะเกิดจากผลของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดความแข็งกระด้าง เนื่องจากการมีอนุภาคซีโอไลต์เข้าไปแทรกอยู่ในสายโซ่เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าความไม่อ่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer chain rigidification) หรือเกิดจากการที่สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ไปบดบังรูพรุนของซีโอไลต์บางส่วน เป็นผลให้รูพรุนของซีโอไลต์เกิดการอุดตัน (Partial pore blockage of zeolite) ตามงานวิจัยของ Chung และคณะ [13] ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5–4.10 ผลการทดสอบสมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ ขององค์ประกอบแก๊สต่าง ๆ ในแก๊สชีวภาพ (ยกเว้นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์) แสดงในรูปที่ 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 แบนเนอร์ เป็น 66.8 ± 6.4 , 4.0 ± 0.6 , 387.5 ± 26.1 และ 7.4 ± 0.6 แบนเนอร์ ตามลำดับ แต่ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ไฮโดรเจนต่อมีเทน และไนโตรเจนต่อมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 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 เมื่อปริมาณของ ซีโอไลต์เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักโคโตซาน



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการซึมผ่านแก๊สที่ความดัน 1 บาร์ (a) คาร์บอนไดออกไซด์ (b) มีเทน

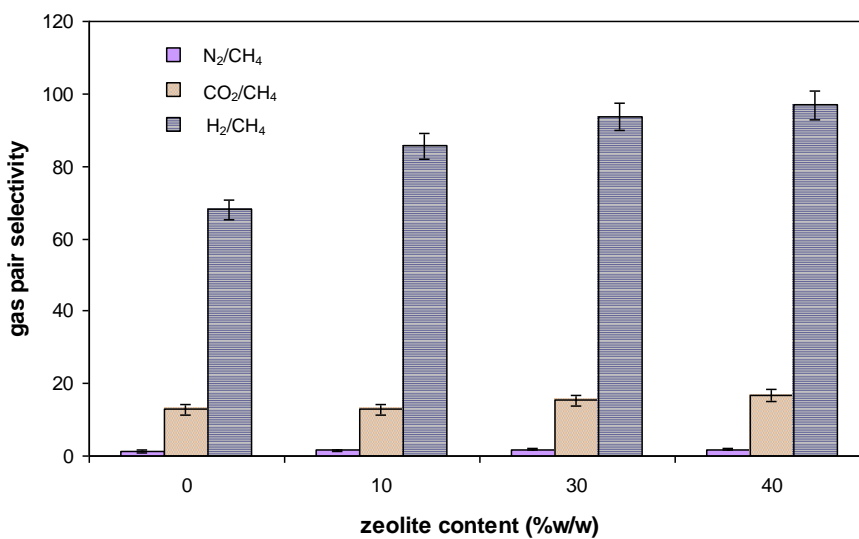


รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนที่ความดัน 1 บาร์



รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อค่าการซึมผ่านแก๊สแห้งผ่านเมมเบรนแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและความดัน 1 บาร์

(a) คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (b) มีเทนและไนโตรเจน



รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณซีโอไลต์ต่อค่าการเลือกสรรคู่แก๊สแห้งผ่านเมมเบรนแห้ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

4.7 สมรรถนะการแยกแก๊สจากสภาพจำลองระบบบ่อแก๊สชีวภาพ

เนื่องจากแก๊สจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพไม่เป็นแก๊สแห้ง เพื่อให้ผลงานวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง ในส่วนนี้จึงได้ศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรนจากสภาพจำลอง โดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ

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

4.7.1 สมรรถนะการแยกแก๊สแห้งของเมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำ

จากการศึกษาค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สแห้งของเมมเบรนเชื่อมขวางบวมตัวด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าค่าการซึมผ่านแก๊สทุกชนิดลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับในกรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนแห้ง แต่ค่าการซึมผ่านแก๊สทุกชนิดมีค่าสูงกว่าของเมมเบรนแห้ง ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ [14] ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์ของเมมเบรนที่ บวมตัวด้วยน้ำมีความอ่อนตัวและอยู่ห่างกันมากขึ้น โมเลกุลของแก๊สจึงสามารถแพร่ผ่านได้ มากขึ้น ในกรณีนี้การมีอนุภาคซีโอไลต์ในเมทริกซ์โพลีเมอร์ไม่ได้ช่วยให้ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สดัง แสดงในรูปที่ 4.14 ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เหมือนในกรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนแห้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งคู่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน ทั้งนี้อาจเนื่องจากซีโอไลต์ก็สามารถดูดซับน้ำ ได้ เช่นเดียวกับโพลีเมอร์ ทำให้ข้อดีในการเลือกสรรแก๊สของอนุภาคอนินทรีย์ซีโอไลต์ถูก บิดเบือนไป

