

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนเพื่อแยก
สารละลายเอทานอล-น้ำ

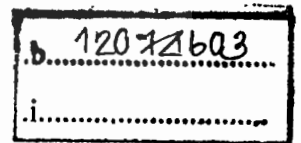
PREPARATION OF A-TYPE ZEOLITE COATED ON ALUMINA
MEMBRANE FOR SEPARATION OF ETHANOL-WATER MIXTURE



ปรมินทร์ ขวัญนอน
PORAMIN KHWANNORN

จพ.
๒/๒๑ ก
๒๕๕๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 87877
วัน,เดือน,ปี..... 19 ส.ค. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-220-152
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREPARATION OF A-TYPE ZEOLITE COATED ON
ALUMINA MEMBRANE FOR SEPARATION OF
ETHANOL-WATER MIXTURE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนเพื่อ แยกสารละลายเอทานอล-น้ำ
นักศึกษา	นายปรมิินทร์ ขวัญนอน
รหัสประจำตัว	48060104
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.พรสวรรค์ อัสวเสงรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม)	ผศ. ดร. ดวงกมล ณ ระนอง

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ทำการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเพื่อสารละลายแยกเอทานอล-น้ำ ซีโอไลต์ชนิดเอสังเคราะห์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ซึ่งได้แก่ เวลาในการตกผลึกและอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาจากการทดลองพบว่าเวลาในการตกผลึกที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 ชั่วโมง และอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.189 อนุภาคของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 685 นาโนเมตร จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้เคลือบลงบนผิวตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนพบว่าเมมเบรนมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 91 ไมโครเมตร ทดสอบประสิทธิภาพของเมมเบรนด้วยการแยกเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชันที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนเท่ากับ 80, 85, 90 และ 95 wt.% และอุณหภูมิของสารละลายป้อนเท่ากับ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่เตรียมได้มีค่าการแยกเท่ากับ 949 และค่าฟลักซ์ของน้ำเท่ากับ $2.57 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ เมื่อนำไปใช้แยกสารละลายที่มีความเข้มข้นของน้ำ 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา I และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Preparation of A-type zeolite coated on alumina membrane for separation of ethanol-water mixture
Student	Mr.Poramain Khwannorn
Student ID.	48060104
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Dr. Pomsawan Assawasaengrat
Thesis Co-Advisor	Asst.Prof.Dr. Duangkamol NaRanong

ABSTRACT

The aim of this research is to prepare A-type zeolite membrane on tubular alumina support for the separation of ethanol-water mixture. A-type zeolite was synthesized at 100 °C. The parameters affecting the synthesis process namely, crystallization time and silica to alumina ratio were studied. The result showed that optimal crystallization time and silica to alumina ratio were 4 hours and 1.189, respectively. Average size of the crystals was 685 nm. The appropriate amount of the synthesized zeolite coated on alumina support to provide a membrane with an average thickness of about 91 μm. The membranes were tested for the separation ethanol-water mixtures by pervaporation at concentrations in the feed solution of 80, 85, 90 and 95 wt.% and feed temperatures at 75, 80, 85 and 90 °C. The experimental results showed that the obtained A-type zeolite coated alumina membrane had the separation factor of 949 and the water flux was 2.57 kg m⁻²h⁻¹ when the feed solution of 5 wt% water was separated at 90 °C.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และ ผศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความช่วยเหลือ ช่วยแก้ปัญหา ให้คำปรึกษาและคำชี้แนะ ตลอดจนให้ความรู้
ให้แง่คิดที่ดีต่อการทำงานวิจัยและประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์ ดร.สุธาสนี เนรมิตตพงษ์
ผศ.ดร. ชูวงศ์ ชัยสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะใน
การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ
ในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็น
กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง
ด้วยดี คุณงามความดีและประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มี
พระคุณทุกท่าน

ปรมินทร์ ขวัญนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ซีโอไลต์.....	5
2.1.1 แหล่งกำเนิดของซีโอไลต์.....	6
2.1.2 โครงสร้างของซีโอไลต์.....	7
2.1.3 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน.....	10
2.1.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	14
2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	17
2.1.6 ความเป็นกรดของซีโอไลต์.....	19
2.1.7 ความสามารถในการเลือกผ่านของซีโอไลต์ (shape selectivity).....	20
2.1.8 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A).....	22
2.2 เอทานอล.....	25
2.2.1 องค์ประกอบของเอทานอล.....	25
2.2.2 การทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นและบริสุทธิ์สูงขึ้นสามารถทำได้ด้วยวิธีต่างๆ.....	26
2.3 กระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปอเรชัน.....	27
2.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อศักยภาพของเมมเบรน.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 คุณสมบัติของเพอร์เวปพรेशन.....	30
2.4 ข้อดีของกระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปพรेशन.....	31
2.5 ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปพรेशन.....	32
2.5.1 Concentration polarization (CP).....	32
2.5.2 Fouling.....	33
2.5.3 ความคงตัวของเมมเบรน.....	33
2.6 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน.....	33
2.7 เมมเบรนสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปพรेशन..	34
2.7.1 เมมเบรนแบบสมมาตร (symmetric or isotropic membrane).....	34
2.7.2 เมมเบรนแบบไม่สมมาตร (asymmetric or anisotropic membrane).....	34
2.7.3 เมมเบรนเชิงประกอบ (composite membrane).....	34
2.8 อุปกรณ์เมมเบรน (membrane module).....	37
2.8.1 อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ (plate and frame module).....	39
2.8.2 อุปกรณ์แบบท่อ (tubular module).....	39
2.8.3 อุปกรณ์แบบท่อม้วน (spiral wound module).....	40
2.8.4 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง (hollow fiber module).....	41
2.9 การนาระบบเพอร์เวปพรेशनไปประยุกต์ใช้งาน.....	42
2.9.1 การแยกน้ำออกจากของเหลวอินทรีย์.....	43
2.9.2 การแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ.....	47
2.9.3 การแยกของผสมอินทรีย์.....	48
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	53
3.1 สารเคมี.....	53
3.2 ตัวรองรับ (Support).....	53
3.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	54
3.4 วิธีการทดลอง.....	54
3.4.1 การเตรียมพื้นผิวของตัวรองรับ.....	54
3.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอ.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การเคลือบ (coat) ซีโอไลต์เอลงบนผิวตัวรองรับอะลูมินา.....	55
3.4.4 กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปพอร์ชัน.....	56
3.4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารละลาย.....	57
3.4.6 ศึกษาพื้นฐานวิทยา (morphology) ของเมมเบรนเชิงประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	57
3.4.7 ศึกษาการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของเมมเบรนเชิงประกอบ.....	57
3.4.8 การวัดรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRFs).....	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	58
4.1 ผลของอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่อผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ.....	58
4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการตกผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ.....	64
4.3 ผลของปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอที่เคลือบบนผิวตัวรองรับอะลูมินา.....	67
4.4 ผลการทดสอบกระบวนการเพอร์เวปพอร์ชันของเอทานอลกับน้ำ.....	71
4.4.1 ผลของปริมาณซีโอไลต์เอที่เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา.....	71
4.4.2 ผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อน.....	73
4.4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อน.....	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง.....	84
ภาคผนวก ข การเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำและวิธีการวิเคราะห์.....	89
ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำ.....	91
ภาคผนวก ง ตำแหน่งมาตรฐานของของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ ชุดทดลองเพอร์แวกพอเรชัน.....	94
ภาคผนวก ช วิธีคำนวณฟลักซ์และค่าการแยก.....	95
ภาคผนวก ฉ หลักการทำงานของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	109



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทรงสี่หน้า SiO_4 และ AlO_4 ที่ถูกเชื่อมต่อกันของซีโอไลต์ Natrolite.....	6
2.2	โครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้า (TO_4 , T = Si or Al).....	7
2.3	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (SBU) ในโครงสร้างของซีโอไลต์.....	8
2.4	โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด A.....	12
2.5	โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด Faujasite.....	12
2.6	โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดบีต้า.....	13
2.7	โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-12.....	13
2.8	โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด Mordenite.....	14
2.9	โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด MCM-22.....	14
2.10	แผนผังลำดับขั้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	15
2.11	รูปแบบของรูพรุนของซีโอไลต์บางชนิด.....	21
2.12	ชนิดของปฏิกิริยาการเลือกเกิดที่เป็นผลจากโครงสร้างซีโอไลต์.....	22
2.13	โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดเอ.....	23
2.14	แสดงระบบช่องว่างใน 3 มิติของซีโอไลต์เอ.....	23
2.15	แสดงการจับตัวเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้าในซีโอไลต์เอ.....	24
2.16	แสดงการเกิดผลึกซีโอไลต์.....	25
2.17	โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล.....	26
2.18	หลักการของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอเวปอเรชัน.....	28
2.19	วิธีการลดความดันด้านเพอมีอทสำหรับเพอเวปอเรชัน.....	29
2.20	การเกิด Concentration polarization (CP).....	33
2.21	เมมเบรนแบบสมมาตร.....	35
2.22	เมมเบรนแบบไม่สมมาตร.....	35
2.23	เมมเบรนเชิงประกอบ.....	35
2.24	รูปร่างของเมมเบรน.....	38
2.25	อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ.....	40
2.26	อุปกรณ์แบบท่อ.....	40
2.27	อุปกรณ์แบบท่อม้วน.....	41
2.28	อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.29	Liquid – vapor equilibrium สำหรับสารละลายเอทานอล – น้ำ.....	43
2.30	กระบวนการผสม (hybrid process) ระหว่างการกลั่นกับเพอเวปอเรชันเพื่อผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 % โดยน้ำหนัก.....	44
2.31	เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเอทานอลกับอัตราการผลิต (m^3 / day) สำหรับกระบวนการเพอเวปอเรชัน กระบวนการดูดซับและกระบวนการกลั่น.....	45
2.32	โรงงานต้นแบบ (pilot plant) ที่มีกำลังการผลิตเอทานอล 1,000 ตัน/ปี ของบริษัท Sulzer Chemtech.....	46
2.33	การแยกเอทานอลออกจากเบียร์เพื่อผลิตเบียร์ที่มีแอลกอฮอล์ต่ำเป็นของบริษัท GFT ด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน.....	47
2.34	ความสามารถในการแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านเมมเบรนชนิด silicone rubber ซึ่งเป็นเมมเบรนแบบท่อม้วน.....	48
3.1	ตัวรองรับอะลูมินา (Alumina support).....	53
3.2	ชุดสำหรับ Coat ซีโอไลต์ชนิดเอลงบนผิวตัวรองรับอะลูมินา.....	55
3.3	เครื่อง Autoclave สำหรับอัดความดัน.....	55
3.4	แสดงผังเพอร์เวปอเรชัน.....	56
4.1	XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.038.....	59
4.2	XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189	59
4.3	XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.229	60
4.4	XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.319.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 0.67 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส.....	62
4.6	SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส.....	62
4.7	SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.5 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส.....	63
4.8	SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 2.33 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส.....	63
4.9	SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ที่เวลาในการตกผลึก 2 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส.....	64
4.10	SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส.....	65
4.11	SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ที่เวลาในการตกผลึก 6 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส.....	65
4.12	SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ที่เวลาในการตกผลึก 8 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส.....	66
4.13	SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 ที่เวลาในการตกผลึก 12 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส.....	66
4.14	ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอที่เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา: ปริมาณ ซีโอไลต์ชนิดเอที่ใช้ในการเคลือบ 96 กรัมต่อตารางเมตร.....	68
4.15	ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอที่เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา: ปริมาณ ซีโอไลต์ชนิดเอที่ใช้ในการเคลือบ 241 กรัมต่อตารางเมตร.....	69
4.16	ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอที่เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา: ปริมาณ ซีโอไลต์ชนิดเอที่ใช้ในการเคลือบ 482 กรัมต่อตารางเมตร.....	70
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำต่อเอทานอลกับความหนาของเมมเบรน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส...	72
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับความหนาของเมมเบรน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส...	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm	74
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm	74
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรน.....	75
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรน.....	75
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm	77
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm	77
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรน.....	78
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรน.....	78
ข-1	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟฟี.....	90
ค-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคของเอทานอลกับน้ำหนักของเอทานอลในสารละลายมาตรฐานแต่ละความเข้มข้น.....	91
ค-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคของน้ำกับน้ำหนักของน้ำในสารละลายมาตรฐานแต่ละความเข้มข้น.....	91
ง-1	รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดเอ.....	93
จ-1	ชุดทดลองเพอร์แวกซ์โพเรชันแยกเอทานอล-น้ำ.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ฉ-1	แผนภาพแสดงการทำงาน ของ XRD.....	99
ฉ-2	แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ของสารตัวอย่าง.....	100
ฉ-3	รูปแสดงส่วนประกอบหลักของ XRF.....	101
ฉ-4	แผนผังแสดงลักษณะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี.....	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ซีโอไลต์ชนิดต่างๆและหน่วยโครงสร้างทุดิกฤมิ.....	8
2.2	โครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์.....	10
2.3	สารเคมีอินทรีย์กำหนดโครงสร้าง.....	15
2.4	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตกผลึกของซีโอไลต์.....	17
2.5	การแบ่งชนิดของกรดตามอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา.....	20
2.6	ประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบชอบน้ำ ที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล – น้ำ โดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน.....	36
2.7	ประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ที่ใช้ในการแยกสารละลายอินทรีย์-น้ำ โดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน.....	37
2.8	บริษัทผู้ผลิตเมมเบรนแบบต่างๆ เพื่อใช้งานสำหรับเพอเวปอเรชัน.....	39
2.9	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของอุปกรณ์เมมเบรนทั้ง 4 แบบ.....	42
2.10	การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเอทานอลสำหรับ โรงงานการผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมีกำลังการผลิต 1 m ³ / day.....	45
2.11	การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายต่างๆ ด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน.....	46
2.12	ตัวอย่างการใช้งานเพอเวปอเรชันสำหรับแยกของผสมอินทรีย์.....	48
2.13	สารเคมีที่ได้จากการแยกหรือสามารถทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีเพอร์เวปอเรชัน..	49
4.1	องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของซีโอไลต์ชนิดเอ (XRF).....	61
ก.1	เพอร์มิเอทพลั๊กซ์ของเอทานอล เพอร์มิเอทพลั๊กซ์ของน้ำ และค่าการแยกของน้ำ เทียบกับเอทานอล ที่ความเข้มข้นของของสารละลายป้อน (เอทานอล/น้ำ) เท่ากับ 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 wt.% และอุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 ไมโครเมตร.....	84
ก.2	ความเข้มข้นของเอทานอลกับน้ำ ในเพอร์มิเอท ที่ความเข้มข้นของของสารละลายป้อน (เอทานอล/น้ำ) เท่ากับ 95/5, 90/10, 85/15 และอุณหภูมิสารป้อน 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 ไมโครเมตร เวลาในการแพร่ผ่าน 1 ชั่วโมง.....	85
ก.3	เพอร์มิเอทพลั๊กซ์ของเอทานอล เพอร์มิเอทพลั๊กซ์ของน้ำ และค่าการแยกของน้ำ ที่ความเข้มข้นของของสารละลายป้อน(เอทานอล/น้ำ) เท่ากับ 95/5 wt.% และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการแพร่ผ่าน 1 ชั่วโมง ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 20, 91 และ 105 ไมโครเมตร.....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.4	เพอร์มิเอทฟลักซ์รวม เพอร์มิเอทฟลักซ์ของเอทานอล เพอร์มิเอทฟลักซ์ของน้ำ ที่ความเข้มข้นของเอทานอล-น้ำ ในสารป้อนเท่ากับ 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 wt.% และอุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ผ่านตัวรองรับ อะลูมินาเมมเบรน เวลาในการแพร่ผ่าน 1 ชั่วโมง.....	87
ก.5	เพอร์มิเอทฟลักซ์ของเอทานอล เพอร์มิเอทฟลักซ์ของน้ำ และค่าการแยกของ น้ำ ที่ความเข้มข้นของของสารละลายป้อน (เอทานอล/น้ำ) 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 wt.% และอุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ผ่านตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรน เวลาในการแพร่ผ่าน 1 ชั่วโมง.....	88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันการนำเอทานอลมาใช้ประโยชน์มีเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้เพื่อการบริโภค (beverage alcohol) และเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง (fuel alcohol) ซึ่งเอทานอลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้นั้นจะต้องเป็นเอทานอลที่ถูกกำจัดน้ำออกจนเกือบหมด หรือเอทานอลไร้น้ำ (anhydrous ethanol) ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าหรือเท่ากับ 99.5 wt.% โดยสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงเพื่อทดแทนน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล ใช้ผสมกับน้ำมันเบนซิน เรียกว่า แก๊สโซฮอล์ (gasohol) หรือผสมกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ดีโซฮอล์ (diesohol) ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้กับเครื่องยนต์ การใช้เอทานอลบริสุทธิ์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงที่สะดวกในขณะนี้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ คือการใช้ในรูปแบบของการผสมกับน้ำมัน โดยเอทานอลที่ผสมในสัดส่วน 5-30 vol.% [1] จะสามารถใช้เป็นสารทดแทนสารเอ็มทีบีอี (methyl-tertiary butyl ether; MTBE) ที่เป็นสารเพิ่มออกซิเจนและออกเทนในน้ำมันได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในหลายประเทศ เช่น บราซิล สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย ฟิลิปปินส์ รวมถึงประเทศไทยด้วย ซึ่งการใช้น้ำมันเบนซินผสมกับเอทานอลที่มีความเข้มข้น 99.5 wt.% เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ได้ดีกับรถยนต์ในปัจจุบัน และสามารถลดมลภาวะทางอากาศได้อย่างดีอีกด้วย เนื่องจากเอทานอลที่มีความเข้มข้น 99 wt.% จะมีค่าออกเทนสูงกว่าน้ำมันเบนซินประมาณ 15 % [2] หากรัฐบาลมีนโยบายสนับสนุนการใช้เชื้อเพลิงเอทานอลก็จะสามารถลดการนำเข้าสารเพิ่มค่าออกเทนหรือสารเพิ่มออกซิเจนจากต่างประเทศ และส่งผลทำให้อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลในประเทศ จะต้องเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการ

ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมทั่วโลกประมาณ 93 % จะใช้กระบวนการหมักและจะได้เอทานอลเข้มข้นประมาณ 10 ถึง 25 vol.% [3] ดังนั้นเพื่อต้องการให้ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น จะต้องนำเอทานอลที่ได้เข้าสู่กระบวนการกลั่นลำดับส่วน ซึ่งจะได้เอทานอลมีความเข้มข้น 95.6 wt.% และมีน้ำอยู่ 4.4 wt.% เนื่องจากสารละลายเอทานอลและน้ำเป็นของผสมอะซิโโทโรป (azeotropic mixture) กล่าวคือเป็นของผสมที่แยกได้อย่างมีข้อจำกัดโดยวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดา โดยของผสมจะเกิดอะซิโโทโรปที่ความเข้มข้นของเอทานอล 95.6 wt.% ที่จุดเดือด 78.15 องศาเซลเซียส และความดัน 101.3 กิโลปาสกาล [4] หากต้องการเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.5 wt.% จะต้องทำการกลั่นแบบอะซิโโทโรป (azeotropic distillation) ซึ่งเป็นวิธีการกลั่นแยกของผสมโดยใช้คุณสมบัติแบบจุดเดือดร่วม (boiling point azeotropic) ของของผสมจะต้องเติมสารช่วยกลั่นได้แก่ เบนซีน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและติดไฟได้ง่าย รวมทั้งความซับซ้อนของการทำงาน ค่าใช้จ่ายสูง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีการใช้พลังงานไอน้ำในการกลั่นทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน นอกจากนี้เอทานอลที่ทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีการนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยาและเวชภัณฑ์เนื่องจากมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ด้วย

กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันเป็นกระบวนการแยกสารละลายผ่านเมมเบรน ซึ่งได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมเคมีที่ประสบปัญหาในด้านพลังงานและการแยกด้วยกระบวนการแบบเดิม (การกลั่น, การแยก หรือ การดูดซับ) เช่น อะซิโโทป และการแยกของเหลวผสมด้วยการกลั่นแบบปิด การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายออร์แกนิก และการนำน้ำกลับมาเพิ่มค่าการเจือจางให้สูงด้วยกระบวนการรีคอปเวอรี [5, 6] โดยกระบวนการนี้เหมาะสำหรับการแยกสารละลายผสมซึ่งมีองค์ประกอบหนึ่งอยู่ในอัตราส่วนที่ต่ำโดยเฉพาะสารละลายอะซิโโทป เช่น สารละลายแอลกอฮอล์กับน้ำ หรือสารอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำทิ้ง เนื่องจากมีข้อได้เปรียบทั้งในแง่เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม กล่าวคือประหยัดพลังงาน ไม่ต้องใช้สารเคมีจึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากน้ำทิ้งจากกระบวนการมีน้อยมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวหากเราสามารถนำเทคโนโลยีระบบเมมเบรนมาแยกของเหลวผสมโดยใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันก็จะเป็อีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลเกือบบริสุทธิ์จากชีวมวลแทนวิธีการกลั่นแบบธรรมดาที่ใช้ในปัจจุบัน

กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 โดยกระบวนการเริ่มแรกเป็นของบริษัท GFT (ปัจจุบัน Sulzer Chemtech) สำหรับแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อผลิตเอทานอล 99.5 wt.% แทนการกลั่นแบบอะซิโโทป [7] แต่อย่างไรก็ตาม การนำกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันไปใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมยังมีจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเมมเบรนแบบอื่นๆ เช่น ออสโมซิสแบบผันกลับ (reverse osmosis) อัลตราฟิลเตรชัน (ultra filtration) ไมโครฟิลเตรชัน (micro filtration) ในขณะที่กระบวนการเมมเบรนแบบอื่นได้รับการพัฒนาจนถึงขั้นเป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือมีเมมเบรนทางการค้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาถูก รวมทั้งมีเมมเบรนหลากหลายชนิดที่สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารละลายที่ต้องการแยก แต่สำหรับกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันยังมีจำกัดเกี่ยวกับชนิดของเมมเบรน กล่าวคือเมมเบรนที่ผลิตในทางการค้ายังมีไม่หลากหลายชนิด และมีประสิทธิภาพในการแยกไม่สูงมาก พอจึงพบว่าการวิจัยและประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการนี้ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา นักวิจัยหลายท่านจะเน้นการพัฒนาเมมเบรนสังเคราะห์ให้มีทั้งสมรรถนะในการแยกและค่าฟลักซ์ที่สูงขึ้นสำหรับสารละลายต่างๆ และมีการศึกษาการถ่ายเทมวลสารเพื่อให้เข้าใจกลไกของกระบวนการที่ชัดเจนขึ้น โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาการแยกน้ำออกจากสารละลายแอลกอฮอล์โดยใช้เมมเบรนชนิด polyvinyl alcohol [8] เมมเบรนเชิงประกอบ PVA/PAA (Vauclair et al., 1997) [9] cellulose acetate (Seok et al., 1987) [10] polyimide (Kim et al., 2000) [11] faujasite-type zeolite membranes (K.Kusakabe et al., 1998) [12] โดยเมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแบบแผ่นและแบบท่อม้วน แต่ในปัจจุบันเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการใช้สารอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ ซีโอไลต์ โลหะ และเซรามิก เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสารอินทรีย์