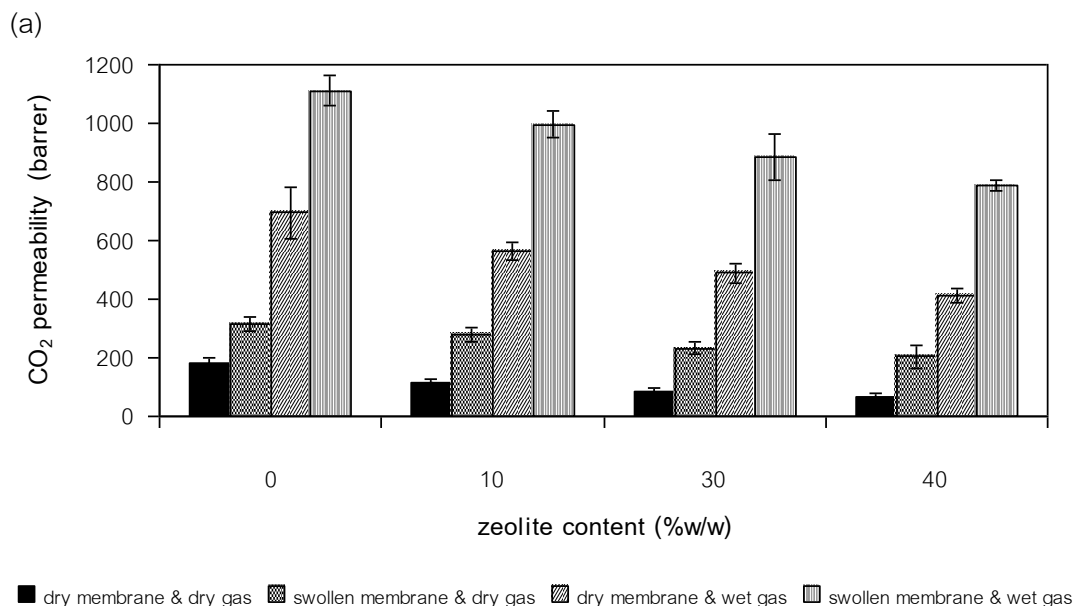
4.7.2 สมรรถนะการแยกแก๊สเปียกของเมมเบรนแห้ง

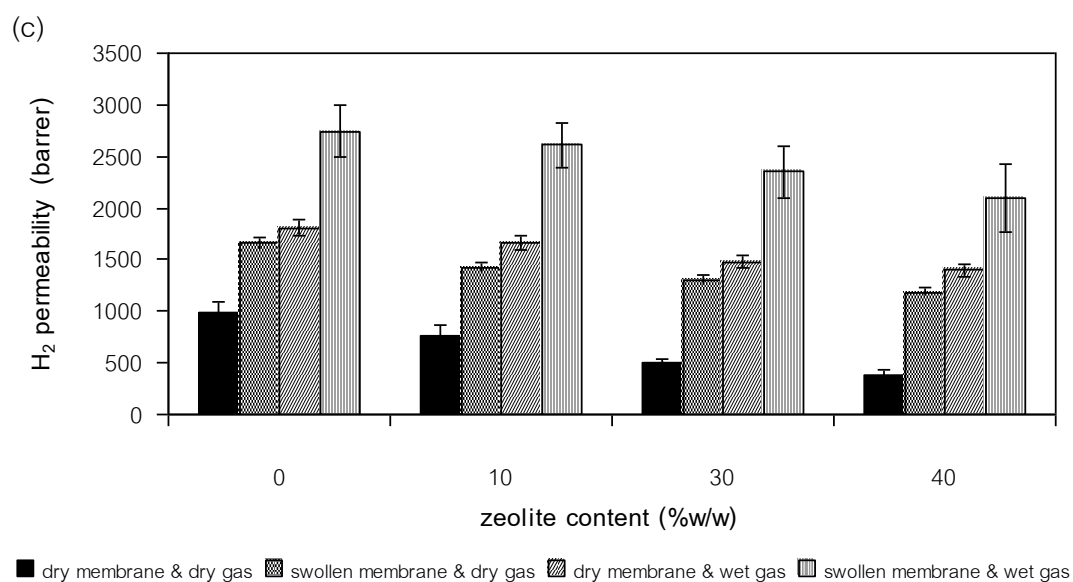
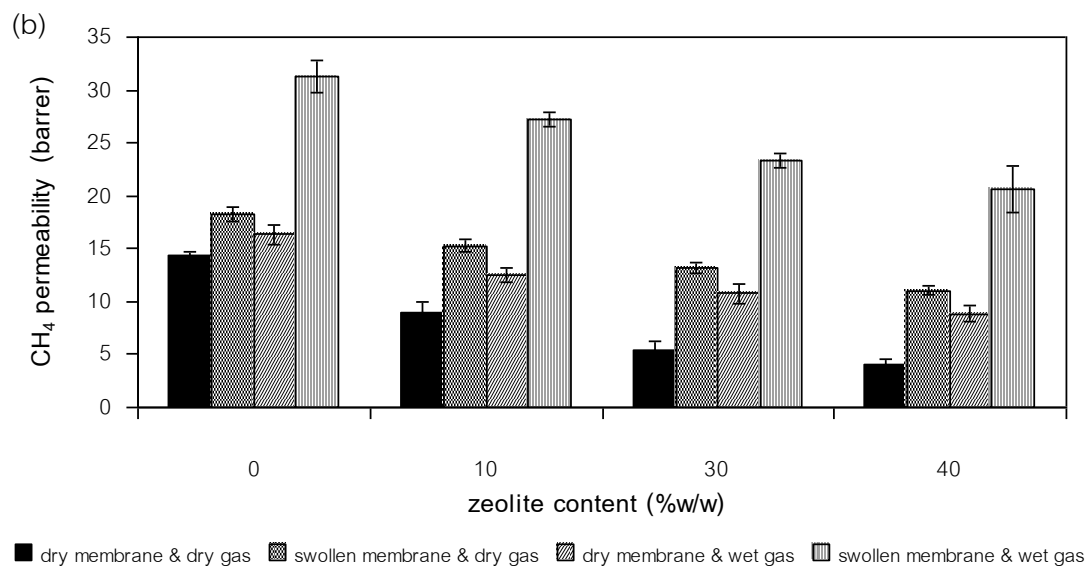
ในการบ่อนแก๊สเปียกผ่านเมมเบรนแห้งที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อปริมาณของซีโอไลต์เพิ่มขึ้นค่าการซึมผ่านแก๊สทุกชนิดลดลงเช่นเดิม แต่จะเริ่มเห็นความแตกต่างจากในกรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนเปียกในหัวข้อ 4.7.1 โดยแก๊สที่สามารถละลายน้ำได้มากและเมมเบรนชอบให้ผ่านได้มากกว่า คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน จะให้ค่าการซึมผ่านมากขึ้นกว่าใน 2 กรณีก่อนหน้า ต่างจากแก๊สที่สามารถละลายน้ำได้น้อย คือ แก๊สมีเทนและไนโตรเจนจะให้ค่าการซึมผ่านแก๊สน้อยกว่ากรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนเปียก อย่างไรก็ตามยังคงมากกว่ากรณีการแยกแก๊สแห้งด้วยเมมเบรนแห้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความชื้นที่มากับแก๊สเปียก ทำให้เมมเบรนบวมตัวได้ต่างกัน เนื่องจากการถ่ายโอนมวลน้ำจากแก๊สสู่เมมเบรน โดยปริมาณน้ำที่มากับแก๊สมีเทนและไนโตรเจนซึ่งละลายน้ำได้น้อย ไม่มากพอทำให้เมมเบรนบวมได้เท่ากับกรณีทำให้เมมเบรนอิมมัวด้วยน้ำก่อน ผลที่ตามมาคือ ทำ