ซีโอไลต์เมมเบรนถูกนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการอุตสาหกรรมสำคัญๆ มากมาย เนื่องจากเมมเบรนซีโอไลต์มีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น (semi-permeable/permselective membrane) [13-16] เมมเบรนที่นำไปใช้ในกระบวนการแยกต้องมีความยืดหยุ่นและที่บ ซึ่งนี้เป็นผลมาจากวิธีการและสถานะในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีการพัฒนาปรับปรุงให้เมมเบรนมีคุณภาพที่ดีขึ้น [17-26] เมมเบรนซีโอไลต์เอมีโครงสร้างของรูพรุนเป็นแบบ 3 ทิศทาง (3-Dimensional) ซึ่งรูพรุนมีแนวเป็นเส้นตรงตลอดทั้งแนวแกน x, y และ z มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่แน่นอน ซึ่งรูพรุน ช่องว่าง หรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติมีขนาด 4.2 อังสตรอม ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวเมมเบรนซีโอไลต์เอจึงเหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับแยกโมเลกุลของสารที่มีขนาดเล็กๆ เช่น โมเลกุลของเอทานอล และ โมเลกุลของน้ำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนเพื่อแยกเอทานอล-น้ำ พร้อมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการเตรียมซึ่งได้แก่ เวลาที่ใช้ในการตกผลึกและอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ โดยกระบวนการเพอร์เวปพอร์ชันซึ่งได้แก่ ความหนาของชั้นเมมเบรน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายป้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนเพื่อแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอ
2. ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดย โมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเป็น 1.038, 1.189, 1.229 และ 1.319 ต่อการตกผลึก โครงสร้างซีโอไลต์ชนิดเอ
3. ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการตกผลึกเป็น 2, 4, 6, 8 และ 12 ชั่วโมง ต่อการตกผลึก โครงสร้างซีโอไลต์ชนิดเอ
4. ศึกษาการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอลงบนตัวรองรับอะลูมินาโดยวิธีการดูดสารละลาย ซีโอไลต์ชนิดเอผ่านผิวตัวรองรับอะลูมินาด้วยปั๊มสุญญากาศ
5. ศึกษาอิทธิพลของความหนาของชั้นเมมเบรนที่เตรียมจากปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอ น้ำหนัก 96, 241 และ 482 กรัมต่อตารางเมตร ต่อการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ
6. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิสารละลายป้อนที่ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ต่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนเป็น 80, 85, 90 และ 95 wt.% ต่อการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ทราบถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอ เช่น อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา และเวลาที่ใช้ในการตกผลึก
2. สามารถผลิตเมมเบรนเชิงประกอบได้เอง พร้อมทั้งเรียนรู้เทคนิคในการเคลือบซีโอไลต์เอลงบนผิวของตัวรองรับ และสามารถถ่ายทอดแนวทางการผลิตเมมเบรนเชิงประกอบให้กับผู้สนใจ
3. ทราบถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแยกเอทานอล-น้ำโดยวิธีเพอร์เวปอเรชัน เช่น ความหนาของเมมเบรน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายป้อน
4. สามารถพัฒนาศักยภาพของเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอให้มีประสิทธิภาพในแง่ของฟลักซ์และความสามารถในการแยกโมเลกุลของสารให้ดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

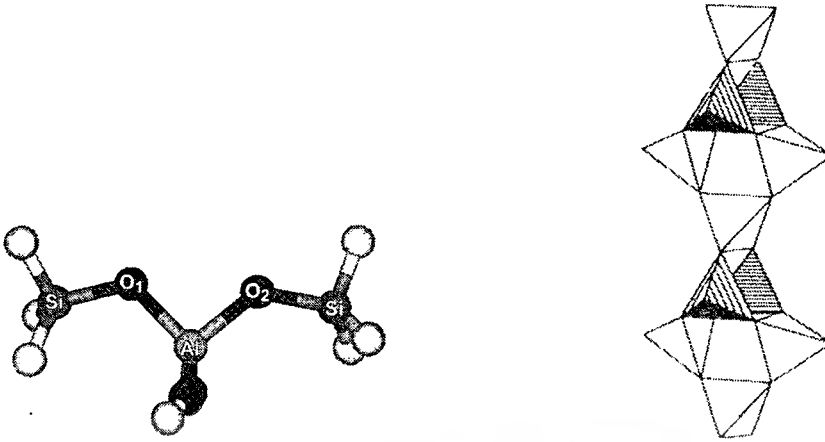
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) แสดงในรูปที่ 2.1 ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถดัดให้เคี้ยวกระเหยออกไปได้ ทำให้เป็นที่มาของชื่อ ซีโอไลต์ ซีโอไลต์นั้นอาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของแร่ธาตุจะเห็นได้จากมีการทำเป็นเหมือนซีโอไลต์ในพื้นที่หลายแห่งของโลก หรืออาจสังเคราะห์ขึ้นได้โดยกระบวนการทางเคมี เพื่อประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีโอไลต์เองด้วย [27]

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา เราสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ในรูปที่ปรากฏในธรรมชาติและรูปแบบใหม่มากมาย สมบัติเด่นของซีโอไลต์คือความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและการเลือกดูดซับโมเลกุลของสารบางชนิดขึ้นกับ ขนาด หรือรูปร่างของโมเลกุลของสารนั้น ซีโอไลต์บางชนิดโดยเฉพาะที่สังเคราะห์ขึ้นมายังมีสมบัติในการคัดแยก (Selectivity) สูง สามารถเลือกดูดซับสารที่มีโครงสร้างแตกต่างกันได้ เช่น การแยกพาราไซลีนจากของผสมไอโซเมอร์ของไซลีน โดยใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 [28] และพบว่าซีโอไลต์เป็นของแข็งที่มีฤทธิ์เป็นกรดเช่นเดียวกับกรดซัลฟิวริกหรืออะลูมินัมคลอไรด์ ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ปฏิกิริยาการแตกตัว ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันของโอเลฟินพาราฟิน และสารอะโรมาติก รวมทั้งปฏิกิริยาแอลคิลเลชันของสารอะโรมาติกและพาราฟิน เป็นต้น โดยมีการออกแบบซีโอไลต์สำหรับใช้ในหลายอุตสาหกรรม ซึ่งซีโอไลต์มีระบบรูพรุนและมีพื้นที่ผิวมาก [29]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทรงสี่หน้า SiO_4 และ AlO_4 ที่ถูกเชื่อมต่อกันของซีโอไลต์ Natrolite [28]

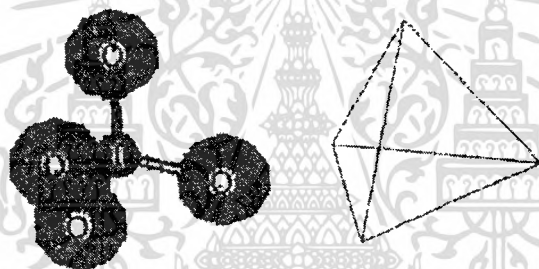
2.1.1 แหล่งกำเนิดของซีโอไลต์

โดยทั่วไปแล้วซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติจาก 2 แนวทางใหญ่ คือ แนวทางแรกซีโอไลต์สามารถเกิดในสถานะที่มีอุณหภูมิต่ำมาก (ต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส) ซีโอไลต์ธรรมชาติทุกชนิดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบจำพวกอะลูมิโนซิลิเกตที่ละลายน้ำได้ได้ผิวโลกผ่านกระบวนการตกผลึก (Crystallization) ภายใต้ความร้อนและความดันอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของชั้นเปลือกโลกโดยมีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดโครงสร้างของซีโอไลต์ร่วมอยู่ด้วย กระบวนการการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ อาจยาวนานถึง 1-10 ล้านปี ขึ้นกับความเหมาะสมของความดัน อุณหภูมิ และชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น สถานะที่ก่อให้เกิดการตกผลึกซึ่งมีน้ำ ความร้อน และความดันนี้ เราเรียกว่า การตกผลึกแบบไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal Crystallization) [28]

กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์แบบดั้งเดิม ซึ่งพัฒนามาจากการศึกษาสถานะที่เกิดซีโอไลต์ในธรรมชาติ โดยใช้สารละลายเบสเป็นตัวกลางเท่านั้น ซึ่ง Barrer เป็นผู้ที่มิบทบาทสำคัญในยุคแรก (ในปี ค.ศ. 1950) ที่เริ่มจำลองสถานะดังกล่าวเพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อนเป็นจำนวนมาก โดยที่เราสามารถเลือกชนิดและองค์ประกอบ ตลอดจนนอกแบบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ต้องการได้ โดยการควบคุมชนิดและสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบของสารตั้งต้น รวมทั้งอุณหภูมิและความดันที่เพิ่มขึ้นเองเมื่อให้ความร้อนในระบบปิด (Autogeneous pressure) [28]

2.1.2 โครงสร้างของซีโอไลต์

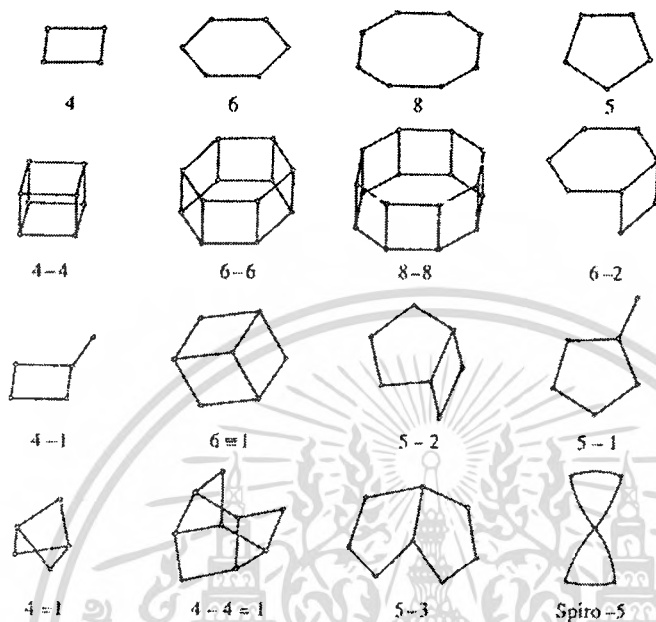
ซีโอไลต์ทั้งที่เกิดตามธรรมชาติและจากการสังเคราะห์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicates) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้าง มีโครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจนสี่อะตอม ($[\text{SiO}_4]^{4-}$ และ $[\text{AlO}_4]^{5-}$) เรียกส่วนโครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกอนและอะลูมิเนียมว่า หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Building Units) ซึ่งอะตอมของโลหะที่เป็นโครงสร้างหลักนี้รวมเรียกว่า T อะตอม (T= Si หรือ Al) แสดงดังรูปที่ 2.2 [30] เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติ ขนาดของซีโอไลต์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดไอออนบวกภายในโครงสร้างและธรรมชาติของการปรับสภาพ เช่น การเผา การชะล้าง และการปรับสภาพทางเคมีอื่นๆ กว่า 30 ปีที่ซีโอไลต์มีความน่าสนใจโดยใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากซีโอไลต์มีความว่องไวสูง มีความสามารถในการคัดเลือกสารให้ผ่านเข้าออกได้ มีโครงสร้างที่มีรูพรุน อีกทั้งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน [30]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้า (TO_4 , T = Si or Al) [30]

โครงสร้างขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจนของซิลิกาหรืออะลูมินานี้ เรียกว่า โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units, SBUs) โดยมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างปฐมภูมิอย่างเป็นรูปแบบและมีลักษณะเฉพาะตัว หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิหลักๆ ที่ประกอบเป็นโครงสร้างซีโอไลต์มีด้วยกัน 12 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.3 [28] ประกอบด้วยการรวมกลุ่มของโครงสร้างเรขาคณิตของทรงเหลี่ยมสี่หน้า ที่สามารถอธิบายโครงสร้างของซีโอไลต์ที่เป็นที่รู้จัก เช่น วงแหวนประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 4 (S4R), 6 (S6R) และ 8 (S8R) อะตอม หรือวงแหวนประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนแบบคู่ 4-4 (D6R) และ 8-8 (D8R) โดยทั่วไปโครงสร้างของซีโอไลต์ส่วนใหญ่เกิดจากหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิที่แตกต่างกันหลายหน่วยรวมกัน แต่ซีโอไลต์บางชนิดเกิดจากหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิเพียงหน่วยเดียว เช่น ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 และ Ferrierite มีหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิแบบ 5-1 สำหรับ Offretite ซีโอไลต์ L และ Erionite มีหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิที่ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 6 อะตอม โครงสร้างของซีโอไลต์บางชนิดประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิหลายหน่วย เช่น Sodalite, แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Faujasite (ชนิด X หรือ Y) และ ซีโอไลต์ A มีหน่วยการสร้างประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 6 หรือ 4 อะตอม แต่ซีโอไลต์ A ยังมีหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิที่ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนแบบคู่ 4 อะตอม (4-4) ซึ่ง Faujasite ไม่มีโครงสร้างแบบนี้ ตัวอย่างของหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 [30]



รูปที่ 2.3 หน่วย โครงสร้างทุติยภูมิ (SBUs) ใน โครงสร้างของซีโอไลต์ [28]

ตารางที่ 2.1 ซีโอไลต์ชนิดต่างๆและหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ [10]

ซีโอไลต์	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ								
	4	6	8	4-4	6-6	8-8	4-1	5-1	4-4-1
Bikilaite	X	X	X	X	X			X	
Li-A (BW)	X	X							
Analcime	X		X						
Yagawaralite								X	
Episibite								X	
ZSM-5								X	
ZSM-11								X	
Ferrierite								X	
Dachiardite								X	
Brewsterite	X								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 [ต่อ]

ซีโอไลต์	หน่วยโครงสร้างทุดียกภูมิ								
	4	6	8	4-4	6-6	8-8	4-1	5-1	4-4-1
Sodalite	X	X							
Henulandite									X
Stibite									X
Natrolite								X	
Thomsonite								X	
Edingtonite								X	
Cancrinite		X							
Zeolite L		X							
Mazzite	X								
Merlinoite	X		X			X			
Phillipsite	X		X						
Zeolite Losod		X							
Erionite	X	X							
Offretite		X							
TMA-E (AB)	X	X							
Gismondine	X		X						
Levyne		X							
ZK-5	X	X	X		X				
Chabazite	X	X			X				
Gmelinite	X	X	X		X				
Rho	X	X	X				X		
Type A	X	X	X	X					
Faujasite	X	X			X				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน

ซีโอไลต์ที่เป็นที่รู้จักที่เกิดตามธรรมชาติมีมากกว่า 40 ชนิด และมากกว่า 150 ชนิดที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น [31] สำหรับชนิดของซีโอไลต์ที่ถูกสังเคราะห์นั้นสามารถจำแนกตามขนาดของรูเปิด (pore opening) ได้ 5 ประเภท คือ วงแหวนแบบที่มีอะตอมออกซิเจนล้อมรอบ 8 อะตอม (8-membered oxygen rings) เป็นรูพรุนขนาดเล็ก, 10 อะตอม (10-membered oxygen rings) เป็นรูพรุนขนาดกลาง และ 12 อะตอม (12-membered oxygen rings) เป็นรูพรุนขนาดใหญ่ รูพรุนแบบสองทาง (dual pore) และรูพรุนแบบเมโซ (mesopore) [32] ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์แบ่งตามประเภทรูพรุน แสดงดังตารางที่ 2.2 [32]

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ [31]

รหัส IUPAC	ระบบรู	จำนวนวง	ขนาดของรู, Å
1. ระบบที่มีรูพรุนขนาดเล็ก			
CHA	Chabazite	8	3.8 x 3.8
RHO	RHO	8	3.6
KFI	ZK-5	8	3.9
ERI	Erionite	8	3.6 x 3.5
	ZSM-34	8	
LTA	Linde Type A (ZK-4)	8	4.1
2. ระบบที่มีรูพรุนขนาดปานกลาง			
PAR	Partheite	10	3.5 x 6.9
LAU	Laumontite	10	4.0 x 5.3
AEL	SAPO-11	10	3.9 x 6.3
ON	Theta-1 (ZSM-22)	10	4.4 x 5.5
MTT	ZSM-23	10	4.5 x 5.2
	ZSM-48	10	5.3 x 5.6
EUO	ZSM-50 (EU-1)	10	4.1 x 5.7
NES	NU-87	10	4.7 x 6.0
MFI	ZSM-50 (EU-1)	10	5.3 x 5.6
			5.1 x 5.5
MEL	ZSM-11	10	5.3 x 5.4
3. ระบบที่มีรูพรุนแบบสองทาง			
FER	Ferrierite	10	4.2 x 5.4
	(ZSM-35, FU-9)		

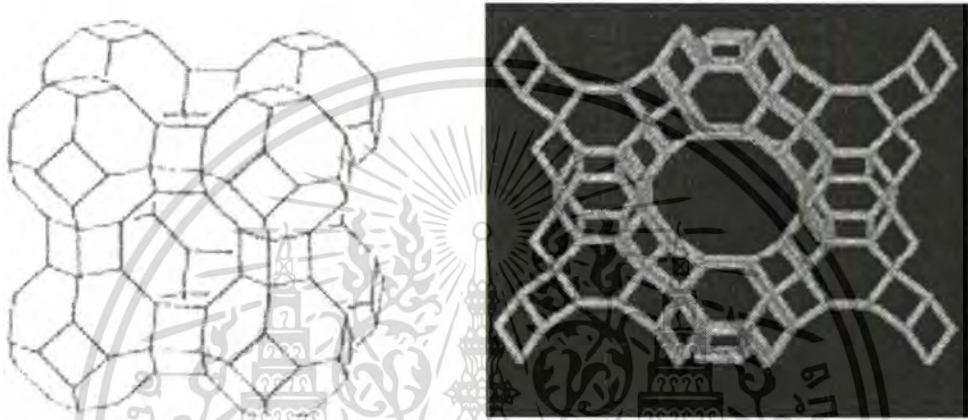
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ 3.5 x 4.8 ระบุข้อมูลด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 [ต่อ]

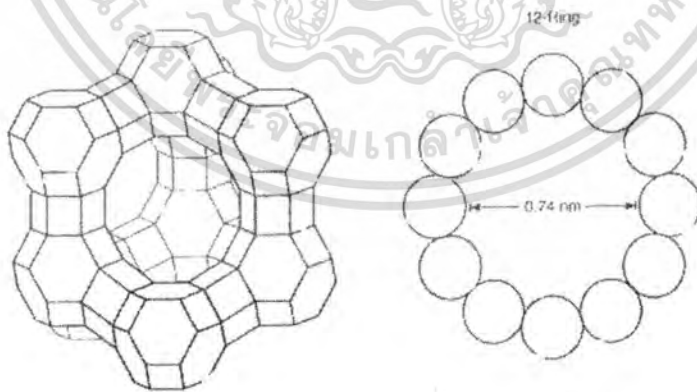
รหัส IUPAC	ระบบรู	จำนวนวง	ขนาดของรู, Å
HEU	Heulandite/Clinoptilolite	10, 8	3.0 x 7.6
			3.3 x 4.6
		8	2.6 x 4.7
MFS	ZSM-57	10	5.1 x 5.4
		8	3.3 x 4.8
STI	Stilite	10	4.9 x 6.1
		8	2.7 x 5.6
OFF	Offretite	12	6.7
		8	3.6 x 4.9
MOR	Mordenite	12	6.5 x 7.0
		8	2.6 x 5.7
GME	Gmelinite	12	7
		8	3.6 x 3.9
MAZ	Mazzite (ZSM-4)	12, 8	7.4, 3.4 x 5.6
		12	7.1
		10	elliptical
BOG	Boggsite	12, 10	7, 5.2 x 5.8
		12, 10	
		12, 10	
4. ระบบที่มีรูพรุนขนาดใหญ่			
MTW	ZSM-12	12	5.5 x 5.9
BEA	Beta	12	7.6 x 6.4
			5.5 x 5.5
LTL	Linde Type L	12	7.1
EMT	EMC-2	12	7.1
		12	7.4 x 6.5
FAU	Faujasite	12	7.4
		12	7.4
5. ระบบที่มีรูพรุนแบบเมโซ			
VFI	VPI-5	18	12.1
	M4I-S		16 to 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบางปฏิกิริยาก็ต้องการซีโอไลต์ที่มีโมเลกุลที่มีขนาดของรูเปิดใหญ่ขึ้น (large-pore opening) เป็นซีโอไลต์ที่ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 8 หรือ 12 อะตอม เช่น ซีโอไลต์ชนิด A แสดงดังรูปที่ 2.4 ซีโอไลต์ Faujasite (ชนิด X หรือ Y) แสดงดังรูปที่ 2.5 [33] ที่มีรูเปิดขนาดใหญ่กว่า 5.5 Å ซึ่งมีประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาการเปลี่ยนของไตรเมทิลเบนซีน (trimethylbenzene) และสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้เกลืออนินทรีย์ (inorganic salts) และถูกใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในปฏิกิริยาการแตกตัว โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดบีต้า ZSM-12 แสดงดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ[32]

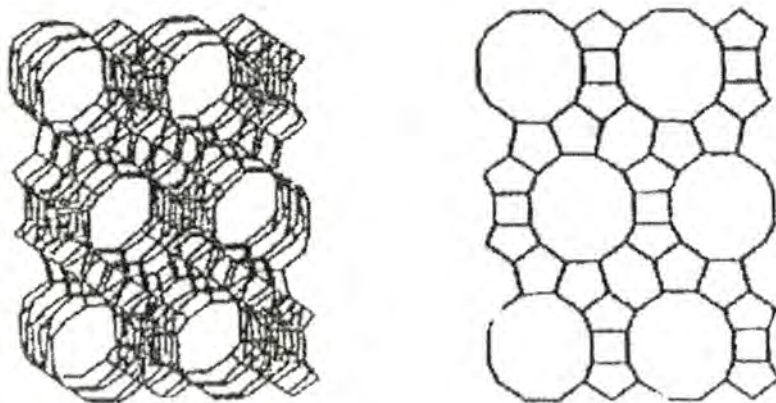


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด A [31]

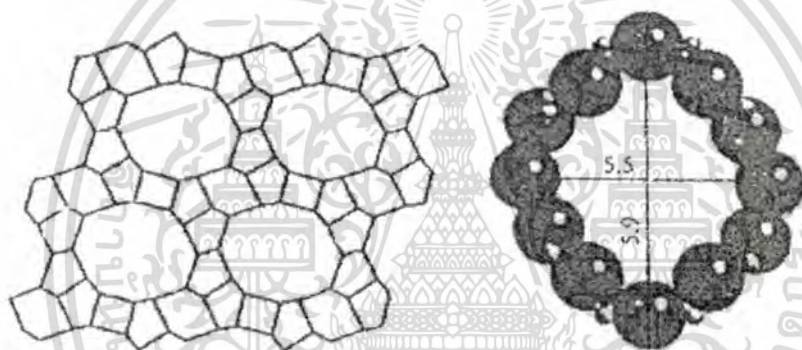


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด Faujasite [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



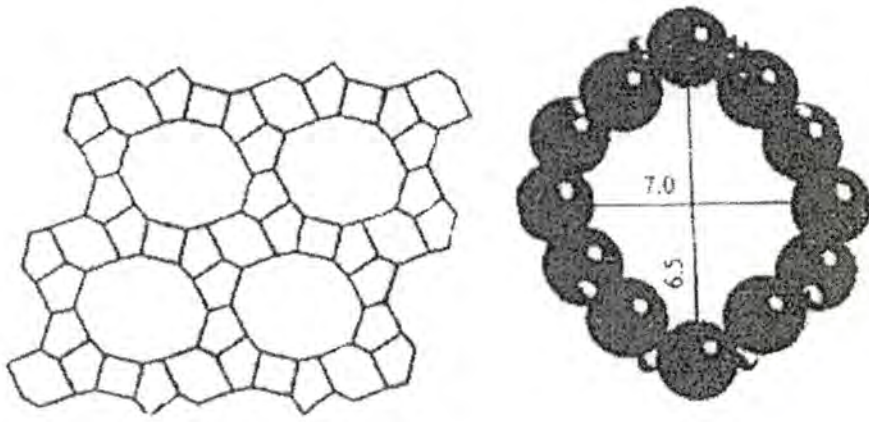
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดบีต้า [31]