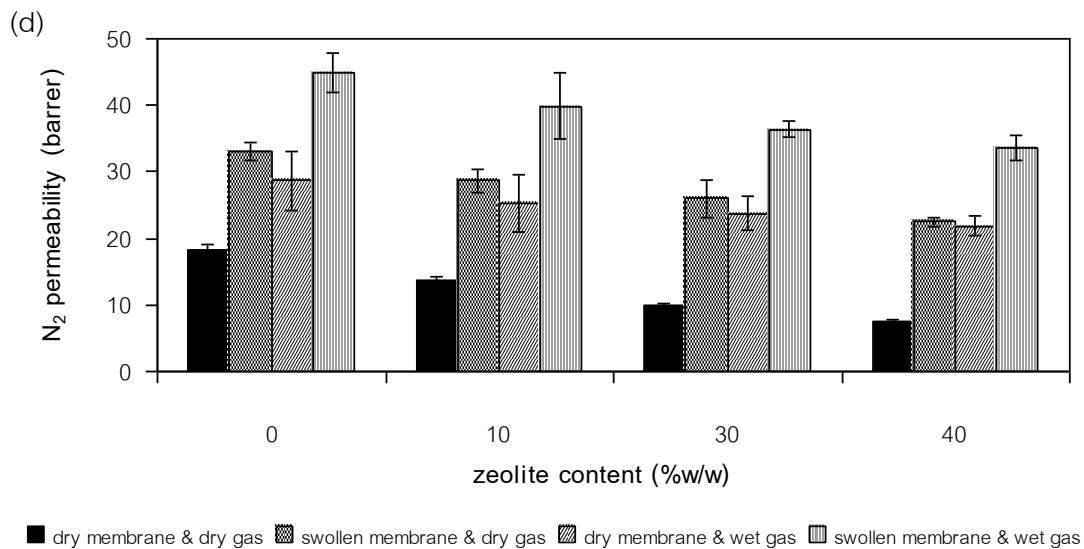
ให้ค่าการเลือกสรรดังแสดงในรูปที่ 4.14 ของแก๊สละลายน้ำได้มากกับแก๊สที่ละลายน้ำได้น้อย (ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน และไฮโดรเจนต่อมีเทน) สูงขึ้น โดยเฉพาะ คู่แก๊สที่มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกัน คือ ค่าการเลือกสรรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน

4.7.3 สมรรถนะการแยกแก๊สเป็ยกของเมมเบรนบวมตัวด้วยน้ำ

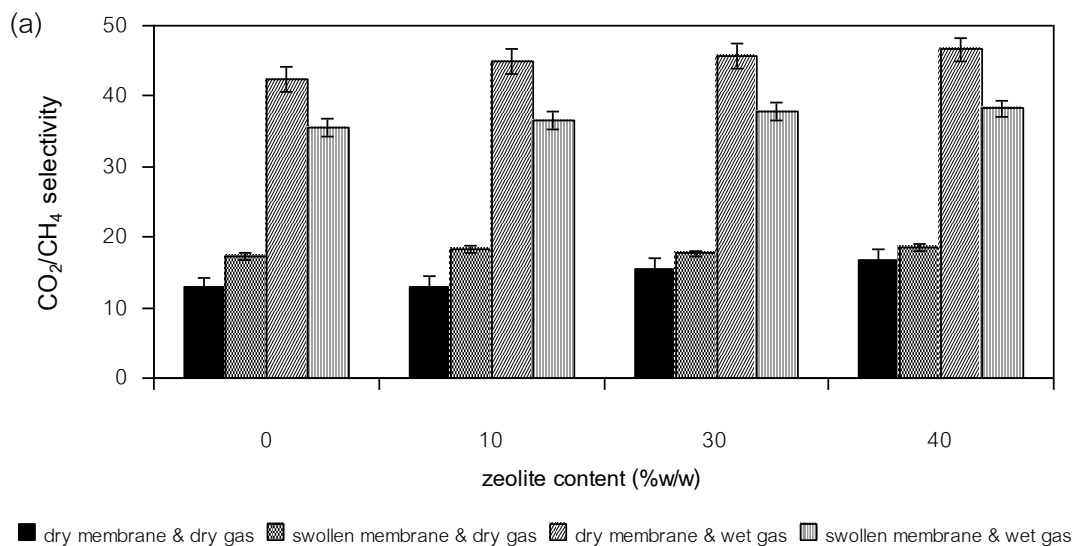
ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรคู่แก๊สเป็ยกของเมมเบรนเชื่อมขวางบวมตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าค่าการซึมผ่านแก๊สเป็ยกทุกชนิดลดลงเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้นเช่นเดิม และมีค่าสูงกว่าอีก 3 กรณีที่กล่าวมาแล้วอธิบายได้ว่าในกรณีนี้ไม่ต้องมีการถ่ายโอนมวลน้ำข้ามไปมาระหว่างเมมเบรนและแก๊ส เพราะทั้งเมมเบรนและแก๊สได้อิ่มตัวด้วยน้ำแล้ว ทำให้สภาพการบวมตัวของเมมเบรนไม่เปลี่ยนแปลงขณะที่มีแก๊สถ่ายโอนผ่านเมมเบรน โดยค่าการซึมผ่านแก๊สในกรณีนี้ทุกชนิดสูงกว่ากรณีป้อน แก๊สแห้งมาก เนื่องจากว่าเมมเบรนชนิดชอบน้ำยอมชอบให้แก๊สเป็ยกผ่านได้มากกว่าแก๊สแห้ง เมื่อแก๊สทุกชนิดอยู่ในสภาพเป็ยกและเมมเบรนบวมตัวเต็มที่สมรรถนะการเลือกสรรแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จึงด้อยลง

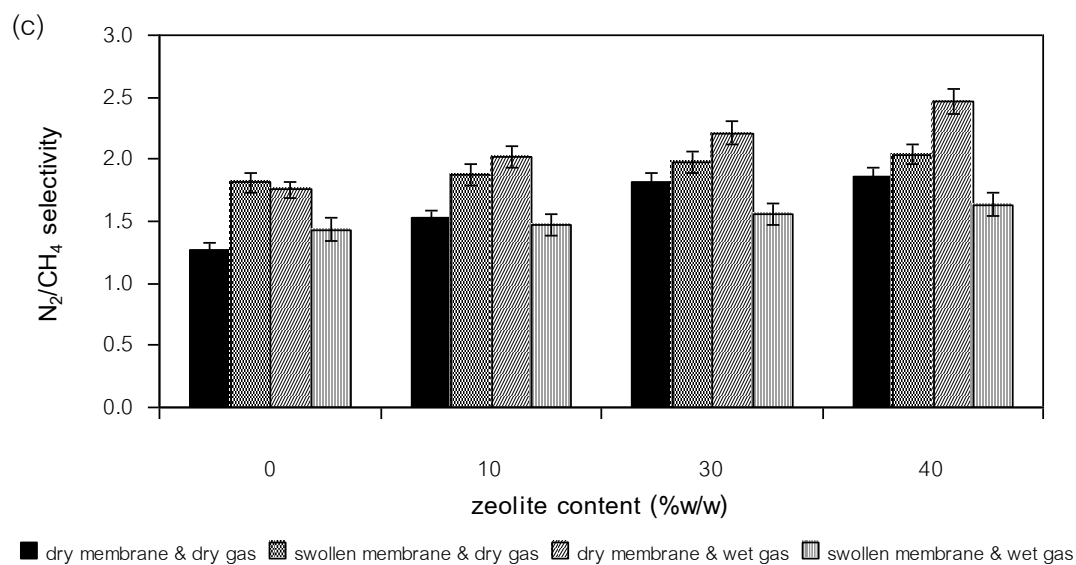
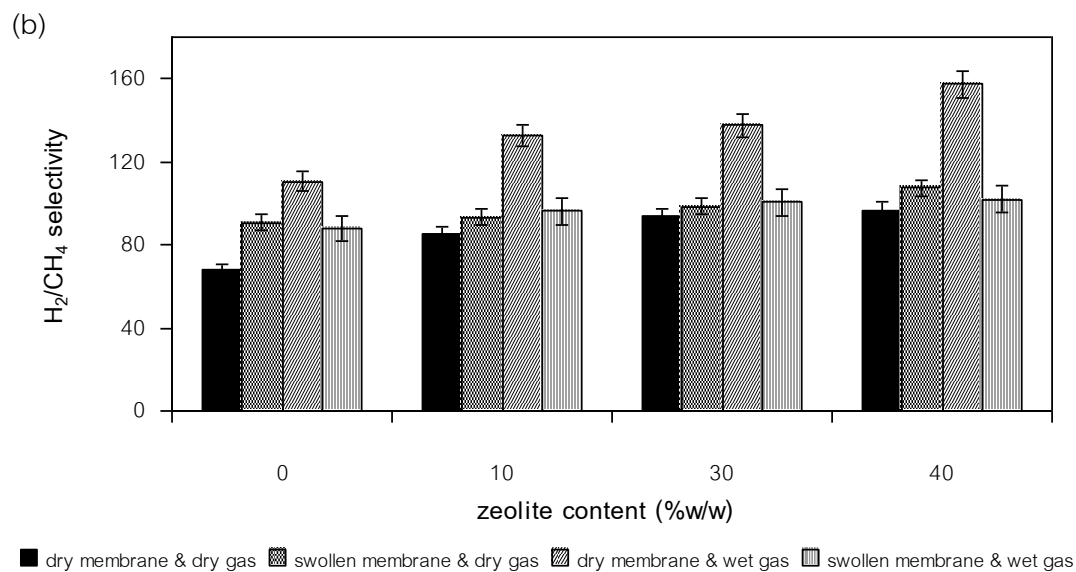