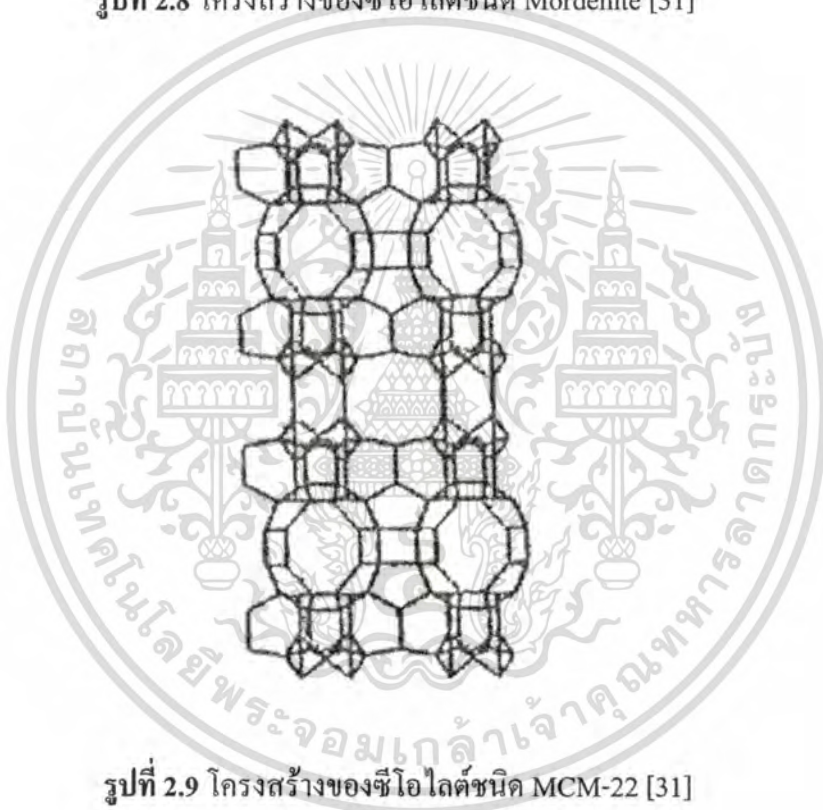
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-12 [31]

สำหรับซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่แบบสองทางประกอบด้วยรูเปิดที่มีขนาดต่างกันสองรู ตัวอย่างเช่น Mordenite มีรูพรุนขนาดใหญ่แบบสองทาง โดยมีโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 12 อะตอม มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $6.5 \times 7.0 \text{ \AA}$ แสดงดังรูปที่ 2.8 [31] เชื่อมต่อกับวงแหวนที่ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 8 อะตอม มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ $2.6 \times 5.7 \text{ \AA}$ ซีโอไลต์ชนิด MCM-22 มีระบบรูพรุนขนาดใหญ่แบบสองทาง เช่นเดียวกัน โดยมีโครงสร้างวงแหวนประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 10 อะตอม และ 12 อะตอม แสดงดังรูปที่ 2.9 [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด Mordenite [31]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด MCM-22 [31]

2.1.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

ซีโอไลต์สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลของสารประกอบอะลูมิเนียมและซิลิกอนในสารละลายเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ สารประกอบแอมโมเนียม ส่วนใหญ่เกิดปฏิกิริยาในภาชนะที่อัดความดันสูง (autoclave) จนเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์โดยควบคุมทั้งความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณสารสัมพันธ์ของทางเดินปฏิกิริยาที่มีลักษณะแตกต่างกันตามชนิดของซีโอไลต์ที่ต้องการสังเคราะห์ [32] ดังรูปที่ 2.10 [28] แสดงแผนผังของการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เริ่มจากการกำหนดองค์ประกอบของเจลให้เหมาะสมกับแหล่งวัตถุดิบ ซึ่งแหล่งของซิลิกามีทั้งจากธรรมชาติ เช่น แร่ดินขาว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

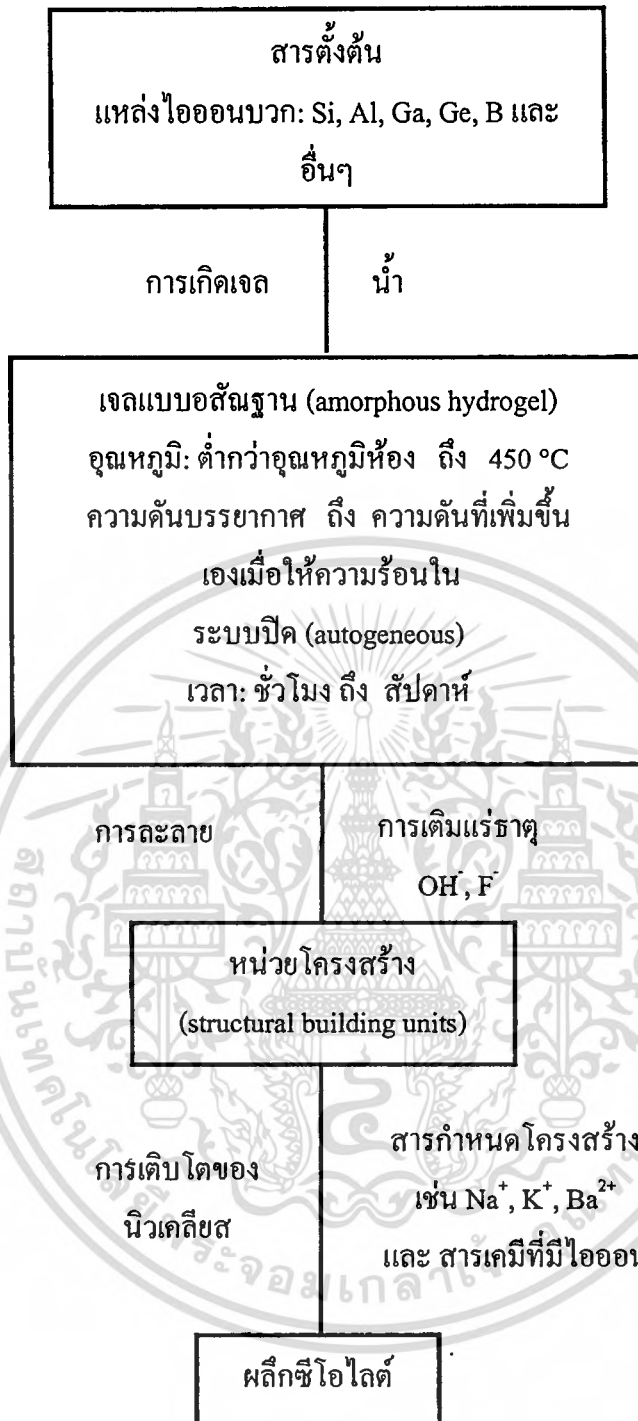
(kaolinite) แก้วของภูเขาไฟ แกลบ และหินบะซอลต์ (nepheline) แต่ในทางอุตสาหกรรมจะใช้ซิลิกาที่ว่องไว (active silica) เช่น ผงซิลิกา ซิลิกาที่มีน้ำรวมอยู่ด้วย หรือ ซิลิกาในรูปของสารละลาย [28]

แหล่งของอะลูมิเนียมมีมากมาย เช่น เส้นลวดอะลูมิเนียม โลหะอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมอัลลอยด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมอะลูมิเนตหรืออะลูมิเนียมฟอสเฟต จากแผนผังสารตั้งต้นถูกผสมในตุ๊กกลางที่มีไฮดรอกไซด์ไอออน ได้สารละลายมีลักษณะคล้ายเจล ที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งในช่วงการตกผลึก สำหรับสารกำหนดโครงสร้างแสดงตัวอย่างดังตารางที่ 2.3 [30]

ตารางที่ 2.3 สารเคมีอินทรีย์กำหนดโครงสร้าง [30]

MFI	FER	AFI
TPA	Choline	TEAOH
TEA	Ethylenediamine	TPAOH
Ethanolamine	Piperidine	Choline hydroxide
Glycerol	1,3-Diaminopropane	Cyclohexylamine
Propylamine		2-Picoline
1,6-Diaminohexane		3-Picoline
Pentaerythritol		4-Picoline
Hexanediol		DABCO
Morpholine		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แผนผังลำดับขั้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ [28]

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการตกผลึกโครงสร้างของซีโอไลต์มี 3 ประการ คือ องค์ประกอบทั้งหมดในของผสมที่ใช้ทำปฏิกิริยา อุณหภูมิและเวลา แสดงดังตารางที่ 2.4 [30] โดยทั่วไป ซีโอไลต์จะไม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส ยกเว้นซีโอไลต์ที่ใช้อุณหภูมิสูงในการสังเคราะห์ เช่น Analcime ใช้อุณหภูมิ 366 องศาเซลเซียส Clinoptilolite ใช้อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส Ferrierite ใช้อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และ Mordenite ใช้อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิสังเคราะห์ที่สูงเกินไปจะเกิดเฟสของเหลวมากขึ้น ซีโอไลต์หลายชนิดตกผลึกได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เช่น ซีโอไลต์ A, X และ Y แต่เมื่อใช้เวลาในการตกผลึกนานขึ้น (อาทิตย์จนถึงหลายเดือน) ร่วมกับการใช้อุณหภูมิต่ำจะยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งอุณหภูมิต่ำปานกลาง (120-200 องศาเซลเซียส) จะช่วยกระตุ้นการเกิดผลึกซีโอไลต์ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตกผลึกของซีโอไลต์ [30]

1. องค์ประกอบทั้งหมด

- อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา (SiO_2/Al_2O_3)
- ความเข้มข้นของสารละลายเบส
- สารเคมีกำหนดโครงสร้างอนินทรีย์และอินทรีย์
- ปริมาณน้ำ

2. เวลา

3. อุณหภูมิ

- ในช่วงอุณหภูมิห้อง ประมาณ 25-60 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิต่ำ ประมาณ 90-120 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิปานกลาง ประมาณ 120-200 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิสูง ประมาณ 250 องศาเซลเซียสขึ้นไป

4. การปั่นกววนและลำดับของการผสม

สำหรับอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) ของเจลที่ใช้ในการสังเคราะห์ เป็นปัจจัยที่กำหนดความเป็นไปได้ของโครงสร้างที่จะตกผลึกได้ ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำตกผลึกได้เร็วกว่าซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูง และเมื่อมีปริมาณอะลูมิเนียมมากขึ้นจะตกผลึกได้เร็วขึ้น อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่สูงช่วยให้ซีโอไลต์ทนทานต่อการรูด ความร้อน และมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งลดแรงดึงดูดตัวดูดซับมีขั้วและลดปริมาณไอออนบวก เมื่อลดอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาทำให้เพิ่มความชอบน้ำและสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน [34, 35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูล และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การก่อผลึกของซีโอไลต์จำเป็นต้องมีตัวกลางเพื่อให้สารพวกอะลูมิโนซิลิเกตเกิดการจัดเรียงตัวได้ และเนื่องจากอะลูมินาและซิลิกาสามารถละลายได้ในสารละลายเบส ซึ่งความเป็นเบสจะควบคุมการก่อผลึกของซีโอไลต์ โดยหากความเป็นเบสสูงเกินไปจะทำให้ซิลิกาละลายมากเกินไปจนอาจไม่สามารถเกิดการก่อผลึกได้ ซีโอไลต์ชนิดหนึ่งๆ จะมีช่วงอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมและความเป็นเบสที่เหมาะสมต่างกัน การใช้เบสที่มีความเข้มข้นเท่ากันในกรณีที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่างกัน อาจทำให้เกิดโครงสร้างซีโอไลต์ที่แตกต่างกัน หรือหากอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่ใช้อยู่ในช่วงที่สามารถทำให้ได้โครงสร้างเดียวกันได้ อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของผลึกที่ได้ย่อมแตกต่างกันไปด้วย และหากใช้อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมค่าหนึ่งเพื่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์แต่ใช้เบสแตกต่างกันอาจได้โครงสร้างเดียวกันหรืออาจเกิดการก่อผลึกเป็นโครงสร้างอื่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเป็นเบสของสารละลาย การที่ pH ของสารละลายสูงขึ้นจะทำให้อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของผลึกที่สังเคราะห์ได้ต่ำลงด้วย เนื่องจากซิลิกาละลายได้ดีที่ pH สูง [30, 36]

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จำเป็นต้องมีสารเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงตัวของผลึก โดยสารที่ทำหน้าที่นี้เรียกว่า สารกำหนดโครงสร้าง (Template หรือ Structure directing template) สามารถแบ่งกำหนดโครงสร้างได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์ (Organic template) และสารกำหนดโครงสร้างอนินทรีย์ (Inorganic template) จากการศึกษพบว่า สารกำหนดโครงสร้างอนินทรีย์มีความสำคัญอย่างมากต่อการสังเคราะห์ ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ (< 3) ซึ่งซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติโดยทั่วไปจะมีไอออนของโลหะหมู่ I และ II เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบซึ่ง ไอออนของโลหะเหล่านี้ เป็นตัวที่ก่อให้เกิดโครงสร้างทุติยภูมิและเกิดเป็น โครงสร้างของซีโอไลต์ขึ้น เนื่องจากไอออนบวกจะเกิดอันตรกิริยากับสารพวกอะลูมิเนตในสารละลายก่อให้เกิด โครงสร้างที่แตกต่างกันไป สำหรับสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์เริ่มมีบทบาทสำคัญ เมื่อมีความพยายามที่จะสังเคราะห์ซีโอไลต์ให้มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงขึ้นกว่าซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติ และมีความแรงของเบสสูงกว่าสารกำหนดโครงสร้างอนินทรีย์ซึ่งทำให้ซิลิกาละลายตัวรวมกับอะลูมินาได้ดีโดยไม่ทำให้สารละลายซิลิเกตเสถียรเกินไปจนซิลิเกตไม่อยู่ในรูปสารละลายคอลลอยด์ หรือไม่เกิดการตกผลึกเลย โดยทั่วไปสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์จะช่วยในการเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อผลึก ควบคุมการเกิดโครงสร้าง ขนาดของรูพรุน และรูปร่างของผลึกของซีโอไลต์ โดยการก่อผลึกจะเกิดผ่านการจัดเรียงตัวของสารพวกอะลูมิโนซิลิเกตล้อมรอบสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์ การใช้สารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์ที่ต่างกันจะทำให้เกิด โครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่น TBP⁺ (tetrabutylphosphonium), TMA⁺ (tetramethylammonium), TEA⁺ (tetraethylammonium) และ TPA⁺ (tetrapropylammonium) เป็นต้น [30, 37, 38]

อุณหภูมิในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เป็นปัจจัยสำคัญทั้งอัตราการตกผลึกและโครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำเป็นตัวกลางในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ อุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลต่อความหนืดที่ลดลง รวมทั้งทำให้ความดันของถังปฏิกรณ์ในการสังเคราะห์สูงขึ้นด้วย โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้ความดันในระบบสูงมากและเกิดการจัดเรียงตัวของสารพวกอะลูมิโนซิลิเกตที่หนาแน่น ไม่เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำสามารถเกิดการตกผลึกได้ดี ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสังเคราะห์ (70-110 องศาเซลเซียส) ขณะที่ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงจะต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า (100-180 องศาเซลเซียส) จึงสามารถเกิดการตกผลึกได้ ส่วนเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์จะเป็นตัวกำหนดความสมบูรณ์ของการเกิดผลึก เมื่อใช้เวลานานเกินไป การสลายตัวของผลึกเก่าและเกิดการก่อผลึกของซีโอไลต์ชนิดใหม่ [30]

2.1.6 ความเป็นกรดของซีโอไลต์

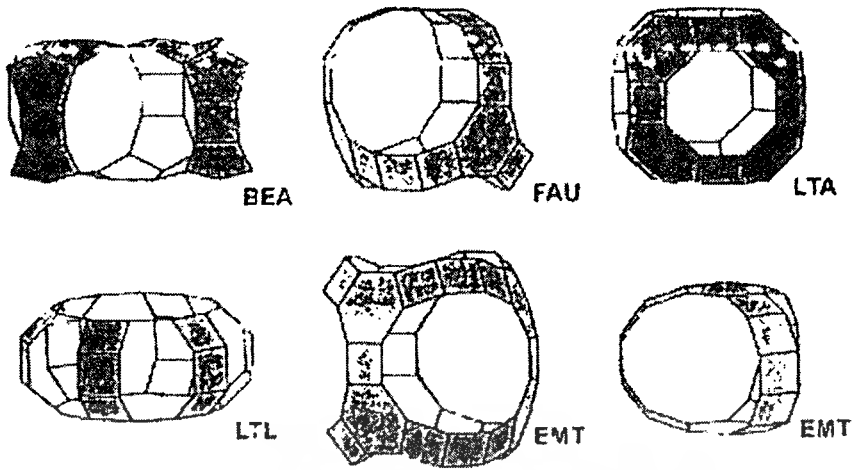
ความว่องไว (Activity) และค่าการเลือกเกิดของโมเลกุลซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอธิบายด้วยจุดกัมมันต์ (Active site) ที่เกิดความไม่สมดุลของประจุระหว่างไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมภายในโครงสร้าง อะตอมอะลูมิเนียมแต่ละตัวที่อยู่ภายในโครงสร้างก่อให้เกิดจุดกัมมันต์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด (Active acid site) [28] ซึ่งมีสองแบบคือ ความเป็นกรดแบบบรอนสเตด (Bronsted) มีความสามารถในการให้โปรตอน และความเป็นกรดแบบลิวอิส (Lewis) มีความสามารถรับอิเล็กตรอน เนื่องจากมีการเชื่อมต่อกันของอะตอมอะลูมินาและขาดอิเล็กตรอน ทำให้มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ [33] ซีโอไลต์ที่มีซิลิกามากในรูปของ as-synthesized จะมีไอออนบวกของสารกลุ่มเอมีนและสารอนินทรีย์ โดยไอออนบวกของแอลคาไลส่วนใหญ่ (Na) เมื่อซีโอไลต์ในรูป as-synthesized ถูกเผาในสภาวะที่มีอากาศจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอออนบวกของสารอินทรีย์กลุ่มเอมีนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ZSM-5 ในรูป as-synthesized หลังจากเผาแล้วไอออนบวกของ TPA จะถูกขจัดออก และมีไอออนบวกของโซเดียมเหลืออยู่ร้อยละ 83 ซึ่งภายหลังจะถูกขจัดออกด้วยการแลกเปลี่ยน ไอออนเกิดการขจัด โปรตอนอย่างสมบูรณ์ การแลกเปลี่ยนไอออนจะใช้สารละลายเกลือแอมโมเนียมเกิดเป็นแอมโมเนียมไอออน เมื่อนำไปเผาจะได้ซีโอไลต์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมินา จะส่งผลให้ซีโอไลต์มีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น ตารางที่ 2.5 [33] แสดงความแรงของกรดตามอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมินา [33]

ตารางที่ 2.5 การแบ่งชนิดของกรดตามอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา [33]

อัตราส่วนของ Si/Al	ซีโอไลต์	สมบัติความเป็นกรด/เบส
ต่ำ (1-1.5)	A, X	มีความเสถียรค่อนข้างต่ำ; มีความเสถียรต่ำในกรด; มีความเสถียรสูงในเบส; หมู่ของกรดที่มีความแรงปานกลางจะมีความเข้มข้นสูง
ปานกลาง (2-5)	Erionite Chabazite Chinoptilolite Mordenite Y	
สูง (10 ถึง ∞)	ZSM-5; Dealuminated Erionite, Mordenite, Y	มีความเสถียรค่อนข้างสูง; มีความเสถียรสูงในกรด; มีความเสถียรต่ำในเบส; หมู่ของกรดที่มีความแรงมากจะมีความเข้มข้นสูง

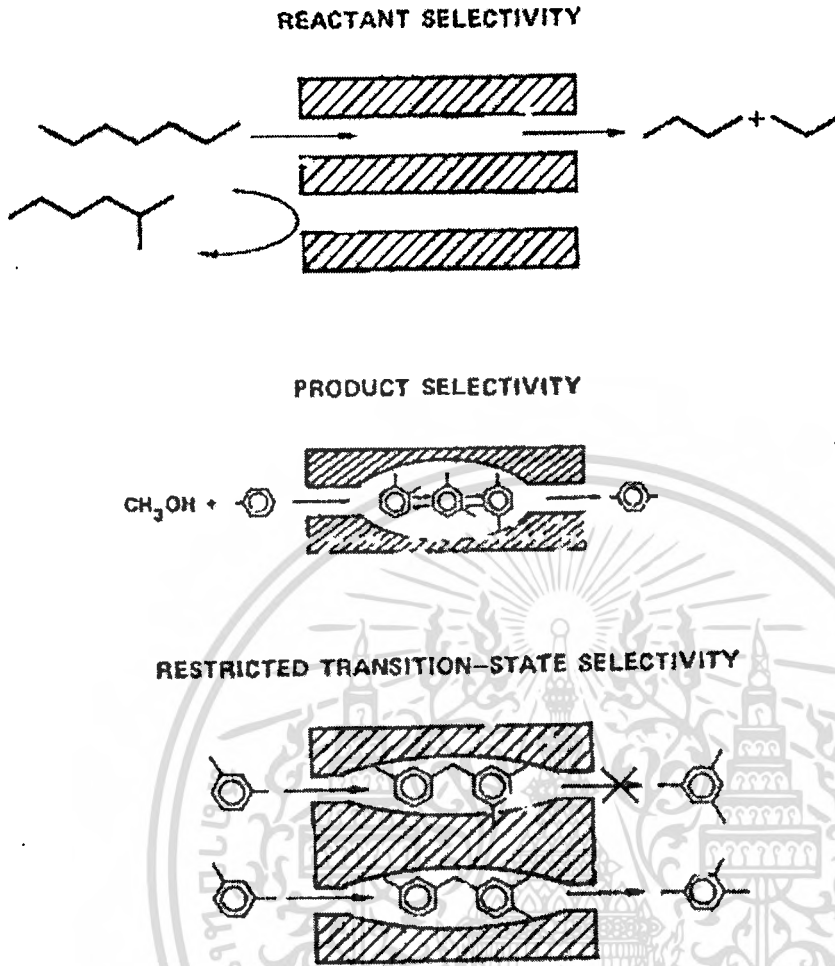
2.1.7 ความสามารถในการเลือกผ่านของซีโอไลต์ (shape selectivity)

ซีโอไลต์มีโครงสร้างภายในที่มีรูพรุนทำให้มีความสามารถในการยอมให้สารบางชนิดผ่านเข้าไปได้ สำหรับซีโอไลต์ที่มีวงแบบ 6T (6-membered rings) หรือน้อยกว่านั้น และรูพรุนมีขนาดประมาณ 2 Å ทำให้จำกัดการผ่านเข้าออกของสารบางชนิด ไอออนหรือโมเลกุลอาจถูกค้ำจับภายในโครงสร้างทำให้วงมีขนาดเล็กลง (5-, 4-, and 3-membered rings) สำหรับซีโอไลต์ที่มีวงขนาดใหญ่ จะทำให้ไอออนและโมเลกุลสามารถผ่านเข้าไปภายในโครงสร้างได้ แสดงดังรูปที่ 2.11 [36] แสดงระบบของรูพรุนของซีโอไลต์บางชนิด [37]



รูปที่ 2.11 รูปแบบของรูพรุนของซีโอไลต์บางชนิด [37]

การเลือกให้สารบางชนิดผ่านนั้นขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับรูพรุน สามารถแยกความแตกต่างในการเลือกให้ผ่านเป็น 3 แบบ คือ ความสามารถในการเลือกให้สารตั้งต้นผ่าน (reactant selectivity) ความสามารถในการเลือกให้สารผลิตภัณฑ์ผ่าน (product selectivity) และ ความสามารถในการจำกัดการผ่านของสารมัธยันตร์ (restricted transition state selectivity) แสดงดังรูปที่ 2.12 [37]