รูปที่ 4.13 ผลของสภาพเมมเบรนและสภาพแก๊สต่อค่าการซึมผ่านแก๊สที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์
(a) คาร์บอนไดออกไซด์ (b) มีเทน (c) ไฮโดรเจน (d) ไนโตรเจน





รูปที่ 4.14 ผลของสภาพเมมเบรนและสภาพแก๊สต่อค่าการเลือกสรรคู่แก๊สที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์

(a) คาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทน (b) ไฮโดรเจนต่อมีเทน (c) ไนโตรเจนต่อมีเทน

4.8 ผลการศึกษาการใช้กระบวนการเมมเบรนกับฟาร์มสุกรกรณีศึกษา

จากหัวข้อข้างต้นสรุปผลการศึกษาสมรรถนะอุทกคติกการใช้เมมเบรนแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทน ได้ว่าเมมเบรนที่มีศักยภาพมากที่สุดคือเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน โดยมีสมรรถนะการ แยกที่น่าสนใจ ดังนี้

Parameter	Dry membrane/dry gas		Swollen membrane/wet gas	
	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
CH ₄ permeability, barrer	4.0±0.6	7.8±0.6	20.6±2.2	23.7±1.0
H ₂ permeability, barrer	387.5±26.1	553.0±54.4	2102.1±31.8	2244.6±82.2
N ₂ permeability, barrer	7.4±0.6	11.8±0.9	33.7±0.9	37.4±2.1
CO ₂ /CH ₄ selectivity	16.5±1.6	35.0±1.0	38.2±0.2	36.9±1.7
H ₂ /CH ₄ selectivity	96.9±1.5	93.7±16.1	101.9±0.3	94.9±6.2
N ₂ /CH ₄ selectivity	1.9±0.1	1.8±0.2	1.6±0.1	1.7±0.1

ผลการวิเคราะห์คุณภาพแก๊สด้วยเครื่อง Gas Chromatography จากระบบบ่อแก๊สชีวภาพของฟาร์มสุกรกรณีศึกษา พบว่า ณ ตำแหน่งที่ 1 (รูปที่ 4.15 (ก) ตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพออกมาจากบ่อหมัก) มีปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 55.3±2.2 และ 23.4±0.7 ตามลำดับ และ ณ ตำแหน่งที่ 2 (รูปที่ 4.15 (ข) ตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพผ่านหอกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) มีปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 55.1±1.6 และ 18.8±1.2 ตามลำดับ แสดงว่าหอกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ฟาร์มใช้มีประสิทธิภาพไม่เกินไปร้อยละ 20 เท่านั้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 ตำแหน่งตรวจวัด ณ ฟาร์มสุกรกรณีศึกษา

(ก) ตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพออกมาจากบ่อหมัก (ข) ตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพผ่านหอกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรน 2 ชนิด คือเมมเบรนเชื่อมขวาง ไคโตซาน และเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ณ ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบประเด็นต่อไปนี้

- ก) เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีค่าสมรรถนะการแยกแก๊สสูงกว่าเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซานสอดคล้องกับสมรรถนะการแยกอุดมคติ
- ข) ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรแก๊สของเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จากระบบบ่อแก๊สชีวภาพของฟาร์มสุกรกรณีศึกษาสอดคล้องกับสมรรถนะการแยกอุดมคติจากเมมเบรนแห้ง/แก๊สแห้ง
- ค) เมื่อใช้เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน ณ ตำแหน่งที่ 1 ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 23.4 ± 0.7 เป็น 10.5 ± 1.3 และ ณ ตำแหน่งที่ 2 จากร้อยละ 18.8 ± 1.2 เป็น 7.2 ± 2.9
- ง) เมื่อใช้เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ณ ตำแหน่งที่ 1 ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 23.4 ± 0.7 เป็น 5.1 ± 0.3 และ ณ ตำแหน่งที่ 2 จากร้อยละ 18.8 ± 1.2 เป็น 3.4 ± 0.5

ตารางที่ 4.2 สมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรนจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพของฟาร์มสุกรกรณีศึกษา