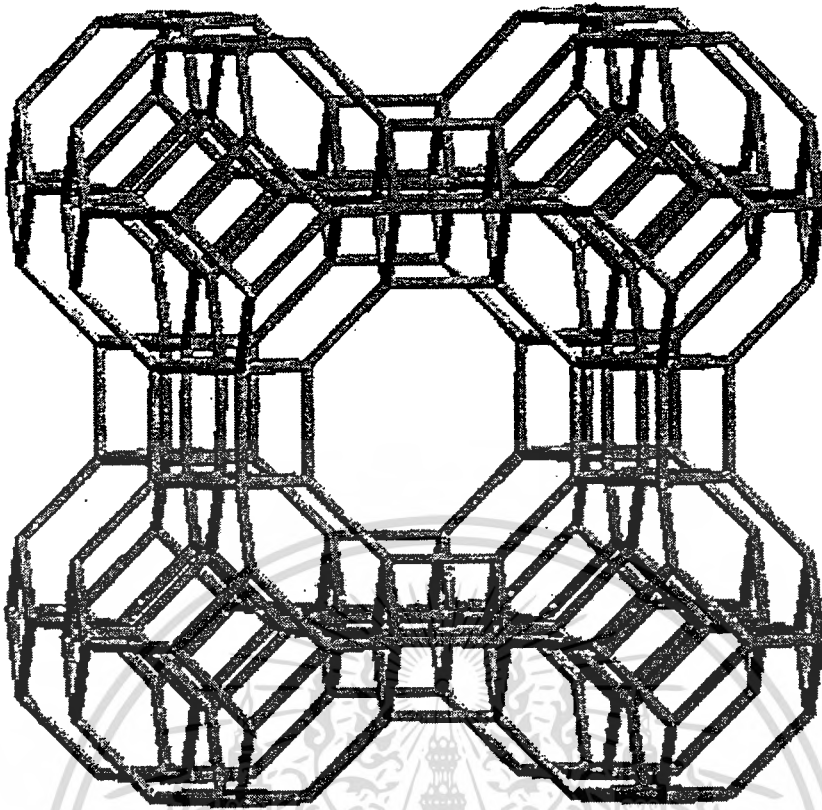
รูปที่ 2.12 ชนิดของปฏิกิริยาการเลือกเกิดที่เป็นผลจาก โครงสร้างซีโอไลต์ [37]

2.1.8 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A)

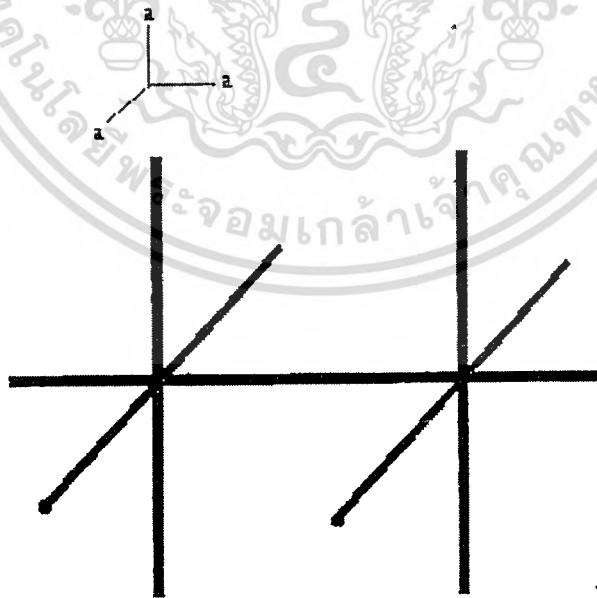
พอลิฮีดรา (Polyhedra) ที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์เอ ได้แก่ โพรงโซดาไลต์ (Sodalite cage) และปริซึมเตทราฮีดรอล (Tetrahedral prisms, D4R) จะเชื่อมโยงกันจนเกิดเป็นช่องว่างหรือโพรง ดังรูปที่ 2.13

ซีโอไลต์เอมีโครงสร้างของรูพรุนเป็นแบบ 3 ทิศทาง (3-Dimensional) ซึ่งรูพรุนมีแนวเป็นเส้นตรงตลอดทั้งแนวแกน x, y และ z แสดงดังรูปที่ 2.14 และมี secondary building units 4, 6, 8 และ 4-4 มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่แน่นอน โดยมีจำนวนของออกซิเจน 8 อะตอม ในวงแหวน (Ring) ที่ต่อกันเป็นทรงสี่หน้า ซึ่งรูพรุน ช่องว่าง หรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติมีขนาด 4.2 อังสตรอม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กสุดภายในรูพรุน ช่องว่าง หรือโพรงที่มีใหญ่เท่ากับ 11.4 อังสตรอม ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็น $\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การเชื่อมโยงของโครงข่ายซิลิกาไลต์และปริซึมเททราฮีดรอล [31]

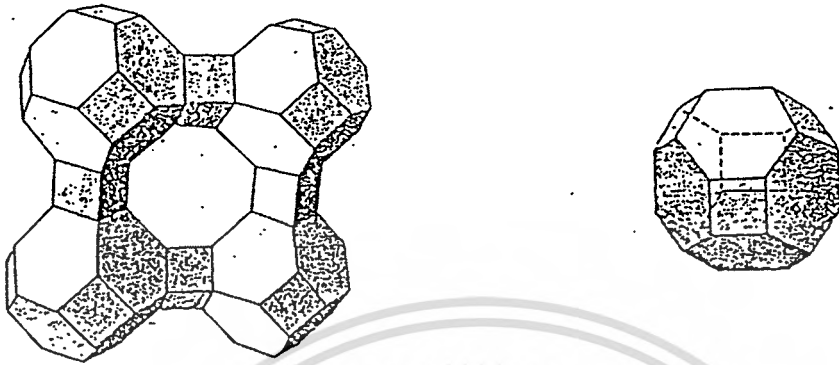


รูปที่ 2.14 ระบบช่องว่างใน 3 มิติของซีโอไลต์เอ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์เอประกอบด้วยรูปทรงหลายเหลี่ยม 2 ชนิด คือ

1. การจับตัวเป็นรูปลูกบาศก์โดย 2 รูปของทรงสี่หน้า หรือ D4R
2. จับตัวกันด้วย 24 รูปของทรงสี่หน้าเป็นรูปทรงกรวยหน้า หรือ ทรงเบต้า ดังรูปที่ 2.15



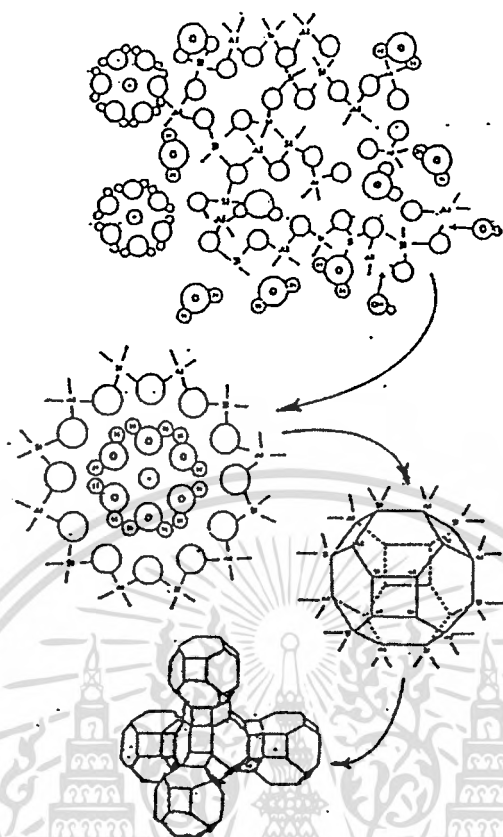
รูปที่ 2.15 การจับตัวเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้า (Truncated octahedron) ในซีโอไลต์เอ [31]

การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ สามารถทำได้โดยสังเคราะห์ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัล โดยการตกผลึกซีโอไลต์จากระบบที่เป็นสารละลายของน้ำ ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมในสภาวะที่มีค่า pH สูง และส่วนประกอบของเจลที่มีความเข้มข้นอิ่มตัวยังยวดยิ่งจะทำให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย

การเตรียมเจลจากสารเริ่มต้นในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะได้ซีโอไลต์ต่างชนิดกันในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอนั้นจะต้องกำหนดระยะเวลาในการตกผลึกและความเข้มข้นของสาร ละลาย NaOH เพราะถ้าทิ้งไว้ให้ตกผลึกนานหรือใช้ NaOH ที่เข้มข้นมากจะทำให้ซีโอไลต์เอเปลี่ยนเป็น ซีโอไลต์พีที่เสถียรกว่า [31, 33]

สำหรับการเกิดผลึกของซีโอไลต์เกิดจากทรงสี่หน้าของซิลิกาและอะลูมินาเชื่อมต่อกันในลักษณะของ Cuboctahedron ซึ่งเรียกว่า Sodalite unit หรือ Truncated octahedron ดังรูปที่ 2.16 โดย Sodalite unit เป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ชนิดนี้ และมีลักษณะของ SUB เป็นแบบ D6R ทำให้โมเลกุลสามารถแทรกผ่านหน่วยนี้ได้ โดยเข้าทางวงแหวนที่ประกอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 อังสตรอม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของปริมาตรช่องว่างซึ่งเป็นทรงกลม 6.2 อังสตรอม โดยโพรงช่องว่างแต่ละอันที่เชื่อมต่อกันนี้ประกอบด้วยไอออนของออกซิเจนจำนวน 6 อะตอม เชื่อมต่อกับด้านหน้าของรูปหกเหลี่ยมของ Sodalite unit จำนวน 2 หน่วยด้วยกัน รูปแบบของออกซิเจนที่มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบนี้เรียกว่า ปริซึมรูปหกเหลี่ยม ส่วนโพรงช่องว่างด้านบนของโครงสร้างจะล้อมรอบด้วย Sodalite unit จำนวน 10 หน่วย ซึ่งมีขนาดโพรงใหญ่มากพอที่จะบรรจุทรงกลมที่เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การเกิดผลึกซีโอไลต์ [31]

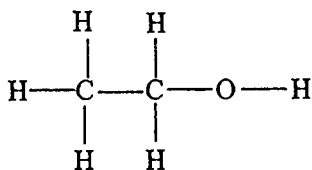
2.2 เอทานอล (Ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นของเหลวใสไม่มีสี ติดไฟง่าย มีกลิ่นเฉพาะตัว สำหรับสารละลายเจือจางจะมีรสหวาน แต่ถ้าสารละลายเข้มข้นจะมีรสขม

2.2.1 องค์ประกอบของเอทานอล

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง ที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เอทานอลมีขนาดโมเลกุล 0.52 นาโนเมตร และจัดเป็นโมเลกุลมีขั้ว จึงสามารถละลายในน้ำได้ โดยในหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วย หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หนึ่งหมู่ แสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล

เอทานอลมีจุดหลอมที่อุณหภูมิ -114 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่ 78.5 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่น 0.789 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เนื่องจากเอทานอลมีจุดเยือกแข็งต่ำ จึงสามารถนำมาใช้เป็นของไหลในเทอร์โมมิเตอร์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลายดี ยา และแลคเกอร์ ใช้เช็ดทำความสะอาดแผลและใช้เป็นเครื่องสำอางแอลกอฮอล์ (เหล้า ไวน์และเบียร์) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถนำมาผสมในน้ำมันเบนซินซึ่งจะช่วยเพิ่มค่าออกเทนได้ เรียกว่า แก๊สโซฮอล์ สำหรับประเทศไทยใช้แก๊สโซฮอล์สูตร E10 ซึ่งก็คือน้ำมันเบนซิน 91 (90 %) ผสมกับเอทานอล (10 %) ปริมาณที่ผสมคิดโดยปริมาตร

2.2.2 กระบวนการทำเอทานอลบริสุทธิ์

การทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นและบริสุทธิ์สูงขึ้นสามารถทำได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.2.2.1 การกลั่นลำดับส่วน (Fractional distillation) เหมาะสำหรับการกลั่นแยกของเหลวที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน หรือแยกสารละลายที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายเป็นสารที่ระเหยง่ายทั้งคู่ ซึ่งถ้ากลั่นแบบธรรมดาเพียงครั้งเดียวจะได้สารที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น การกลั่นน้ำผสมเอทานอล ต้องกลั่นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง จึงจะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นทุกครั้ง แต่ในทางปฏิบัติแทนที่จะนำของเหลวไปกลั่นซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและใช้เวลานาน จึงได้นำไปกลั่นในคอลัมน์ลำดับส่วนหรือในหอกลั่นซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับเป็นการกลั่นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งจะทำให้เอทานอลมีความเข้มข้น 95.6 wt.% และมีน้ำอยู่ 4.4 wt.% เนื่องจากสารละลายเอทานอลและน้ำเป็นของผสมอะซีโอโทรป ซึ่งเป็นของผสมที่แยกได้อย่างมีข้อจำกัดด้วยวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดา โดยของผสมเกิดอะซีโอโทรปที่สัดส่วนเอทานอล 95.6 wt.%

2.2.2.2 การกลั่นแบบอะซีโอโทรป (Azeotropic distillation) เป็นวิธีการกลั่นแยกของผสมโดยใช้คุณสมบัติแบบจุดเดือดร่วมของของผสม โดยโรงงานผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ในปัจจุบันไม่ค่อยนิยมใช้วิธีการนี้ เนื่องจากจะต้องเติมสารช่วยกลั่น ได้แก่ เบนซินซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและติดไฟได้ง่าย รวมทั้งความซับซ้อนของการทำงาน ค่าก่อสร้างที่แพงและมีการใช้พลังงาน (ไอน้ำ) มากในการกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

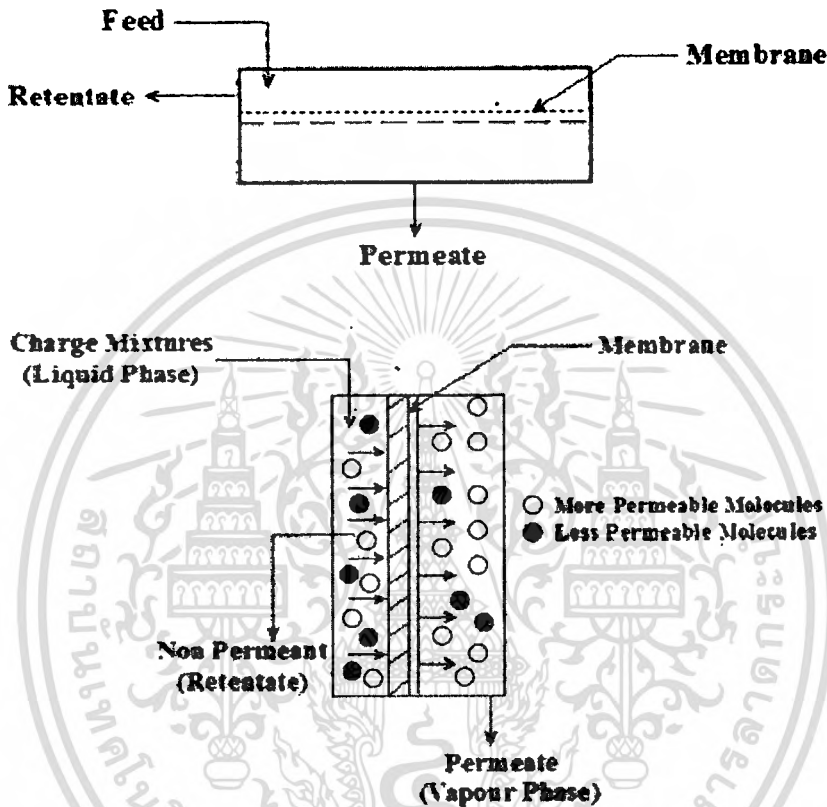
2.2.2.3 การดูดซับ (adsorption) โดยใช้ Molecular sieve ซึ่ง Molecular sieve เป็นสารประเภทซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยทั่วไปจะเป็นชนิด 3A $[(K_2O.Na_2O).Al_2O_3. 2SiO_2.xH_2O]$ ซึ่งมีสมบัติพิเศษคือ สามารถดูดน้ำในสถานะที่เย็นและคายน้ำออกเมื่อได้รับความร้อน หลักการของเทคโนโลยีชนิดนี้ จะใช้สมบัติพิเศษนี้ในการกำจัดน้ำออกจากเอทานอล โดยยอมให้โมเลกุลน้ำผ่านเข้าไปในโมเลกุล ขณะที่โมเลกุลของเอทานอลที่มีขนาดใหญ่กว่าจะผ่านไปไม่ได้ กระบวนการแยกน้ำนี้เริ่มจากการใช้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ในช่วง 92-96% ผ่านไปยังปฏิกรณ์ที่บรรจุ molecular sieve ภายในเป็นชั้นๆ ประมาณ 2-3 ชั้นในแนวนอน โมเลกุลน้ำจะถูกจับไว้ ในขณะที่เอทานอลบริสุทธิ์ถึง 99.8-99.9% จะผ่านลงมา และถูกนำไปยังถังเก็บ หลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการแยกน้ำ ชั้นของ molecular sieve แต่ละชั้นจะชุ่มไปด้วยน้ำ ซึ่งสามารถทำให้แห้งทำได้โดยผ่านไอน้ำ (steam) เพื่อไล่น้ำที่ถูกดูดซับใน molecular sieve ออก ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือ เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ใช้ไอน้ำและพลังงานที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการกลั่น นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นๆ มาช่วยในการแยกน้ำ การกำจัดของเสียจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง แต่เทคโนโลยีนี้มีข้อเสียตรงที่ อัตราการสึกกร่อน หรือเกิดการเน่า (fouling of media) ของ Molecular sieve มีค่อนข้างสูง เมื่อมีการใช้งานมากกว่า 5 ปี จำเป็นต้องเปลี่ยนใหม่ ทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตค่อนข้างสูง

2.2.2.4 การแยกด้วยกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชัน ซึ่งจะใช้หลักการทำงานของเมมเบรน (permeate membrane) ร่วมกับการระเหย (evaporation) ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีอื่นๆ คือ ประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายดูดซับ จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำที่จางจากกระบวนการมีน้อยมาก

2.3 กระบวนการเพอร์แวกเปอเรชัน (pervaporation process)

กระบวนการเพอร์แวกเปอเรชันเป็นกระบวนการสำหรับการแยกองค์ประกอบหนึ่งๆ ออกจากสารละลายผ่านเมมเบรน โดยกระบวนการนี้มีพื้นฐานมาจากกระบวนการเมมเบรนแบบออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) และแก๊สเพอร์มิเอชัน (gas permeation) ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมากระบวนการเพอร์แวกเปอเรชันได้รับความสนใจและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน ซึ่งสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ของการแยกหรือชนิดของสารละลาย คือ การแยกน้ำออกจากสารละลายอินทรีย์ เช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเพื่อผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ การแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลายเจือจาง เช่น การแยกแอลกอฮอล์ออกจากสารละลายแอลกอฮอล์เจือจาง และการแยกฟินอลหรือสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากน้ำทิ้ง การแยกของผสมอินทรีย์ เช่น การแยก o-xylene จาก p-xylene เมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้สามารถแบ่งตามคุณสมบัติในการเลือกผ่านได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งเลือกผ่านน้ำมากกว่าสารอินทรีย์และเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งเลือกผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ สำหรับเมมเบรนชนิดหนึ่งจะเหมาะสำหรับสารละลายชนิดหนึ่งๆ เท่านั้น สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน คือ องค์ประกอบหนึ่งในสารละลายของเหลว ป้อนสามารถแพร่และละลายผ่านเมมเบรนสังเคราะห์โดยอาศัยผลต่างของศักย์ภาพเคมีเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) เช่น ความเข้มข้น ความดัน ความต่างศักย์ไฟฟ้า กล่าวคือ องค์ประกอบต่างชนิดกันใน สารละลายมีความสามารถในการละลายและการแพร่ผ่านเมมเบรนได้ไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.18

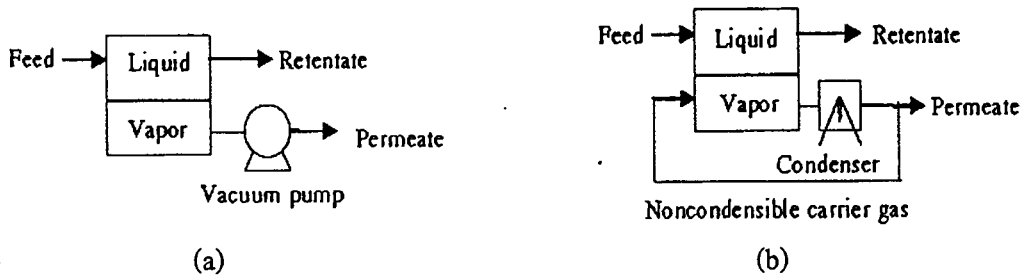


รูปที่ 2.18 หลักการของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปอเรชัน

ที่มา : Mahesh and Guest, 2004 [36]

สารละลายที่สามารถผ่านเมมเบรนได้เรียกว่า เพอร์มิเอท (permeate) จะอยู่ในสถานะไอซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากควบคุมความดันด้านเพอร์มิเอทให้มีค่าต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวของสารละลายที่สามารถผ่านเมมเบรน สำหรับวิธีการลดความดันด้านเพอร์มิเอทที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปมี 2 วิธีคือการใช้ปั๊มสุญญากาศและใช้แก๊สตัวพา (carrier gas) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.19 (a) และ (b) ตามลำดับ โดยในการเปลี่ยนเฟสของของเหลวป้อนเป็นไอในเพอร์มิเอทจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการระเหยร่วมด้วย ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายป้อน และการเก็บตัวอย่างที่เป็นไอของเพอร์มิเอทสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้สารนั้นกลั่นตัวเป็นของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 วิธีการลดความดันด้านเพอมีเอทสำหรับเพอร์เวปอเรชัน

(a) ใช้ปั๊มสุญญากาศ

(b) ใช้แก๊สพา

ที่มา : Winston and Karmalesh, 1992 [7]

กระบวนการเพอร์เวปอเรชัน (Pervaporation process) เป็นกระบวนการแยกของผสมโดยใช้เมมเบรน ซึ่งการเคลื่อนที่ของของเหลวผสมผ่านเมมเบรนสามารถอธิบายด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (solution-diffusion mechanism) สมมติฐานพื้นฐานของการซึมผ่านเมมเบรน โดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน คือ

- 1) ของเหลวผสมที่ป้อนเข้าสู่เมมเบรนจะสัมผัสด้านหนึ่งของเมมเบรนและจะถูกละลายหรือดูดซับเข้าสู่เมมเบรน
- 2) แต่ละองค์ประกอบในของเหลวผสมจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน โดยกลไกการแพร่ด้วยอัตราการแพร่ที่แตกต่างกัน
- 3) องค์ประกอบที่สามารถซึมผ่านเมมเบรนจะเคลื่อนที่มาสู่อีกด้านหนึ่งของเมมเบรนและเกิดการระเหยเป็นแก๊สเนื่องจากความดันที่ลดลง

2.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อศักยภาพของเมมเบรน

ตามกลไกการละลาย-การแพร่ ค่าฟลักซ์จะสูงขึ้นเมื่อสายโซ่ของพอลิเมอร์ในเมมเบรนมีความสามารถในการเคลื่อนไหว และชนิดของสารป้อนมีความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนได้เพิ่มขึ้น คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแพร่ของสารคือ โครงสร้างทางเคมีที่ใช้ผลิตเมมเบรน จำนวนการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ในเมมเบรนและการมีรูพรุนของเมมเบรนอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโมเลกุลของสารกับเมมเบรน [45]

2.3.2 คุณสมบัติของเพอร์เมทฟลักซ์

การคำนวณหาเพอร์เมทฟลักซ์ (Permeate flux)

$$J_i = \frac{W_i}{A \cdot t} \quad (1)$$

โดยที่ J_i คือ เพอร์เมทฟลักซ์ของสารชนิด i , $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$

W_i คือ น้ำหนักของสารที่ผ่านเมมเบรนในช่วงเวลา t , kg

A คือ พื้นที่ผิวของเมมเบรน, m^2

t คือ เวลาที่เพอร์เมทสะสมใน cold trap, h

การคำนวณหาค่าการแยก (Separation factor, α)

อัตราส่วนสมมูล คือ อัตราส่วนของสัดส่วนมวลของสารชนิดนั้น ๆ ใน 2 เฟส ที่จุดสมดุลสำหรับกรณีของ ไอ-ของเหลว (vapor - liquid) จะนิยามโดยค่า K (K-value) หรืออัตราส่วนที่ สมดุลระหว่างไอและของเหลว คือ

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (2)$$

โดยที่ K_i คือ ค่า K ของสารชนิด i

y_i คือ เศษส่วนเชิงมวลของสารชนิด i ในสถานะไอ

x_i คือ เศษส่วนเชิงมวลของสารชนิด i ในสถานะของเหลว

ดังนั้น $y_i = K_i x_i$ และ $\sum y_i = 1$ จะได้ $\sum K_i x_i = 1$ และ $\sum \left(\frac{y_i}{K_i}\right) = 1$

การแยกสารที่มี 2 องค์ประกอบหรือมากกว่า จะสามารถนิยามอยู่ในรูปของอัตราส่วนสมมูล เรียกว่า separation factor สำหรับกรณีของ vapor-liquid ความสามารถในการระเหยสัมพัทธ์ (relative volatility) สามารถนิยามตามสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_{ij} = \frac{K_i}{K_j} = \left(\frac{y_i}{x_i} \right) / \left(\frac{y_j}{x_j} \right) = \frac{(y_i / y_j)_{permeate}}{(x_i / x_j)_{feed}} \quad (3)$$

α_{ij} คือ ค่าการแยก (Separation factor) ของของผสมสำหรับสารชนิด i และ j

y_i, y_j คือ เศษส่วนเชิงมวลของสารชนิด i และ j ในเพอร์มีเอท

x_i, x_j คือ เศษส่วนเชิงมวลของสารชนิด i และ j ในสารป้อน

$$\alpha_{ij} = \frac{(v_i \rho_i / v_j \rho_j)_p}{(v_i \rho_i / v_j \rho_j)_f} \quad (4)$$

ρ_i, ρ_j คือ ความหนาแน่นของสารชนิด i และ j

v_i, v_j คือ เศษส่วนเชิงปริมาตร (Volume fraction) ของสารชนิด i และ j

สมมติว่าความหนาแน่นของสารละลายป้อนและสารที่ซึมผ่านเมมเบรนมีค่าเท่ากัน

จะได้

$$\alpha_{ij} = \frac{(v_i / v_j)_p}{(v_i / v_j)_f} \quad (5)$$

2.4 ข้อดีของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์แวกพอเรชัน

กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการแยกอื่นๆ ดังนี้คือ

2.4.1 ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำเพราะสามารถแยกโดยใช้ความดันต่ำ ตัวอย่างเช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ ถ้ากระบวนการเพอร์แวกพอเรชันจะมีข้อได้เปรียบทางด้านพลังงานกว่าการกลั่นหรือการต้มระเหย

2.4.2 ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เนื่องจากกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันสามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งเพอร์มีเอทและรีเทนเทท เช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลโดยใช้เมมเบรนที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) จะได้รีเทนเทท คือ เอทานอลเข้มข้นสำหรับเพอร์มีเอทส่วนใหญ่เป็นน้ำซึ่งมีเอทานอลปนออกมาเพียงเล็กน้อย โดยสามารถนำกลับไปแยกใหม่ได้อีกครั้งโดยใช้เมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

2.4.3 สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิห้องได้ เนื่องจากการแยกสารตามคุณสมบัติการเลือกผ่านของเมมเบรนต่อสารละลายป้อนที่ต้องการแยก จึงเหมาะสำหรับการแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ไม่ยาก เนื่องจากชุดเมมเบรนมีลักษณะเป็นชุด (module) หรือหน่วย และสามารถนำหน่วยย่อยๆ มาเรียงต่อกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแยกได้

2.4.5 สามารถดำเนินการแบบกะ (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) ตลอดจนติดตั้งระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้ไม่ยุ่งยาก

2.4.6 เนื่องจากอุปกรณ์เมมเบรนมีการออกแบบให้มีพื้นที่ในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูงจึงมีขนาดกระทัดรัด ไม่เปลืองพื้นที่ในการดำเนินการ

2.4.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเพอร์เวปอเรชันมีขนาดเล็กกระทัดรัดสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย

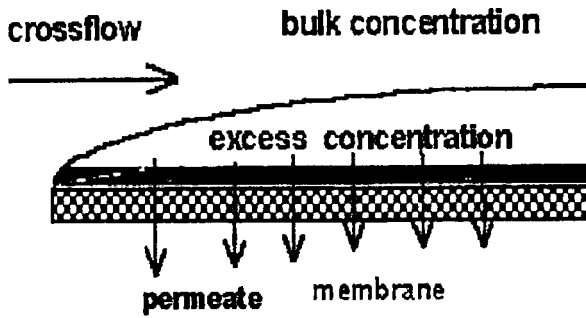
2.4.8 หลักการทำงานของกระบวนการไม่ถูกจำกัดด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องจุดอะซิโโทรป

2.4.9 ระบบเพอร์เวปอเรชันไม่ต้องการใช้สารเคมีตัวที่สามเหมือนการกลั่นแบบอะซิโโทรป จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

จากข้อได้เปรียบของกระบวนการดังกล่าว หากสามารถนำกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปอเรชันไปใช้แทนกระบวนการแบบเดิมได้ เช่น สำหรับการแยกเอทานอล-น้ำ จากชีวมวล แทนการกลั่นที่ใช้อยู่ หรืออาจนำมาใช้แทนบางขั้นตอน เช่น แทนการกลั่นแบบอะซิโโทรปก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์

2.5 ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปอเรชัน [47]

2.5.1 Concentration polarization (CP) ซึ่งหมายถึง การสะสมของโมเลกุล หรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป (bulk solution) ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งแสดงการเกิด Concentration polarization (CP) และการเกิด CP จะลดสมรรถนะของการแยก โดยจะเพิ่มความต้านทานต่อการไหลของสารละลาย ทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลงเนื่องจากทำให้เกิดการอุดตัน (fouling) การลด CP สามารถทำได้โดยการออกแบบอุปกรณ์ให้มีการป้อนสารละลายผ่านเมมเบรนแบบไหลขวางและที่มีความเร็วสูง ซึ่งจะช่วยให้สารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนที่สะสมเกิดการแพร่กลับไปใน bulk solution สำหรับกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปอเรชัน CP จะมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากการป้อนสารละลายผ่านเมมเบรนส่วนใหญ่จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งจะช่วยให้สารที่สะสมบนผิวหน้าเมมเบรนหลุดออกไป



รูปที่ 2.20 การเกิด Concentration polarization (CP) [47]

2.5.2 Fouling หมายถึง การสะสมหรือการอุดตันของสารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนบนผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งมีผลทำให้ฟลักซ์ลดลงและค่าการแยกเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเกิดการอุดตัน (fouling) จะเพิ่มความต้านทานต่อการไหลของสารละลาย ซึ่งเกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเมมเบรนและสารละลายที่ต้องการแยก สิ่งสะสมและอุดตันจะไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม

2.5.3 ความคงตัวของเมมเบรน

เมมเบรนที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิเมอร์ จึงมีความคงตัวจำกัด เช่น เมมเบรนชนิดพอลิซัลโฟนสามารถใช้งานในช่วง pH 1-13 ซึ่งใช้งานได้ในช่วงกว้างกว่าเมมเบรนจำพวกเซลลูโลสซึ่งมีความคงตัวอยู่ในช่วง pH 4-8 และอุณหภูมิก็มีผลต่อเมมเบรน โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาเมมเบรนแบบพอลิเมอร์ที่ทนอุณหภูมิได้สูง 60-100 องศาเซลเซียส เมมเบรนบางชนิดไม่ทนต่อคลอรีนหรือตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนเมมเบรนที่ผลิตจากเซรามิกมีความคงตัวต่อสารเคมีและอุณหภูมิดีมาก สามารถนำเช็ดด้วยไอน้ำได้ ทนต่อจุลินทรีย์ แต่ความสามารถในการแยกยังดีน้อยกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ซึ่งขณะนี้มีการพัฒนาแต่ค่อนข้างจะจำกัดและราคาแพง

2.6 วัสดุสำหรับผลิตเมมเบรน [47]

เมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการเพอร์เวปอเรชันส่วนใหญ่ผลิตมาจากวัสดุอินทรีย์ที่เป็นพอลิเมอร์ และในปัจจุบันเริ่มมีการใช้สารอนินทรีย์ ซึ่งได้แก่ โลหะ แก้ว และเซรามิกส์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาและพัฒนาเมมเบรนแบบอนินทรีย์ชนิดใหม่ที่ได้จากซีโอไลต์ (zeolite) การเลือกชนิดของวัสดุเพื่อนำมาผลิตเมมเบรนขึ้นอยู่กับการใช้งานเมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุอนินทรีย์จะมีคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เหนือกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากพอลิเมอร์ สารอนินทรีย์ที่นิยมนำมาผลิตเมมเบรนสังเคราะห์ได้แก่ เซรามิกส์ โลหะ แก้ว และซีโอไลต์ ซึ่งปัจจุบันมีการนำเมมเบรนอนินทรีย์มาใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ไมโครฟิลเตรชันและการแยกแก๊สเท่านั้น สำหรับกระบวนการเพอร์เวปอเรชันการผลิตเมมเบรนอนินทรีย์ยังมีการวิจัยและกำลังพัฒนาอยู่โดยวัสดุอนินทรีย์ชนิดใหม่ที่น่าสนใจ ไม่ว่าจะเป็นดินเผาทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตเมมเบรน ได้แก่สารจพวก ซีโอไลต์ เช่น Zeolite A, silicalite, ZSM – 5 เนื่องจากพบว่ามีการกระจายของรูพรุนแคบจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ ในกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันและการแยกแก๊ส

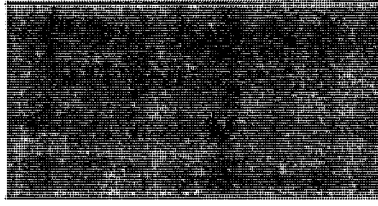
2.7 เมมเบรนสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน

เมมเบรนสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเพอร์เวปพอเรชันเป็นเมมเบรนแบบเนื้อแน่น (dense membrane) หรือไม่มีรูพรุน (nonporous membrane) เช่นเดียวกับกระบวนการเมมเบรนแบบออสโมซิสผันกลับและแก๊สเพอร์มิเอชัน มีลักษณะผิวเนื้อแน่นและบาง เป็นเมมเบรนที่มีความหนาแน่นของเนื้อพอลิเมอร์สูง มีช่องว่างในเนื้อพอลิเมอร์น้อย (น้อยกว่า 40%) กลไกการไหลของสารละลายผ่านเมมเบรนแบบเนื้อแน่นเป็นแบบการละลาย-การแพร่ สารที่สามารถผ่านเมมเบรนได้จะละลาย (solution) ในเนื้อเมมเบรนแล้วผ่านไปโดยการแพร่ (diffusion) ผ่านผิวเนื้อแน่นนั้นเนื่องจากมีแรงขับเคลื่อน (driving force) เป็นผลจากความดัน ความเข้มข้นหรือความต่างศักย์ไฟฟ้า การแยก (separation) ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในสารละลายป้อน ซึ่งเป็นของผสมเกิดจากการที่แต่ละองค์ประกอบมีอัตราการละลายและการแพร่แตกต่างกัน เมมเบรนแบบนี้จะให้ค่าการแยกหรือการเลือกผ่าน (selectivity) ที่ดี แต่ให้อัตราการไหลผ่าน (permeation rate) ต่ำเมมเบรนแบบเนื้อแน่นสามารถแบ่งย่อยตามชนิดโครงสร้างได้ อีก 3 ชนิดย่อย ๆ ดังนี้ คือ

2.7.1 เมมเบรนแบบสมมาตร (Symmetric or isotropic membrane) เป็นเมมเบรนซึ่งพื้นที่ผิวในสัณฐานวิทยา (morphology) ทุกระนาบมีลักษณะผิวเหมือนกันทุกระนาบ เช่น เนื้อแน่นเหมือนกันทุกระนาบตลอดแนวลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.21

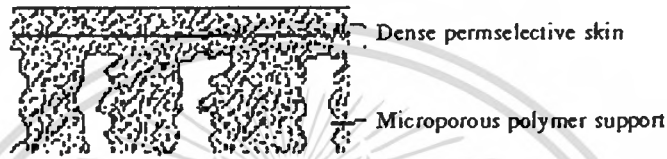
2.7.2 เมมเบรนแบบไม่สมมาตร (Asymmetric or anisotropic membrane) เป็นเมมเบรนซึ่งพื้นที่ผิวในระนาบมีลักษณะผิวไม่เหมือนกันตลอดแนวลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.22 อาจมีชั้นผิวและชั้นรองรับต่างกัน ซึ่งอาจเกิดจากกลไกในการผลิต

2.7.3 เมมเบรนเชิงประกอบ (composite membrane) จัดเป็นเมมเบรนชนิดไม่สมมาตร โครงสร้างของเมมเบรนประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนบนเป็นชั้นเมมเบรนบางหรือ activity layer จะเป็นชั้นที่ควบคุมการไหลผ่านของสาร ส่วนชั้นล่างจะเป็นชั้นเสริมหรือชั้นรองรับ (support) มีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นโครงสร้างเสริมความแข็งแรงทางกลของเมมเบรนดังแสดงในรูปที่ 2.23 พอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเป็นชั้นผิวและชั้นรองรับเป็นคนละชนิดกัน การผลิตชั้นผิวส่วนมากอาศัยการเกิดปฏิกิริยาบนชั้นรองรับ เช่น การเกิดพอลิเมอร์เซชันของมอนอเมอร์ ความหนาของเมมเบรนทั้งหมดประมาณ 150-200 ไมโครเมตร จะมีความหนาของชั้นผิวที่บางมากเพียง 100-200 นาโนเมตร



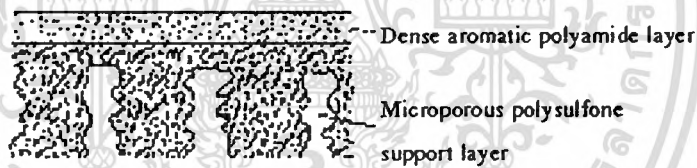
รูปที่ 2.21 เมมเบรนแบบสมมาตร

ที่มา : Baker, 2004 [4]



รูปที่ 2.22 เมมเบรนแบบไม่สมมาตร

ที่มา : Seader and Henley, 1998 [4]



รูปที่ 2.23 เมมเบรนเชิงประกอบ

ที่มา : Seader and Henley, 1998 [4]

ชนิดของเมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรมต้องการคุณสมบัติการเลือกผ่านที่ดีและอัตราการแพร่ผ่านสูง ดังนั้นในกระบวนการเพอร์เวปอเรชันจึงเลือกใช้เมมเบรนแบบไม่สมมาตรและแบบเชิงประกอบเป็นส่วนใหญ่ โดยเลือกให้โครงสร้างมีผิวหนังเป็นแบบเนื้อแน่นบางเพื่อเพิ่มการเลือกผ่านและให้ส่วนล่างเป็นแบบรูพรุนและหนา เพื่อเพิ่มอัตราการแพร่ผ่านและทำหน้าที่เป็นส่วนรองรับ (support)

นอกจากนี้เมมเบรนสำหรับกระบวนการเพอร์เวปอเรชันยังสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 2 กลุ่ม ดังนี้คือ เมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic) และเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

ก. เมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic)

เป็นเมมเบรนที่เลือกผ่านน้ำมากกว่าสารอินทรีย์ ซึ่งมีการพัฒนาจากพอลิเมอร์หลายชนิด ตัวอย่างเมมเบรนที่มีศักยภาพและมีการนำไปใช้งานแล้ว เช่น เมมเบรนชนิด Polyvinyl alcohol

(PVA), Polytetrafluoroethylene, crosslinked PVA เมมเบรนเชิงประกอบ PVA/PAN, Cellulose acetate, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Polysulfone แสดงดังตารางที่ 2.6 ซึ่งแสดงประสิทธิภาพของเมมเบรน hydrophilic บางชนิดที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล - น้ำ จะเห็นได้ว่าเมมเบรนให้ค่าการแยกสูงแต่ให้ค่าฟลักซ์ต่ำเมมเบรนที่ให้ค่าการแยกสูง เช่น PVA และ Carboxymethylcellulose

ตารางที่ 2.6 ประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบชอบน้ำ ที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลกับน้ำ โดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน

Membrane material	Ethanol Feed Concentration (wt%)	T (°C)	Selectivity	Flux (kg/m ² h)
Polyvinyl alcohol(GFT)	92-100	90-100	-	0-0.9
Polyvinyl alcohol(GFT)	0-100	60	High	0-4
Polyvinyl alcohol(GFT)	60-100	75-100	50-2000	0-2
Polyvinyl alcohol	0-100	50	5-12	0.1-0.5
Cellulose acetate	5-95	20	1-3.6	0.3-1.2
Cellulose triacetate	81-95	25	2400-5900	0.005-0.1
Carboxymethylcellulose	15-95	20-50	3-6	-
Polysulfone	15-95	20-50	3-6	-
Acrylic acid-acrylamide GPC	0-90	40	1-20	0-10
Polyacrylic acidpolycation	20-100	70	<1-2000	0.5-20
Polyvinylfluoride/acrylic acid	80	70	-	1.8
Polyvinylidene fluoride-N-vinylimidazole	0-95	70	-	0-6
Nafion	30-98	40	Low	-0.5

ที่มา : Winston and Kamalesh, 1992 [7]

ปัจจุบันยังมีความพยายามที่จะพัฒนาเมมเบรนแบบ hydrophilic จากพอลิเมอร์ ชนิดใหม่หรือใช้พอลิเมอร์ผสม ตลอดจนวิธีการใช้การเชื่อมขวาง และการปรับสภาพผิวเพื่อให้ได้เมมเบรนที่มีค่าทั้งการแยกและค่าฟลักซ์สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. เมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

เมมเบรนชนิดนี้ต้องมีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ เพื่อแยกสารละลายอินทรีย์เจือจางออกจากน้ำหรือทำให้ได้สารอินทรีย์ที่เข้มข้นขึ้น ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรนชนิดนี้ เช่น เมมเบรนชนิด Silicone rubber, Polydimethylsiloxane (PDMS), Polypropylene, Polyacrylic acid, Polyetheramides, Zeolite - filled silicone rubber สำหรับประสิทธิภาพของเมมเบรน hydrophobic บางชนิดที่ใช้แยกสารละลายอินทรีย์-น้ำ แสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ประสิทธิภาพของเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ที่ใช้ในการแยกสารละลายอินทรีย์-น้ำ โดยกระบวนการเพอร์แวกพอร์เรชัน

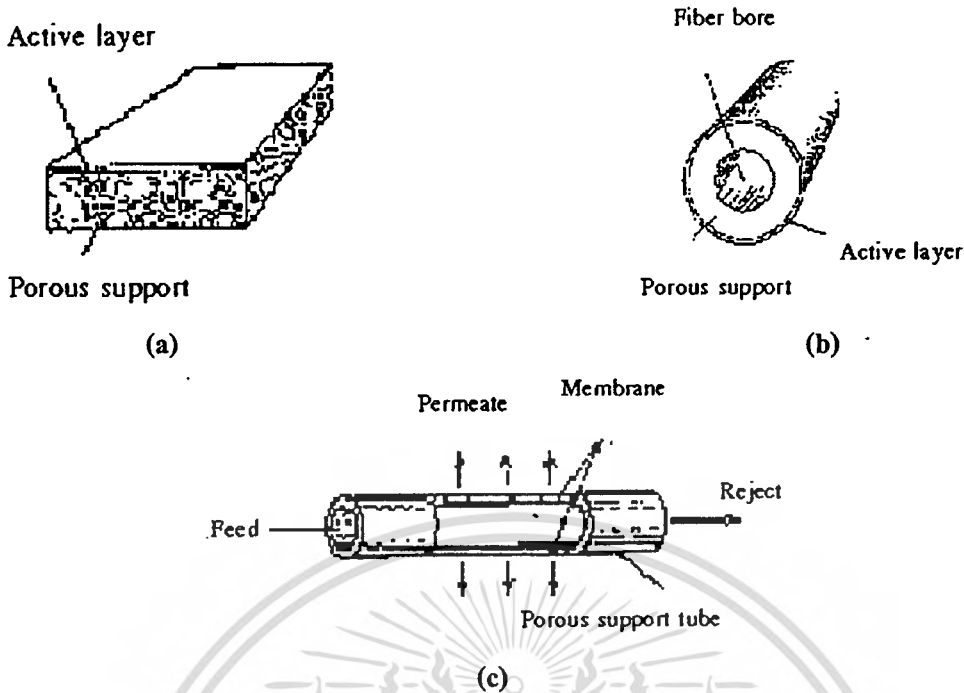
Membrane material	Organic Feed Concentration (wt%)	T (°C)	Selectivity	Organic Flux (kg/m ² h)
Polypropylene	Acetone(45)	30	3	0.1-1.2
Silicone rubber	Butanol(0-8)	30	45-65	<0.035
Silicone rubber	IPA(27-100)	25	0.5-12	-
Silicone rubber	IPA(9-100)	25	9-22	0.03-0.11
Polyetheramides	Acetic acid(1.5-9)	50	-	0.18-0.28
Polyacrylic acid	Acetic acid(48)	15	2-8	0.4-0.55
Silicone rubber	Ethyl acetate(0.5-4)	30	High	-
GFT ethanol membrane(PDMS)	Ehanol(87-100)	60	150-10 ⁴	0-1.6

ที่มา : Winston and Kamalesh, 1992 [7]

2.8 อุปกรณ์เมมเบรน (Membrane module)

เมมเบรนที่ผลิตขึ้นทั้งที่มีรูปแบบเป็นเมมเบรนแบบไม่สมมาตรและเมมเบรนเชิงประกอบที่ใช้กันส่วนใหญ่มีรูปร่าง 3 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.24 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ เมมเบรนแผ่นเรียบจะมีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร และหนา 200 ไมโครเมตร โดยส่วนบนของผิวเนื้อแน่นจะมีความหนา 500 – 5000 อังสตรอม แสดงดังรูปที่ 2.24 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 รูปร่างของเมมเบรนภาพประกอบ

- (a) เมมเบรนแบบแผ่นเรียบ
- (b) เมมเบรนแบบท่อ
- (c) เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง

ที่มา: Seader and Henley, 1998 [4]

เมมเบรนแบบท่อส่วนใหญ่จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 0.5-5 เซนติเมตร และมีความยาวสูงถึง 6 เมตร ชั้นผิวส่วนบนเนื้อแน่นและบางจะอยู่บนผิวด้านนอกของท่อ แสดงดังรูปที่ 2.24 (b) ส่วนชั้นรองรับที่มีความพรุนจะผลิตจากเส้นใยแก้วหรือ โลหะ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงแสดงดังรูปที่ 2.24 (c) ซึ่งส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 45 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 85 ไมโครเมตร ยาว 1.2 เมตร และความหนาของชั้นผิวเนื้อแน่น 0.1-1 ไมโครเมตร เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงจะมีพื้นที่ผิวของเมมเบรนต่อปริมาตรของอุปกรณ์สูง ในการใช้งานต้องบรรจุหรือประกอบเมมเบรนในหน่วยอุปกรณ์ให้มีพื้นที่เมมเบรนตามต้องการซึ่งเรียกว่า module ได้มีการออกแบบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างต่างกันซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.25-2.26 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ แบบท่อ แบบเส้นใยกลวง และแบบท่อม้วน หลักการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งานคือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรน กระทบคือ มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง เป็นต้น อุปกรณ์เมมเบรนสำหรับกระบวนการเพอร์เวปอเรชันส่วนใหญ่จะเป็นแบบแผ่นและกรอบ และแบบท่อม้วน สำหรับอุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงและแบบท่อกำลังมีการพัฒนาอยู่ ตัวอย่างการนำอุปกรณ์เมมเบรนต่าง ๆ ไปใช้งานสำหรับเพอร์เวปอเรชัน แสดงดังตารางที่ 2.8 กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 บริษัทผู้ผลิตเมมเบรนแบบต่างๆ เพื่อใช้งานสำหรับเพอร์เวปพรชัน

Organization	Primary Application	Module Configuration	Membrane material
GFT	Dehydration of liquid organics	Plate and frame	Polyvinyl alcohol composite
MTR	Organics recovery from wastewater	Spiral wound	Silicones
Lurgi	Dehydration of liquid organics	Plate and frame	Polyvinyl alcohol composite
	Dehydration of vapor	Plate and frame	Polyvinyl alcohol composite
Tokuyama Soda	Dehydration of IPA	Hollow-fiber bundles	Chitisan
Kalsep	Dehydration of liquid organics	Tubular bundles	Ion exchange composites
		Spiral wound	
Hocchst Celanese	MeOH/MTBE	Plate and frame	Cellulose acetates
Mitsui	Dehydration of liquid organics		Polyvinyl alcohol