Parameter	Position 1		Position 2	
	0% zeolite	40% zeolite	0% zeolite	40% zeolite
CO ₂ permeability, barrer	249.5±13.5	170.0±13.7	212.5±16.0	151.6±13.4
CH ₄ permeability, barrer	8.7±2.7	5.5±1.3	9.1±0.8	4.7±0.4
CO ₂ /CH ₄ selectivity	28.7±1.4	30.6±1.4	23.4±6.1	32.0±6.1

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและงานที่จะดำเนินการต่อไป

5.1 สรุปผลการศึกษาปีที่ 1 “การใช้กระบวนการเมมเบรนเพื่อแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทน”

เมมเบรนที่เตรียมขึ้นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทนในระบบแก๊สชีวภาพ ประกอบด้วย 5 ชนิด ดังนี้

- 1) เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน
- 2) เมมเบรนไม่เชื่อมขวางไคโตซาน
- 3) เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์
- 4) เมมเบรนไม่เชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์
- 5) เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่บวมตัวด้วยน้ำ

ไคโตซานที่ใช้ในการเตรียมเมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 9.5×10^5 ดอลตัน และร้อยละการกำจัดหมู่แอสีทิลเท่ากับ 90 ± 5 ซีโอไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นซีโอไลต์เอ มีขนาดของรูพรุน พื้นผิว และปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 2551.6 อังสตรอม, 13.9 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.0137 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

การเชื่อมขวางเมมเบรนโดยสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง แต่ค่าเลือกสรรคู่แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางเมมเบรนจะทำให้ สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง โมเลกุลของแก๊สจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้น้อยลง อีกทั้งการเชื่อมขวางเมมเบรน ยังมีความสามารถในการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นด้วย

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ค่าการซึมผ่านแก๊สเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกสรรคู่แก๊สลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ปริมาตรอิสระจึงเพิ่มขึ้น โมเลกุลของแก๊สจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น

การเพิ่มขึ้นของความดันส่งผลให้ค่าการซึมผ่านแก๊สเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกสรรคู่ แก๊สลดลง เนื่องจาในกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนมีความดันย่อยเป็นแรงขับ ดังนั้น ความดันที่เพิ่มขึ้น จะทำให้โมเลกุลของแก๊สสามารถเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น

การเติมซีโอไลต์ในเมมเบรนไคโตซาน ส่งผลต่อสมบัติของเมมเบรนดังนี้ การเพิ่มขึ้น ของปริมาณซีโอไลต์ในเมมเบรนส่งผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำในเมมเบรนเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ซีโอไลต์มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลน้ำไว้ภายในโพรงได้ดี และค่าการเลือกสรรคู่แก๊ส เพิ่มขึ้นเนื่องจากความมีขั้วของซีโอไลต์สามารถดึงดูดให้โมเลกุลของแก๊สอยู่ภายในโพรงของ ซีโอไลต์ได้

ในขณะที่ความสามารถในการทนต่อแรงดึงลดลง เนื่องจากจะไปทำให้เกิดรอยแยกที่ ผิวสัมผัสระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และพื้นผิวซีโอไลต์ และค่าการซึมผ่านแก๊สลดลง เนื่องจาก เส้นทางที่โมเลกุลแก๊สสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

จากผลของการศึกษาในส่วนนี้สรุปได้ว่า เมมเบรนที่มีศักยภาพมากที่สุดคือ เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของน้ำหนักไคโตซาน โดยมีสมรรถนะการแยกที่น่าสนใจ ดังนี้

Parameter	Dry membrane/dry gas		Swollen membrane/wet gas	
	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
CH ₄ permeability, barrer	4.0±0.6	7.8±0.6	20.6±2.2	23.7±1.0
H ₂ permeability, barrer	387.5±26.1	553.0±54.4	2102.1±31.8	2244.6±82.2
N ₂ permeability, barrer	7.4±0.6	11.8±0.9	33.7±0.9	37.4±2.1
CO ₂ /CH ₄ selectivity	16.5±1.6	35.0±1.0	38.2±0.2	36.9±1.7
H ₂ /CH ₄ selectivity	96.9±1.5	93.7±16.1	101.9±0.3	94.9±6.2
N ₂ /CH ₄ selectivity	1.9±0.1	1.8±0.2	1.6±0.1	1.7±0.1

ผลการศึกษาสมรรถนะการแยกแก๊สของเมมเบรน 2 ชนิด คือเมมเบรนเชื่อมขวาง ไคโตซาน และเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดย น้ำหนักจากระบบบ่อแก๊สชีวภาพของฟาร์มสุกรกรณีศึกษา ณ ตำแหน่งที่ 1 (ตำแหน่งที่แก๊ส ชีวภาพออกมาจากบ่อหมัก) และตำแหน่งที่ 2 (ตำแหน่งที่แก๊สชีวภาพผ่านหอกำจัดแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์) สรุปประเด็นได้ดังต่อไปนี้