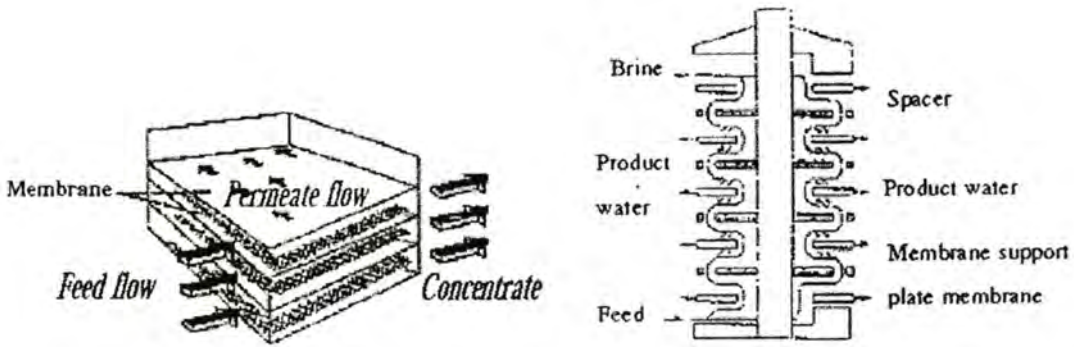
ที่มา : Winston and Kamalesh, 1992 [7]

2.8.1 อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ (plate and frame module)

เมมเบรนแบบแผ่นจะใช้อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ ซึ่งมีลักษณะตามภาพตัดขวางเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมผืนผ้า เมมเบรนจะประกบติดกันด้วยแผ่นกั้นซึ่งจะมีช่องว่างเพื่อให้เพอร์มิเอทสามารถไหลผ่านได้แสดงดังรูปที่ 2.25 อุปกรณ์แบบนี้มีการออกแบบโครงสร้างอย่างง่าย และสามารถนำมาใช้งานได้สะดวก

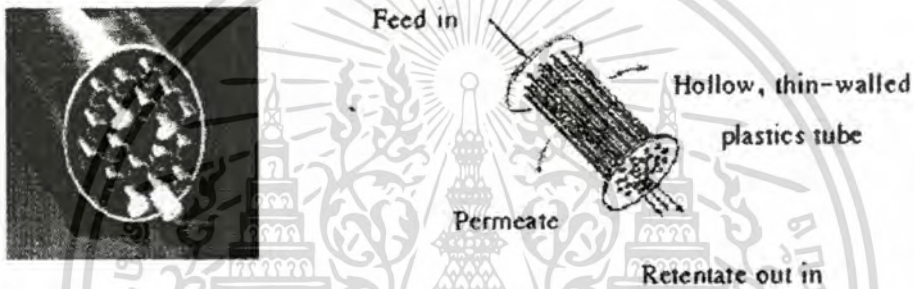
2.8.2 อุปกรณ์แบบท่อ (tubular module)

เมมเบรนแบบท่อแสดงดังรูปที่ 2.26 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มากกว่าหรือเท่ากับ 10 มิลลิเมตร โดยปกติในตู้บรรจุ (housing) ประกอบด้วยท่อเมมเบรนหลายๆ ท่ออาจสูงถึง 30 ท่อ สารละลายป้อนจะไหลเข้าด้านในท่อและเพอร์มิเอทซึ่งไหลผ่านจะถูกเก็บมารวมกัน ชุดอุปกรณ์แบบนี้มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์ต่ำกว่าแบบแผ่นและแบบกรอบ นอกจากเมมเบรนจะผลิตมาจากพอลิเมอร์แล้วยังนิยมผลิตเมมเบรนจากเซรามิกส์แบบท่อและอาจจะเป็นแบบโมโนลิท (monolith) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 อุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ

ที่มา: Seader and Henley, 1998 [4]



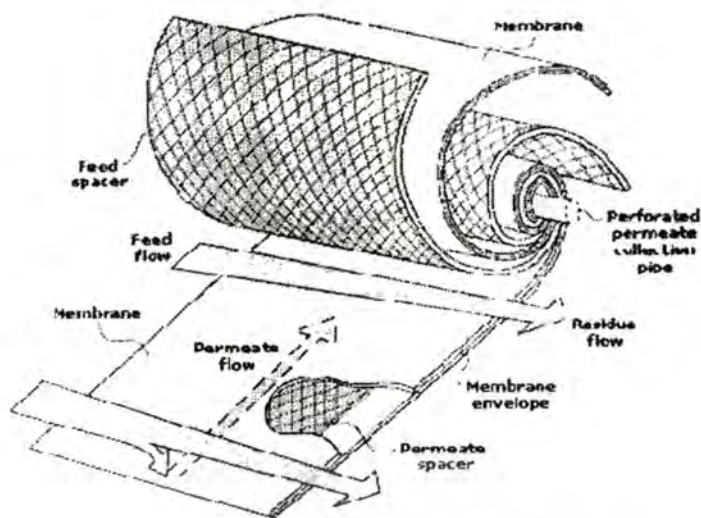
รูปที่ 2.26 อุปกรณ์แบบท่อ

ที่มา: Seader and Henley, 1998 [4]

2.8.3 อุปกรณ์แบบท่อม้วน (spiral wound module)

เป็นการนำเมมเบรนแผ่นเรียบมาม้วนรอบแกน โดยมีแผ่นกั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึง 40 เซนติเมตร แผ่นเมมเบรนชั้นหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยแผ่นเมมเบรน 2 แผ่น โดยเมมเบรนทั้ง 2 แผ่นจะถูกกั้นด้วยแผ่นเพื่อให้เพอร์มิเอทและสารป้อนสามารถไหลผ่านได้ สารละลายป้อนจะไหลตามแนวแกนและเพอร์มิเอทจะไหลภายในท่อ ข้อดีของอุปกรณ์แบบนี้คือ มีความแข็งแรงสามารถทนต่อการใช้งานที่ความดันสูง ๆ ได้ มีขนาดกระทัดรัด และโอกาสเกิด concentration polarization มีน้อย อุปกรณ์แบบท่อม้วนแสดงดังรูปที่ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

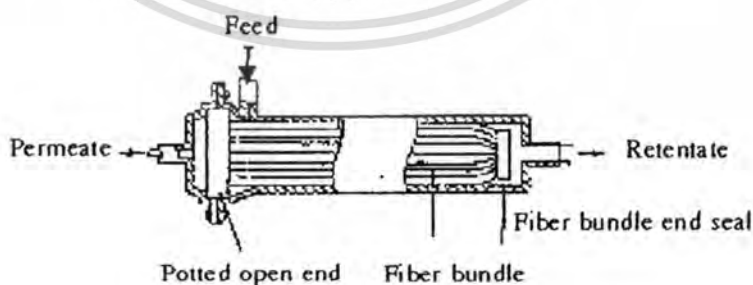


ดั่งรูปที่ 2.27 อุปกรณ์แบบท่อม้วน

ที่มา: Seader and Henley, 1998 [4]

2.8.4 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง (hollow fiber module)

เมมเบรนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เล็กมากคือ น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ในชุดอุปกรณ์ประกอบด้วยเมมเบรนแบบเส้นใยจำนวนมากคือมากกว่า 1 ล้านเส้นใย สารละลายป้อนจะถูกป้อนจากทางด้านในของเส้นใยและเก็บเพอร์มิเอตจากทางด้านนอกของเส้นใย ข้อดีของเมมเบรนแบบนี้คือ เป็นเมมเบรนที่มีความยืดหยุ่น สามารถดำเนินการได้ 2 ทางคือ inside-out หรือ out - inside อุปกรณ์จะมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์เมมเบรนแบบอื่น ๆ แต่ให้ประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียคือ มีราคาแพง การวิจัยและพัฒนาขี้น้อยอยู่ และเมมเบรนเกิดการอุดตันได้ง่าย อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวงแสดงดั่งรูปที่ 2.28 จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-0.25 เมตร และยาว 1 เมตร



รูปที่ 2.28 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง

ที่มา : Seader and Henley, 1998 [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของอุปกรณ์เมมเบรนทั้ง 4 แบบ

	Plate and frame	Spiral-wound	Tubular	Hollow fiber
Packing density, m^2/m^3	30-500	200-800	30-200	500-9000
Resistance to fouling	Good	Mode rate	Very good	Poor
Ease of cleaning	Good	Fair	Excellent	Poor
Relative cost	High	Low	High	Low
Main applications	D,RO,PV,UF,MF	D,RO,GP,UF,M	RO,UF	D,RO,GP,UF

Note : D = dialysis, Ro = reverse osmosis, GP = gas permeation, PV = pervaporation,
UF = ultra filtration, MF = micro filtration

ที่มา Seader and Henley, 1998 [4]

ซึ่งจากตารางที่ 2.9 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลางจะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรของ
อุปกรณ์มากที่สุด แม้ว่าอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ มีราคาสูง และมีความหนาแน่นปานกลาง แต่
สามารถนำไปใช้ได้กับกระบวนการเมมเบรนทุกกระบวนการยกเว้นกระบวนการแยกแก๊สและเป็น
อุปกรณ์เมมเบรนที่ใช้อย่างกว้างขวางสำหรับกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน สำหรับอุปกรณ์แบบท่อ
ม้วนจะเป็นอุปกรณ์ที่นิยมสำหรับนำมาใช้งานอย่างมาก เนื่องจากราคาต่ำและสามารถต้านทานแรงกดดัน
ได้สูง อุปกรณ์แบบท่อมีการใช้งานที่ค่อนข้างจำกัด จะเหมาะสำหรับการใช้งานที่มีโอกาสเกิดการอุดตัน
ได้สูงซึ่งจำเป็นต้องมีการล้างเมมเบรน

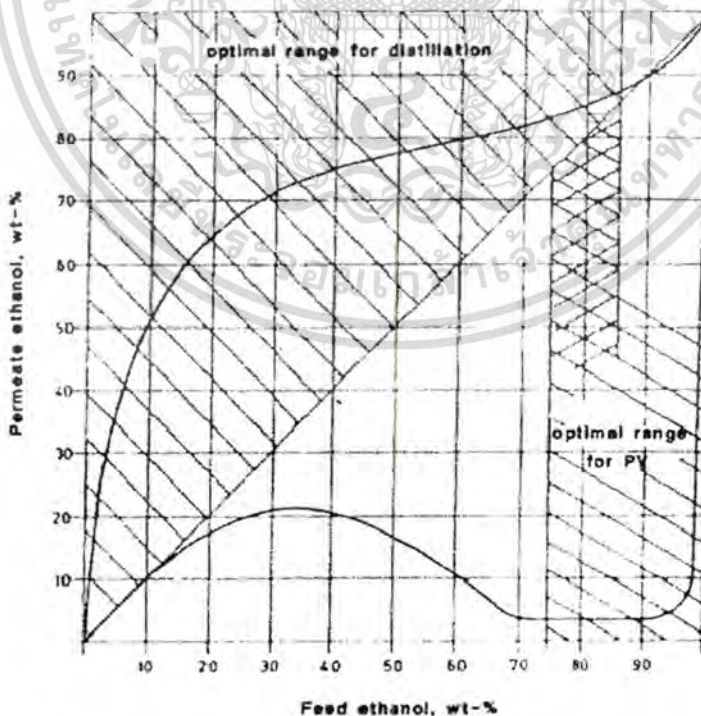
2.9 การนำระบบเพอร์เวปพอเรชันไปประยุกต์ใช้งาน

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีจำนวนโรงงานที่เกี่ยวข้องกับเพอเวปพอเรชันเพิ่มมากขึ้นจาก 20 เป็น
50 โรงงาน โดยมีกำลังการผลิตอย่างน้อยที่สุด 5,000 ลิตร และมีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เหตุผลที่มี
การนำกระบวนการนี้มาใช้เพิ่มมากขึ้นทั้งในยุโรป เอเชีย และอเมริกาเหนือ ก็เนื่องมาจากลดค่าใช้จ่าย
ในเรื่องของพลังงาน มีราคาค่าต้นทุนรวมของระบบค่อนข้างต่ำ ไม่ถูกจำกัดด้วยสมดุลทางเทอร์โม
ไดนามิกส์ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องจุดอะซิโตรีปปราศจากมลพิษ น้ำทิ้งจากกระบวนการมีน้อยมากไม่
ต้องการตัวทำลายคูดซับ อุปกรณ์สำหรับกระบวนการมีขนาดเล็กสามารถนำไปรวมกับการกลั่นที่มีอยู่
เดิมได้สะดวก โดยนำไปแทนที่ขั้นตอนการกลั่นแบบอะซิโตรีป และราคาค่าต้นทุนสำหรับดำเนินการต่ำ
สำหรับในสหรัฐอเมริกาจะพิจารณาข้อได้เปรียบในแง่สิ่งแวดล้อมมากกว่าการประหยัดพลังงาน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งานสำหรับกระบวนการนี้สามารถแบ่งตามจุดประสงค์การแยกออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้คือ

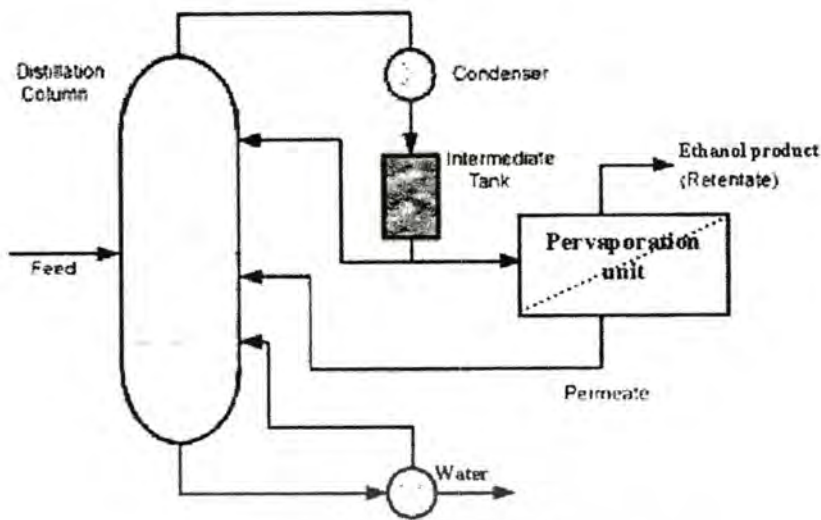
2.9.1 การแยกน้ำออกจากของเหลวอินทรีย์

มีโรงงานมากกว่า 100 โรงงานที่นำระบบเพอร์เวปอเรชัน มาใช้สำหรับแยกน้ำออกจากของเหลวอินทรีย์ เช่น การแยกน้ำออกจากเอทานอล (ethanol dehydration) ที่ได้จากกระบวนการหมัก ในการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงโดยการกลั่นจะพบกับปัญหา คือมีจุด อะซิโตรีป ซึ่งทำให้ความเข้มข้นในเฟสของเหลวและไอเท่ากัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.29 การผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอะซิโตรีปจะต้องเติมองค์ประกอบตัวที่สาม เช่น เบนซีน หรือเพิ่มขั้นตอนการกลั่นแบบอะซิโตรีป ซึ่งถ้านำระบบเพอร์เวปอเรชันมาใช้แทน เช่น เพื่อแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล 95% เป็น 99.5% พบว่ามีความได้เปรียบทั้งในแง่เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการกลั่นควบคู่กับเพอร์เวปอเรชันเพื่อผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ที่เรียกว่ากระบวนการผสม (hybrid process) ดังรูปที่ 2.30 ซึ่งเป็นการผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 wt.% จากความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 60 wt.% โดยสารป้อนถูกส่งไปยังหอกลั่นที่ความดันบรรยากาศ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากด้านบนของหอกลั่นคือ น้ำเกือบบริสุทธิ์และจะได้เอทานอลบริสุทธิ์ 95 wt.% หลังจากนั้นเอทานอลที่กลั่นจะได้ถูกส่งไปยังขั้นตอนเพอร์เวปอเรชัน โดยที่เพอร์เมทคือ เอทานอลเข้มข้น 25 wt.% และรีเทนเททคือ เอทานอลเข้มข้น 99.5 wt.%



รูปที่ 2.29 Liquid – vapor equilibrium สำหรับสารละลายเอทานอล – น้ำ [4]

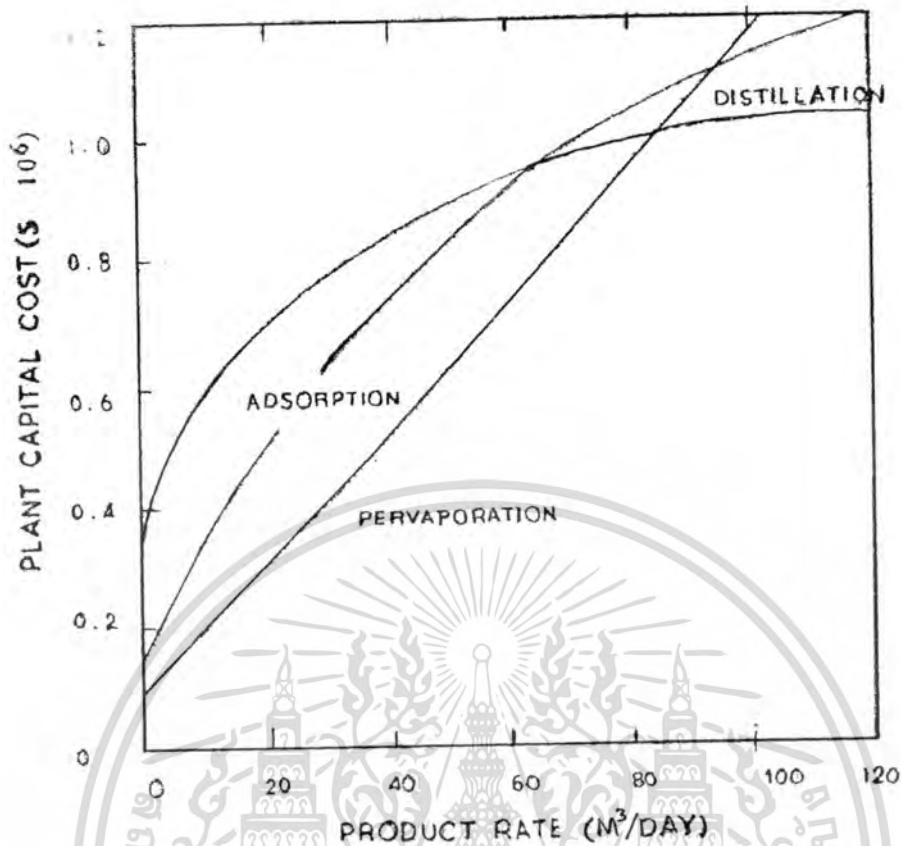
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 กระบวนการผสม (hybrid process) ระหว่างการกลั่นกับเพอร์เวปอเรชัน เพื่อผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 wt.% [4]

ผลจากการประยุกต์ใช้กระบวนการเพอร์เวปอเรชันสำหรับการแยกน้ำออกจากของเหลวอินทรีย์ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง ดังรูปที่ 2.31 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตกับอัตราการผลิต (m^3 / day) สำหรับกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน กระบวนการดูดซับและกระบวนการกลั่นแบบเดิม และตาราง 2.10 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตสำหรับโรงงานการผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 wt.% ซึ่งมีกำลังการผลิต $1 \text{ m}^3 / \text{day}$ จะพบว่าต้นทุนการผลิตโดยใช้ระบบเพอร์เวปอเรชันจะต่ำกว่ากระบวนการกลั่นประมาณครึ่งหนึ่งและไม่เกิดมลพิษ ต้องการพลังงานไอน้ำ (steam) ต่ำ แต่ต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากกว่าการกลั่น และการดูดซับด้วย molecular sieve เนื่องจากในการดำเนินการของระบบจำเป็นต้องใช้พลังงานจากปั๊มสุญญากาศ สำหรับโรงงานต้นแบบ (pilot plant) ที่ผลิตเอทานอลซึ่งมีกำลังการผลิต 1,000 ตัน/ปี แสดงในรูปที่ 2.32 ซึ่งเป็นของบริษัท Sulzer Chemtech

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



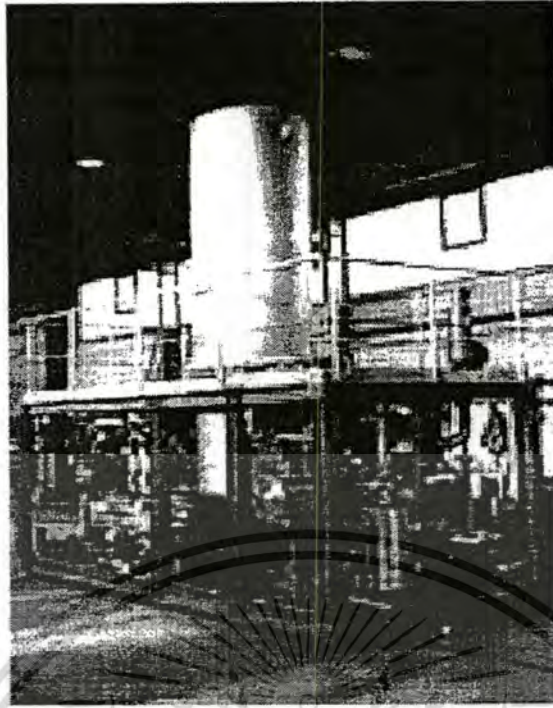
รูปที่ 2.31 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเอทานอลกับอัตราการผลิต (m^3/day) สำหรับกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน กระบวนการดูดซับและกระบวนการกลั่น [7]

ตารางที่ 2.10 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเอทานอลสำหรับโรงงานการผลิตเอทานอลเข้มข้น 99.5 wt.% ซึ่งมีกำลังการผลิต $1 m^3/day$

	Pervaporation	Distillation	Adsorption
System cost (\$)	75,000	140,000	20,000
Pumps (kW)	3	2	2
Steam (kg/hr.)	45 at 1.8 bars	70 at 7.3 bars	90 at 7.3 bars, 220 °C
Entrainer (L/day)	-	3	-

ที่มา : Winston and Kamalesh, 1992 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 โรงงานต้นแบบ (pilot plant) ที่มีกำลังการผลิตเอทานอล 1,000 ตัน/ปี ของบริษัท Sulzer Chemtech [7]

นอกจากกระบวนการนี้จะใช้แยกน้ำออกจากเอทานอลแล้วยังมีการนำไปใช้แยกน้ำจากของผสมอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ซึ่งนับว่ายังเป็นอุตสาหกรรมใหม่ทั้งในสหรัฐอเมริกา ยุโรป และเอเชีย ซึ่งมีข้อได้เปรียบ ในแง่ของสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น การแยกน้ำออกจากตัวละลายต่างๆ ซึ่งแสดงในตาราง 2.11

ตารางที่ 2.11 การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายต่างๆ ด้วยกระบวนการเพอร์แวลพอเรชัน

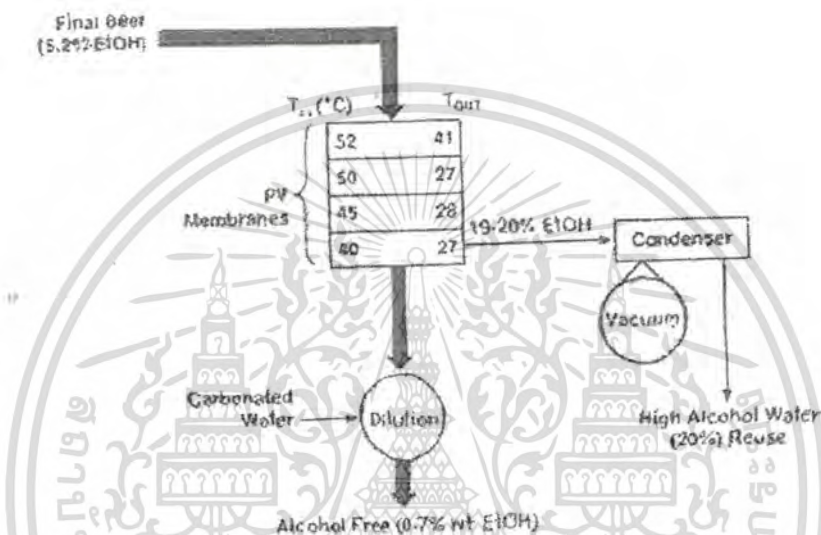
Solvent	Water Content	
	Feed (wt%)	Product (ppm)
n-Butanol	5.4	800
Methanol	7.1	1650
Ethanol/IPA	0.6	610
Ethanol/MeOH	2.9	780
Ethanol/benzene	14.1	320

ที่มา : Winston and Kamalesh, 1992 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 การแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ

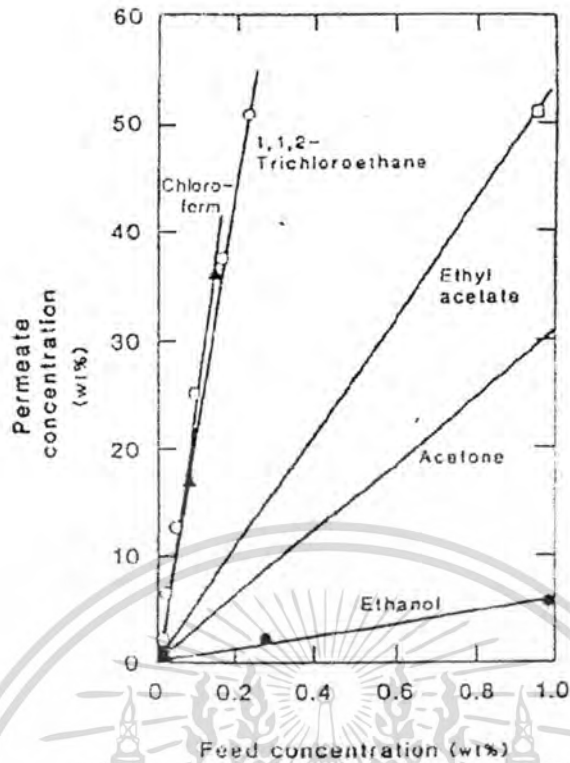
การพัฒนาเมมเบรนและกระบวนการมีการใช้งานในเชิงการค้าเมื่อปี ค.ศ. 1989 เมมเบรนที่ใช้จะเป็นชนิด hydrophobic ซึ่งเลือกให้สารอินทรีย์ผ่านมากกว่าน้ำ การพัฒนาเมมเบรนสำหรับใช้แยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำ พบว่าเมมเบรนที่มีการพัฒนาและรู้จักกันเป็นอย่างดีคือ เมมเบรนชนิด Silicone rubber โดยกระบวนการเริ่มแรกเป็นของบริษัท GFT สำหรับแยกเอทานอลจากเบียร์เพื่อผลิตเบียร์ที่มีแอลกอฮอล์ต่ำหรือมีแอลกอฮอล์ประมาณ 0.7 % ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 การแยกเอทานอลออกจากเบียร์เพื่อผลิตเบียร์ที่มีแอลกอฮอล์ต่ำเป็นของบริษัท GFT ด้วยกระบวนการเพอร์เมปอเรชัน [7]

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการที่น่าเป็นไปได้ เช่น การแยกสารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในน้ำใต้ดินและในน้ำทิ้ง เช่น ethylacetate, carboxylic acid (citric, lactic และ acetic) และอะโรมาติก เช่น ฟีนอลและเบนซีน ดังแสดงในรูปที่ 2.34 แสดงความสามารถในการแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านเมมเบรนชนิด silicone rubber ซึ่งเป็นเมมเบรนแบบท่อม้วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 ความสามารถในการแพร่ของสารอินทรีย์ผ่านเมมเบรนชนิด silicone rubber ซึ่งเป็นเมมเบรนแบบท่อม้วน [7]

2.9.3 การแยกของผสมอินทรีย์

สำหรับการแยกของผสมอินทรีย์โดยใช้ระบบเพอร์แวกพอร์เรชันในปัจจุบันกำลังมีการพัฒนาอยู่ ตัวอย่างการใช้งานสำหรับแยกของผสมอินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 2.12 และ 2.13

ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานเพอร์แวกพอร์เรชันสำหรับแยกของผสมอินทรีย์

กลุ่ม/ชนิดของของผสมอินทรีย์	ตัวอย่างของผสมอินทรีย์
Aromatics/paraffins	Benzene/hexane
Branched hydrocarbons from n-paraffins	Isooctane/hexane
Olefins/paraffins	Pentene/pentane
Isometric mixture	Xylenes
Chlorinate hydrocarbons from hydrocarbons	Chloroform from hexane
Purification of dilute streams	IPA from heptane/hexane

ที่มา : Winston and Kamalesh, 1992 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.13 สารเคมีที่ได้จากการแยกหรือสามารถทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีเพอร์เวปอเรชัน

ประเภทของสาร	ชื่อสาร	ประเภทของสาร	ชื่อสาร
Alcohol	Methanol Ethanol Propanol (both Isomers) Butanol (all Isomers) Pentanol (all Isomers) Cyclohexanol	Ethers	Methyl tert-butyl ether (MTBE) Ethyl tert-butyl ether (ETBE) Di-isopropyl ether (DIPE) Tetrahydro furan (THF)
Ketone	Acetone Butanone Metyl isobutyl ketone (MIBK)	Aliphatics	Chlorinated hydrocarbons (various) Dichloromethane Perchloroethylene
Aromatics	Benzene Toluene Phenol	Amines	Triethylamine Pyridine Aniline
Organic Acid	Acetic acid	Ester	Methyl acetate Ethyl acetate Butyl acetate

ที่มา : Mahesh and Guest, 2004 [39]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kiminori และคณะ [40] ทำการศึกษาการเตรียมเมมเบรนซีโอไลต์ชนิด A บนตัวรองรับที่มีโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบ asymmetric ที่มีค่าพลักซ์สูงและศึกษาพฤติกรรมการแพร่ผ่านที่อุณหภูมิของไอสูงถึง 145 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่า การแยกเอทานอลกับน้ำโดยใช้ตัวรองรับอะลูมินาที่มีโครงสร้างรูพรุนเป็นแบบ asymmetric มีค่าพลักซ์พลักซ์สูง มีค่าเท่ากับ $37 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ หรือ permeances ของน้ำ $3.2 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ (water 10 wt. % / ethanol 90 wt. %) ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าเมมเบรนซีโอไลต์ชนิด NaA ที่เตรียมบนตัวรองรับอะลูมินา มีค่าพลักซ์เท่ากับ $31 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ หรือ permeances ของน้ำ $2.5 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ (water 10 wt. % / ethanol 90 wt. %) ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่าผลของ asymmetric ของตัวรองรับ มีผลอย่างชัดเจนต่อเมมเบรนที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Aisheng และคณะ [41] ศึกษาการสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์ชนิด A บนตัวรองรับแอลฟาอะลูมินาด้วยเทคนิค Electrophoretic โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าฟลักซ์ของการแยก isopropanol–water มีค่า $1.24 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ และค่าการแยกเท่ากับ 3281 (water 5 wt.% / isopropanol 95 wt.%) ที่ 70 องศาเซลเซียส

Mansoor และคณะ [32] ศึกษาการเตรียมเมมเบรนซีโอไลต์ชนิด A และศึกษากระบวนการแยก Water/ unsymmetricaldimethylhydrazine (UDMH) ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าค่า ฟลักซ์ มีค่า $3.95 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ และค่าการแยกเท่ากับ 52000 (water 95 wt.%/ UDMH 5 wt.%)

Jeong และคณะ [43] ศึกษากระบวนการการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอร์ชัน โดยใช้เมมเบรนชนิดโพลีเอมาซ ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่า เมมเบรนที่เตรียมได้นั้นมี ค่าการแยกสูงถึง 240 และให้ค่าฟลักซ์สูงถึง $1.7 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (ที่อัตราส่วนของสารละลายเอทานอลต่อน้ำ 90/10 (w/w))

นางสาวสุภาพร ฉิ่งฉิ้ว และนายไพบุลย์ อินนาจิตร [44] ทำการศึกษากระบวนการเพอร์แวกพอร์ชันในการแยกเอทานอลกับน้ำ โดยใช้เมมเบรนชนิดซิลิโคน และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่า เมมเบรนที่เคลือบด้วย 7 wt.% ของซิลิโคน จะให้ค่าการแยกสูงสุดคือ 7.32 และค่าฟลักซ์สูงถึง $0.4 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ (ที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน 5 wt.% และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส) และเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ให้ค่าการแยกสูงสุดคือ 280 และค่าฟลักซ์เท่ากับ $0.02 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน 5 wt.% และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

Seok และคณะ [10] ศึกษาการแยกของผสมอะซิโตรป 2 ชนิด คือ ของผสมระหว่างเอทานอล–น้ำ และไอโซโพรพานอล–น้ำ โดยใช้เมมเบรน 2 ชนิดคือ เมมเบรนชนิด cellulose acetate (CA) และ silicone rubber ซึ่งมีลักษณะอุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทำการทดลองโดยรวมเมมเบรนทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน กล่าวคือในส่วนแรกจะแยกเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลเจือจางโดยใช้เมมเบรนชนิด silicone rubber และแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเข้มข้นโดยใช้เมมเบรนชนิด CA ในส่วนที่สองผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ สารที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรน (reject stream) พบว่าค่าการแยกรวมจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างสารที่ไม่ผ่านเมมเบรนกับอัตราการป้อน ($R_{CA/F}$) กล่าวคือค่าการแยกรวมจะสูงเมื่อ ($R_{CA/F}$) มีค่าลดลง สำหรับของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อน 40 เปอร์เซ็นต์โดยโมล อัตราการไหล 13.5 มิลลิโมล/นาที่ ผ่านเมมเบรนชนิด silicone rubber ที่อัตราการไหล 10.6 มิลลิโมล/นาที่ เอทานอลในรีเทนเทท 27.9 เปอร์เซ็นต์โดยโมล และเอทานอลเมื่อผ่านเมมเบรนชนิด cellulose acetate (CA) เท่ากับ 89 เปอร์เซ็นต์โดยโมล

Kim และคณะ [11] ทำการสังเคราะห์เมมเบรนเชิงประกอบชนิด polyimide โดยวิธี interfacial polymerization/thermalimidization และการศึกษาการแยกของผสมน้ำออกจากเอทานอลโดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชันผ่านเมมเบรนเชิงประกอบชนิด polyamide ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 5 มิลลิเมตรปรอท ด้วยอัตราการป้อน 210 ลิตร/นาที่ องค์กรประกอบของสารละลายป้อน 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเอทานอล พบว่าเมมเบรนเชิงประกอบที่เตรียมภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมจะแสดงค่าการแยกสูง คือ มากกว่า 240 และเพอร์มิเอฟลักซ์ $1.7 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ แสดงว่าการเตรียมเมมเบรนเชิงประกอบโดยวิธีนี้เหมาะสำหรับการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล

Gonzalez และคณะ [48] ศึกษากระบวนการเพอร์เวปอเรชันของของผสมระหว่างเอทานอล-น้ำโดยใช้เมมเบรนชนิด 1-trimethyl-1-propyne (PTMSP) ซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความดัน 2 มิลลิเมตรปรอท พบว่าได้ค่าการแยกประมาณ 10.7 ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนคือ 10 wt.% และค่าการแยกจะลดลงเหลือ 8 หลังจากทำการทดลองไปแล้ว 450 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการแยกและอัตราการแพร่ผ่านจะลดลงกับระยะเวลาในการทดลอง เนื่องจากเมมเบรนเกิดการบวมตัวสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทดลองนานขึ้น

Li และคณะ [49] ทำการสังเคราะห์เมมเบรน B-ZSM-11 และศึกษาคุณสมบัติของเมมเบรนรวมทั้งทดสอบศักยภาพของเมมเบรนโดยการนำไปใช้แยกเอทานอลออกจากน้ำด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน ที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน ความดัน 0.2 กิโลปาสกาล องค์กรประกอบของแอลกอฮอล์ในสารละลายป้อน 1-50 wt.% พบว่าเพอร์มิเอฟลักซ์มากที่สุด $1.7 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล-น้ำ 5 wt.% และค่าฟลักซ์ของแอลกอฮอล์จะลดลงตามจำนวนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการเลือกผ่านสาร (selectivity) ของเมมเบรน จะมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์ 1 wt.% และค่าการแยกสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำ, เอทานอล-น้ำ, 1-โพรพานอล-น้ำ และ 2-โพรพานอล-น้ำ เท่ากับ 28, 97, 34 และ 26 ตามลำดับ

Molina และคณะ [50] ศึกษาและเปรียบเทียบการแยกสารละลายแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ เมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอลออกจากน้ำ โดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน เมมเบรนที่ใช้มีคุณสมบัติเลือกให้สารอินทรีย์ผ่าน (organophilic) 2 ชนิด คือ CMG-OM-010 และ 1060 Sulzer ซึ่งมีพื้นที่ผิว 131 ตารางเมตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส องค์กรประกอบของแอลกอฮอล์ในสารละลายป้อน 13-20 wt.% หลังจากทำการทดลองได้ 5 ชั่วโมง พบว่าเมมเบรน 1060 Sulzer และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมมเบรนจะให้ค่าการแยกดีที่สุด กล่าวคือสารละลายเอทานอล-น้ำมีค่าการแยกประมาณ 7 และความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่แพร่ผ่าน เมมเบรนประมาณ 30-60 wt.% เมมเบรนทั้งสองชนิดจะให้ค่าฟลักซ์ทำนองเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับแอลกอฮอล์ชนิดเดียวกัน แต่จะแตกต่างกันในแอลกอฮอล์ต่างชนิดกัน สำหรับเพอร์มิเอฟลักซ์ของผสมระหว่างเอทานอล-น้ำโดยใช้เมมเบรน CMG-OM-010 เท่ากับ $0.75-2.25 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chang และคณะ [51] ทำการสังเคราะห์เมมเบรนเชิงประกอบ silicone / PVDF และศึกษา ศักยภาพของเมมเบรนด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน เพื่อแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ พบว่า เมมเบรนเชิงประกอบนี้มีความสามารถในการเลือกให้เอทานอลผ่านเป็นอย่างดี โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ ๆ และค่าการแยกจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นซิลิโคนและทำการสังเคราะห์ เมมเบรนเชิงประกอบที่มีชั้นของ silicone/PVDF/silicone สลับกันหลายชั้น พบว่าเมมเบรนเชิงประกอบ ที่ประกอบด้วย silicone 4 ชั้น จะมีศักยภาพสูงที่สุด คือค่าการแยก 31 เพอร์มิเอทฟลักซ์ $0.9 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ และ pervaporation separation index (PSI) คือ 27,000 ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 10 wt.%

Aisheng และคณะ [52] ศึกษาการสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์ชนิด NaA บนตัวรองรับ แอลฟาอะลูมินาด้วยเทคนิค vacuum-assisted โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าค่า ฟลักซ์ของการแยก isopropanol-water มีค่า $1.49 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ และค่าการแยกเท่ากับ 3781 ที่ความเข้มข้น ของ isopropanol ในสารละลายป้อน 95 wt.% ที่ 70 องศาเซลเซียส

Marc และคณะ [53] ศึกษาการเตรียมเมมเบรนซีโอไลต์ชนิด NaA ภายในท่อตัวรองรับอะลูมินา ด้วยเทคนิค cross-flow filtration โดยการควบคุมการเกิดผลึกซีโอไลต์จากสารแขวนลอยภายใต้ ความดัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าฟลักซ์ของการแยก ethanol-water มีค่า $0.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ และค่าการ แยกเท่ากับ 600 ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน 92 wt.% ที่ 50 องศาเซลเซียส

Pina และคณะ [54] ศึกษาการเตรียมเมมเบรนซีโอไลต์ชนิด NaA บนตัวรองรับอะลูมินาด้วย วิธี secondary growth โดยใช้ระบบ semi-continuous ใน vessel ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าฟลักซ์ ของการแยก ethanol-water มีค่า $3.8 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ และค่าการแยกเท่ากับ 3600 ที่ความเข้มข้นของเอทานอล ในสารละลายป้อน 90 wt.% ที่ 125 องศาเซลเซียส

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

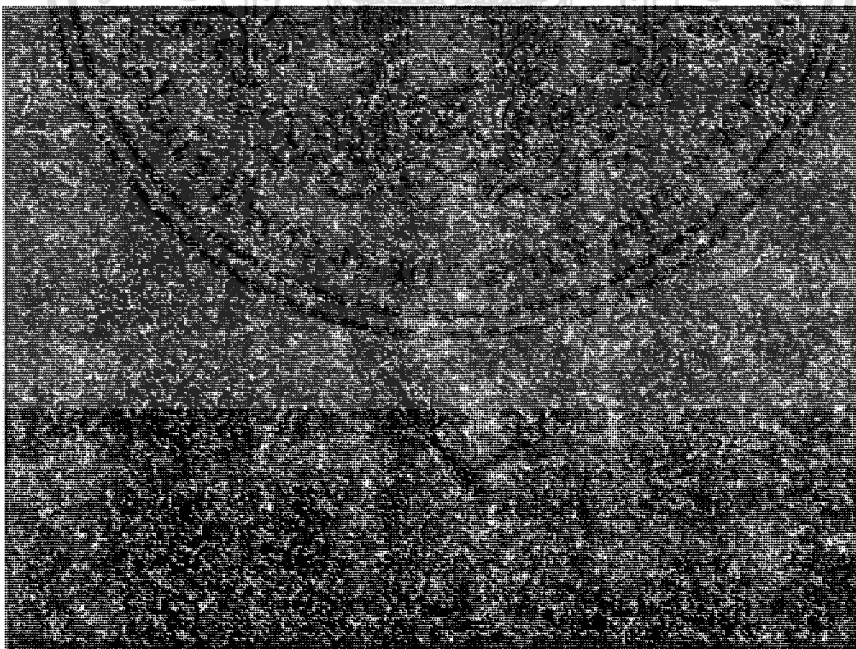
3.1 สารเคมี

- 3.1.1 เอทานอล (เกรดเชิงวิเคราะห์, 99.9 % โดยน้ำหนัก) บริษัท Lab Scan
- 3.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท Merck, Germany
- 3.1.3 โซเดียมอะลูมิเนต (NaAlO₂) บริษัท Wako, Japan
- 3.1.4 โซเดียมเมตาซิลิเกต (Na₂SiO₃) บริษัท Aldrich, US

3.2 ตัวรองรับ (Support)

ตัวรองรับที่ใช้คือ อะลูมินา ที่มีลักษณะเป็นท่อและมีรูพรุน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ 11 มิลลิเมตร ภายใน 8 มิลลิเมตรและ ยาว 4 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนประมาณ 0.4 ไมโครเมตร และค่าความเป็นรูพรุนของตัวรองรับประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ ตัวรองรับที่ใช้ผลิตโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, MTEC) แสดงดังรูปที่

3.1



รูปที่ 3.1 ตัวรองรับอะลูมินา (Alumina support)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 3.3.1 เครื่องอัดความดัน (Autoclave)
- 3.3.2 เครื่องเหวี่ยงแยกหนีศูนย์กลาง (Centrifuge)
- 3.3.3 เครื่องกวน (hot plate stirrer)
- 3.3.4 ปัมสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 3.3.5 ขวดโพลีโพลีลีน
- 3.3.6 ตู้อบ (Oven)
- 3.3.7 เต้าเผา (Carbolite)
- 3.3.8 บีกเกอร์ (Beaker)
- 3.3.9 ฟอลด์นอมอาหาร (Aluminum foil)
- 3.3.10 ถ้วยกระเบื้องเคลือบ
- 3.3.11 บิวเรต (Buret)
- 3.3.12 เครื่องชั่ง
- 3.3.13 กระบอกตวง (Cylinder)
- 3.3.14 เครื่องวัดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)
- 3.3.15 เครื่องวัดรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectroscopy, XRFs)
- 3.3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมพื้นผิวของตัวรองรับ

เตรียมพื้นผิวของตัวรองรับโดยขัดผิวด้านนอกด้วยกระดาษทรายละเอียดเบอร์ 700 ล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic bath) เป็นเวลา 15 นาที แช่ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน แล้วนำไปเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอ

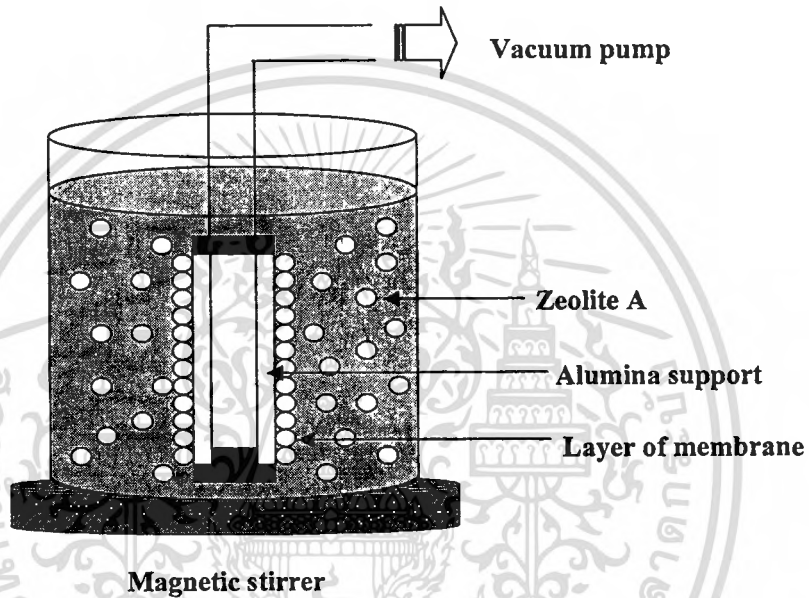
ผสม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.723 กรัม กับน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนให้เข้ากัน เทสารละลายลงในบีกเกอร์ขนาด 40 มิลลิลิตร สองส่วนเท่าๆกัน ผสม โซเดียมอะลูมิเนต 8.258 กรัม ลงในบีกเกอร์แรก ปั่นกวนจนได้สารละลายสีเหลืองใส ผสม โซเดียมเมตาซิลิเกต 15.48 กรัม ลงในบีกเกอร์ที่สอง ปั่นกวนจนได้สารละลายสีขาวใส จากนั้นเทสารละลายในบีกเกอร์ที่สองลงในสารละลายบีกเกอร์ที่หนึ่งอย่างรวดเร็ว ภายในขวดโพลีเอทิลีนโพลีโพลีลีน ขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

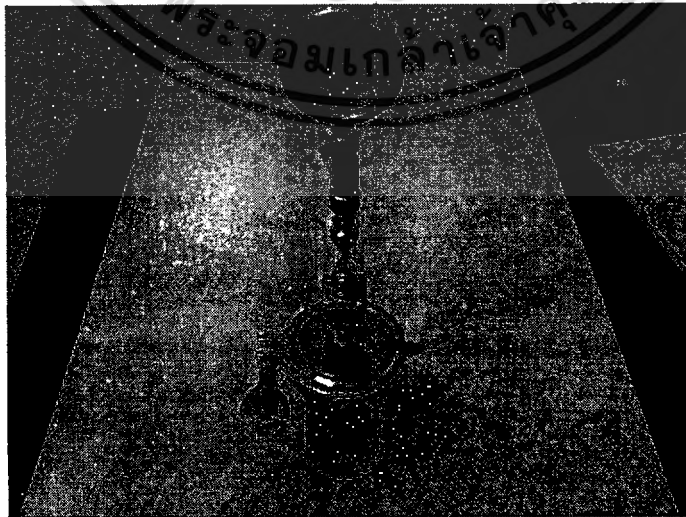
125 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเขย่าขวดประมาณ 10 นาที จะได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นเจลสีเหลืองครีม นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.4.3 การเคลือบ (coat) ซีโอไลต์เอลงบนผิวตัวรองรับอะลูมินา