- ก) เมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีค่าสมรรถนะการแยกแก๊สสูงกว่าเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซานสอดคล้องกับสมรรถนะการแยกอุตสาหกรรม
- ข) ค่าการซึมผ่านแก๊สและค่าการเลือกสรรแก๊สของเมมเบรนเชื่อมขวางไคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จากระบบบ่อแก๊สชีวภาพของ

ฟาร์มสุกรกรณีศึกษาสอดคล้องกับสมรรถนะการแยกอุดมคติจากเมมเบรนแห้ง/แก๊สแห้ง

- ค) เมื่อใช้เมมเบรนเชื่อมขวางโคโตซาน ณ ตำแหน่งที่ 1 ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 23.4 ± 0.7 เป็น 10.5 ± 1.3 และ ณ ตำแหน่งที่ 2 จากร้อยละ 18.8 ± 1.2 เป็น 7.2 ± 2.9
- ง) เมื่อใช้เมมเบรนเชื่อมขวางโคโตซาน-ซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ณ ตำแหน่งที่ 1 ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 23.4 ± 0.7 เป็น 5.1 ± 0.3 และ ณ ตำแหน่งที่ 2 จากร้อยละ 18.8 ± 1.2 เป็น 3.4 ± 0.5

5.2 งานที่จะดำเนินการต่อไปในปีที่ 2 “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพถังหมัก”

การศึกษา “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพถังหมัก” ของงานปีที่ 2 ได้ดำเนินการแล้ว คือออกแบบและสร้างถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแยก 2 ขั้นตอน ในหน่วยเดียวกัน โดยมีระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis), ปฏิกิริยาสร้างกรด (Acidogenesis) และปฏิกิริยาสร้างกรดแอสติกจากกรดไขมันระเหย (Acetogenesis) ในส่วนที่ 1 ของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 2 วัน และมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสร้างแก๊สมีเทน (Methanogenesis) ในส่วนที่ 2 ของถังปฏิกรณ์เท่ากับ 9 วัน

งานที่จะดำเนินการต่อไป คือทดลองย่อยสลายมูลสุกรที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 5, 10 และ 20% โดยมีสมมติฐานคือ ระบบเทคโนโลยีสะอาดสามารถลดการใช้น้ำในฟาร์มสุกรได้ และ ความเข้มข้นของปฏิจุลสุกรมีผลต่อปริมาณการเกิดแก๊สมีเทน

รายการอ้างอิง

- [1] ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2545)
- [2] http://bangpakong.onep.go.th/document/supportDB/part1/pigFarmpollution/pigFarmMain_files/slide0001.htm การจัดการมลพิษในฟาร์มสุกร
- [3] <http://www.pcd.go.th> มาตรฐานเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร
- [4] มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ (2542), เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม อ้างถึงใน ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2545)
- [5] <http://teenet.chiangmai.ac.th/btc/introbiogas02.php#05> ทฤษฎีแก๊สชีวภาพ
- [6] <http://www.separationprocesses.com/membrane> อ้างถึงใน ชั้นทอง สุนทรภา (2547) เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [7] Şen, D., Kalıpçılar, H., and Yilmaz, L. Development of polycarbonate based zeolite 4A filled mixed matrix gas separation membranes. Journal of Membrane Science 303 (2007): 194–203.
- [8] Li, Y., Chung, T.–S., Cao, 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.
- [9] 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.
- [10] Anson, M., Marchese, J., Garis, E., Ochoa, N., and Pagliero, C. ABS copolymer–activated carbon mixed matrix membranes for CO₂/CH₄ separation. Journal of Membrane Science 243 (2004): 19–28.
- [11] Pechar, T.W., Kim, S., Vaughan, B., Marand, 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.

- [12] 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.
- [13] Chung, T.-S., Jiang, L.Y., Li, Y., and Kulprathipanja, S. Mixed matrix membranes (MMMs) comprising organic polymers with dispersed inorganic fillers for gas separation. Progress in Polymer Science 32 (2007): 483–507.
- [14] Liu, L., Chakma, A., and Feng, X. Gas permeation through water-swollen hydrogel membrane. Journal of Membrane Science 310 (2008): 66–75.