ผสมซีโอไลต์เอ 0.05 กรัม กับน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร ปั่นกวนให้เข้ากันแล้วจุ่มตัวรองรับอะลูมินาที่ต่ออยู่กับชุดปั๊มสุญญากาศลงในบีกเกอร์สารละลาย โดยใช้ความดันแตกต่างกันเท่ากับ 0.5×10^2 kPa เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.2 นำเมมเบรนที่ได้บรรจุลงใน Autoclave อัดความดัน 3 บาร์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำเมมเบรนที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 546 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ชุดสำหรับ Coat ซีโอไลต์ชนิดเอลงบนผิวตัวรองรับอะลูมินา

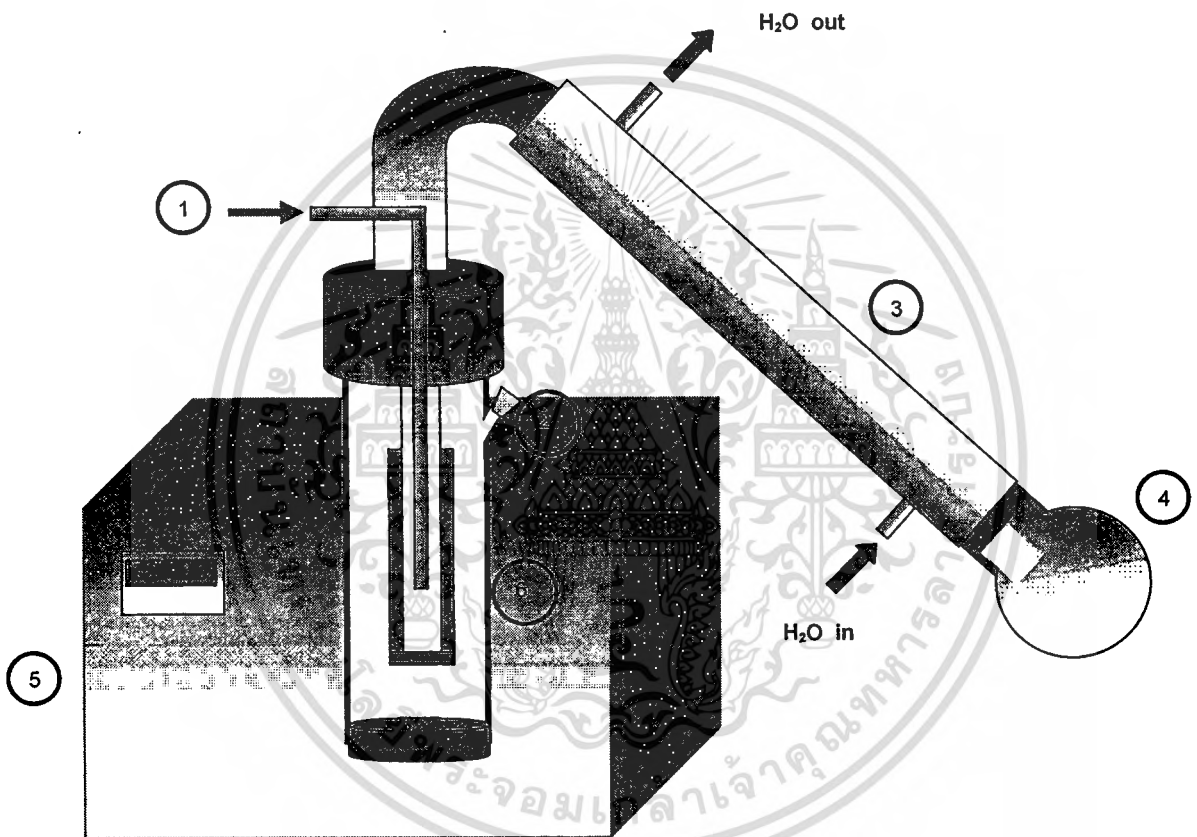


รูปที่ 3.3 เครื่อง Autoclave สำหรับอัดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน

การทดลองนี้ใช้เมมเบรนแบบท่อโดยมีการจัดวางตามแผนผังในรูปที่ 3.4 โดยป้อนสารละลายเอทานอลกับน้ำเข้าสู่รีแอกเตอร์ (6) และควบคุมความเข้มข้นของสารป้อนให้คงที่ด้วยการเติมสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านช่องเติมสาร (2) ให้ความร้อนแก่สารละลายด้วยฮีตเตอร์ (5) ใจของสารละลายที่แพร่ผ่านเมมเบรนจะเคลื่อนที่ไปยังชุดควบแน่น (condenser) (3) ด้วยแก๊สฮีเลียม (1) เป็น carrier gas และสารละลายที่ควบแน่นจะถูกเก็บไว้ที่ขวดเก็บสารผลิตภัณฑ์ (4) แล้วถูกนำไปวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง GC



รูปที่ 3.4 แผนผังกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน

- (1) ช่องการไหลของแก๊สพา (carrier gas)
- (2) ช่องสำหรับเติมสาร
- (3) ชุดควบแน่น (condenser)
- (4) ขวดเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์
- (5) Water bath
- (6) reactor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วง 75-90 องศาเซลเซียส และช่วงของความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่ศึกษา คือ 80-95 wt.% ของเอทานอล โดยทุกการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของสารละลายป้อนคงที่ คือ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ใช้ระยะเวลาในการทดลอง 1 ชั่วโมง และนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารละลาย

วิเคราะห์องค์ประกอบของสารละลายป้อน รีเทนเทท และเพอร์มิเอท โดยใช้แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph series 600, HP N19706) เครื่องตรวจหา (detector) ที่ใช้เป็นชนิด TCD ทำงานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคูบ 110 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ injection port 120 องศาเซลเซียส คอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแพ็คคอลัมน์ยาว 2 เมตร บรรจุด้วย Porapak Q ใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สพา อัตราการไหลของแก๊สพาเท่ากับ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

3.4.6 ศึกษาสัณฐานวิทยา (morphology) ของเมมเบรนเชิงประกอบด้วยกลีโกลเจอร์รอน อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ตรวจดูลักษณะของอนุภาคซีโอไลต์เอ พื้นผิวของเมมเบรนซีโอไลต์ โดยใช้การวิเคราะห์ผล SEM ยี่ห้อ EDAX รุ่น LEO 1455 VP ที่ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.4.7 ศึกษาการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) ของเมมเบรนเชิงประกอบ

ตรวจดูความเป็นผลึกและรูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ชนิดเอ โดยวัดการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer ยี่ห้อ SEIMENS รุ่น D5000 ที่ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.4.8 วิเคราะห์หา ปริมาณธาตุ องค์ประกอบของซีโอไลต์ชนิดเอ โดยการวัดรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectroscopy, XRFs) ยี่ห้อ SEIMENS รุ่น SRS 3400 ที่ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

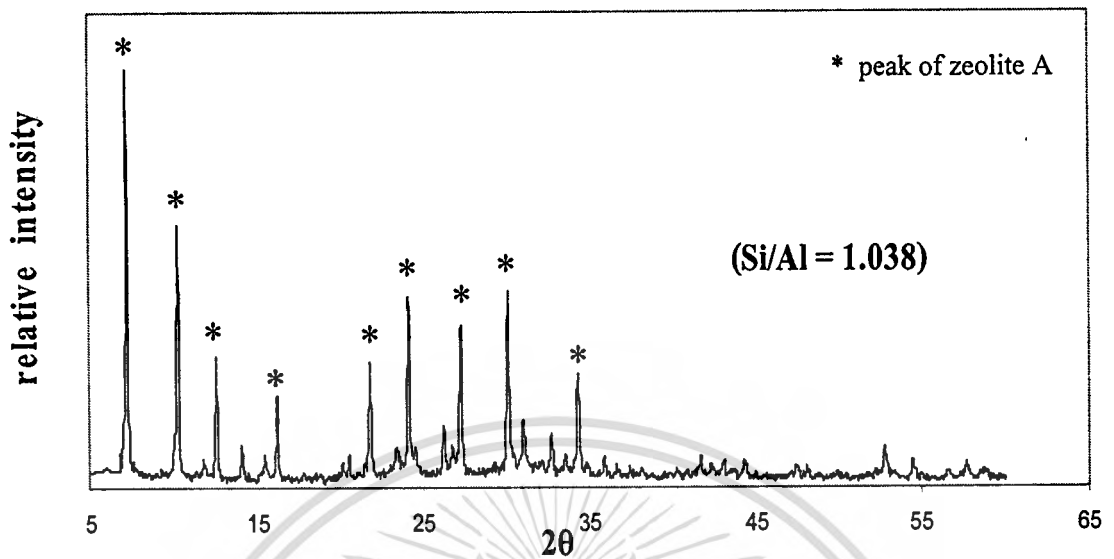
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

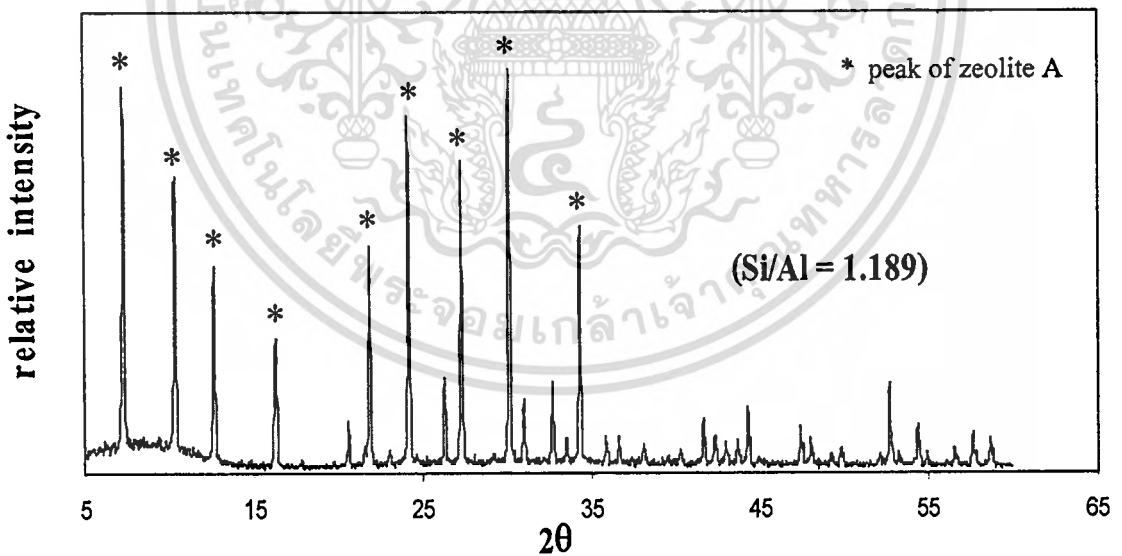
การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอ ได้แก่ ผลของอัตราส่วนโดยโมลซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 1.038, 1.189, 1.229 และ 1.319 ผลของเวลาในการตกผลึกเท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 12 ชั่วโมง โดยขั้นตอนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอ นั้น เริ่มจากเตรียมสารละลายซิลิกาและสารละลายอะลูมินา ผสมลงในขวดโพลีเอทิลีน นำไปอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส ล้างผลึกด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับ pH อยู่ในช่วง 8-9 จากนั้นนำผลึกซีโอไลต์ที่ได้ไปอบที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence Spectroscopy) วิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectroscopy) และศึกษาลักษณะรูปร่างของผลึกด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) ศึกษากระบวนการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอ พร้อมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก ได้แก่ ความหนาของเมมเบรน ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อน เท่ากับ 95, 90, 85 และ 80 wt.% และอุณหภูมิของสารละลายป้อน เท่ากับ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส

4.1 ผลของอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่อผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ

ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่มีต่อลักษณะการตกผลึกของซีโอไลต์ชนิดเอ โดยทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอที่สภาวะอุณหภูมิในการตกผลึก 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง พบว่าที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.038 และ 1.189 เกิดฟีดที่ตำแหน่ง 2θ ซึ่งใกล้เคียงกับตำแหน่งมาตรฐานของซีโอไลต์ชนิดเอทั้งคู่ แต่ฟีดของซีโอไลต์ชนิดเอที่เตรียมด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 เกิดฟีดสูงสุด นั่นแสดงว่า ซีโอไลต์ที่เตรียมได้มีความเป็นผลึกสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 และเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของสารละลายเริ่มต้นเป็น 1.229 และ 1.319 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะของกราฟ XRD แตกต่างจากกราฟมาตรฐานของซีโอไลต์เอคือ มีฟีดที่ตำแหน่งอื่นๆ ที่ไม่ใช่ตำแหน่งของซีโอไลต์ชนิดเอเกิดขึ้น ดังแสดงรูปที่ 4.3 และ 4.4 จึงอาจสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.229 และ 1.319 ซีโอไลต์ชนิดเอมีการเกิดผลึกที่ไม่สมบูรณ์ และมีองค์ประกอบอื่นผสมอยู่

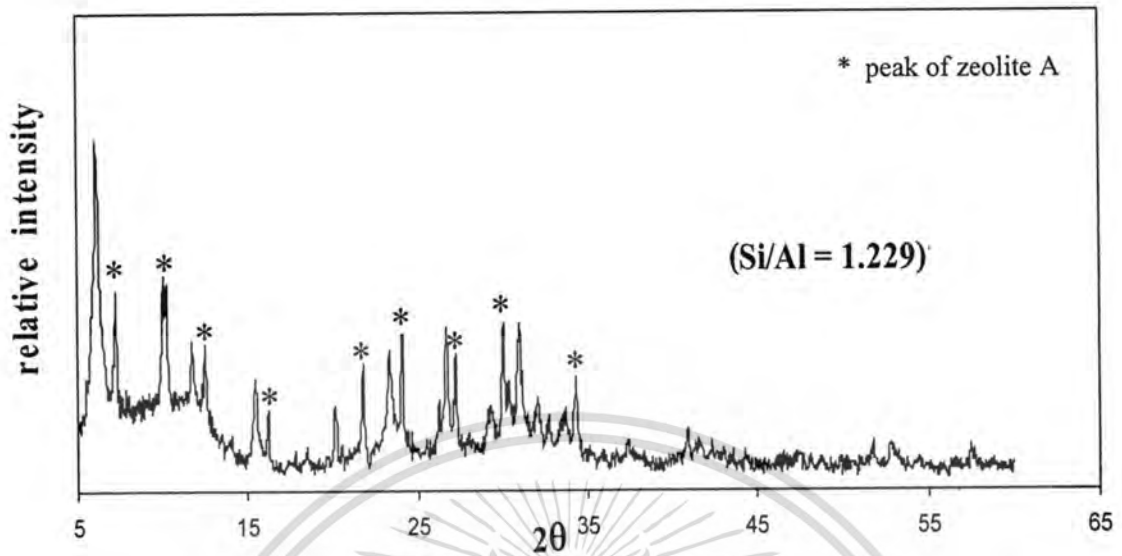


รูปที่ 4.1 XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.038

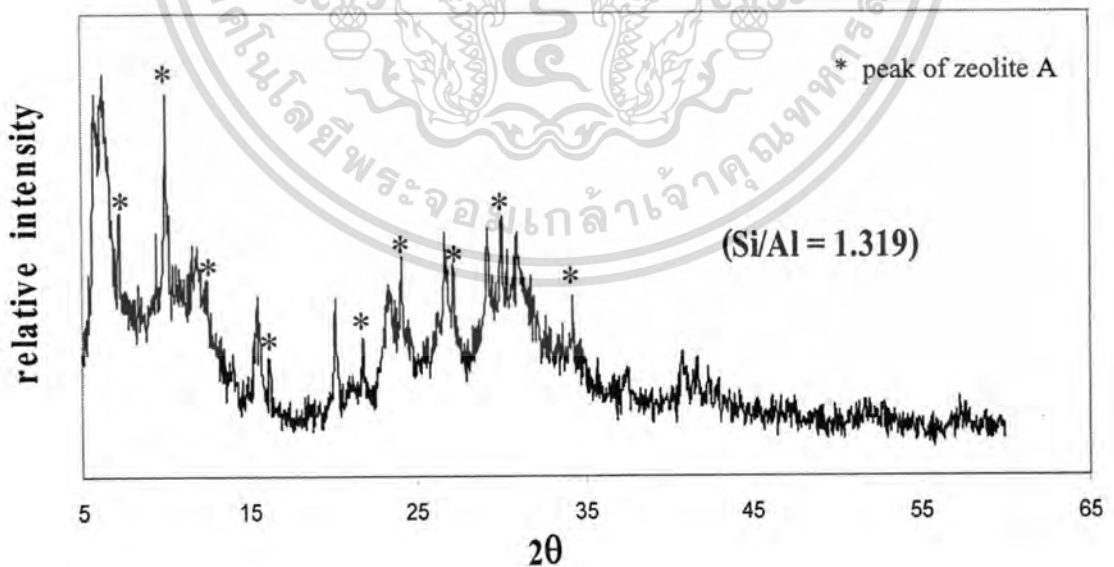


รูปที่ 4.2 XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.229



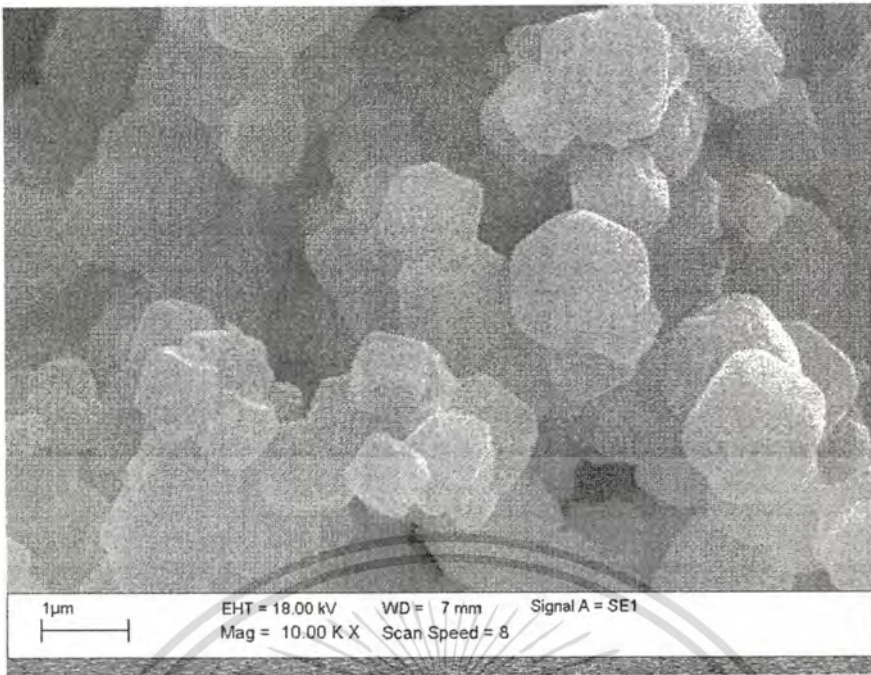
รูปที่ 4.4 XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.319

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

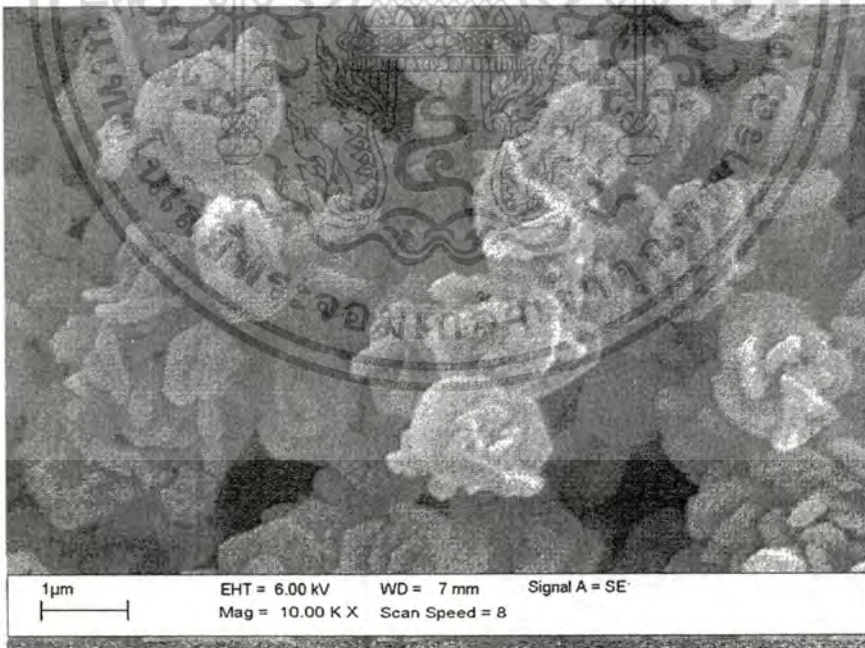
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของซีโอไลต์ชนิดเอ (XRF)

จำนวน		XRF	
Si/Al (wt.%)	Si/Al (mol)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (mol)	Si/Al (mol)
40/60	0.641	2.070	1.038
50/50	0.961	2.381	1.189
60/40	1.441	2.463	1.229
70/30	2.242	2.634	1.319

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์ชนิดเอที่สังเคราะห์ ด้วยเครื่อง XRF แสดงในตารางที่ 4.1 โดยองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์ชนิดเอที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลของ Si/Al เท่ากับ 0.641, 0.961, 1.441 และ 2.242 มีสัดส่วนโมลของ Si/Al ของซีโอไลต์ชนิดเอที่สังเคราะห์ได้ เท่ากับ 1.038, 1.189, 1.229 และ 1.319 ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่าค่าสัดส่วนโมลของ Si/Al ของซีโอไลต์ชนิดเอที่สังเคราะห์ได้มีค่าประมาณ 1 ซึ่งตรงกับสูตรโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดเอ ดังนี้ $\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$ ที่มีสัดส่วนโมลของ Si/Al เท่ากับ 1 เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดเอด้วยภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าซีโอไลต์ที่เตรียมจากอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.038 อนุภาคของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมคล้ายลูกเต๋า มีทั้งอนุภาคนขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน ส่วนอนุภาคของซีโอไลต์ที่เตรียมจากอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189, 1.229 และ 1.319 ตามลำดับ อนุภาคมีลักษณะกลมคล้ายลูกเต๋ากว้าง แต่อนุภาคของซีโอไลต์ที่เตรียมจากอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 อนุภาคมีลักษณะสมบูรณ์ที่สุดและมีขนาดใกล้เคียงกัน และอนุภาคของซีโอไลต์จะมีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น อนุภาคมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 1.431, 0.653 และ 0.254 ไมโครเมตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

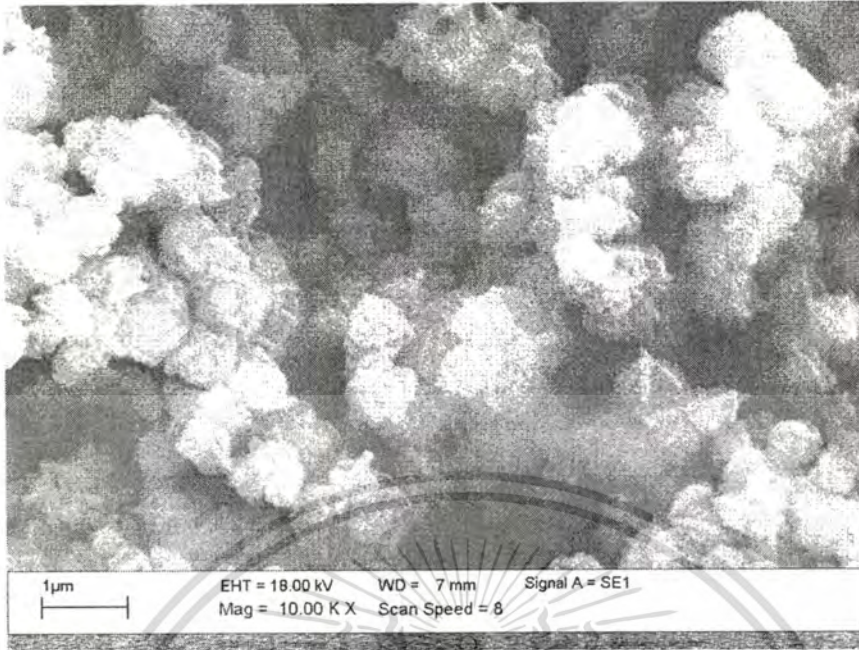


รูปที่ 4.5 SEM ซีโอไซด์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.038 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

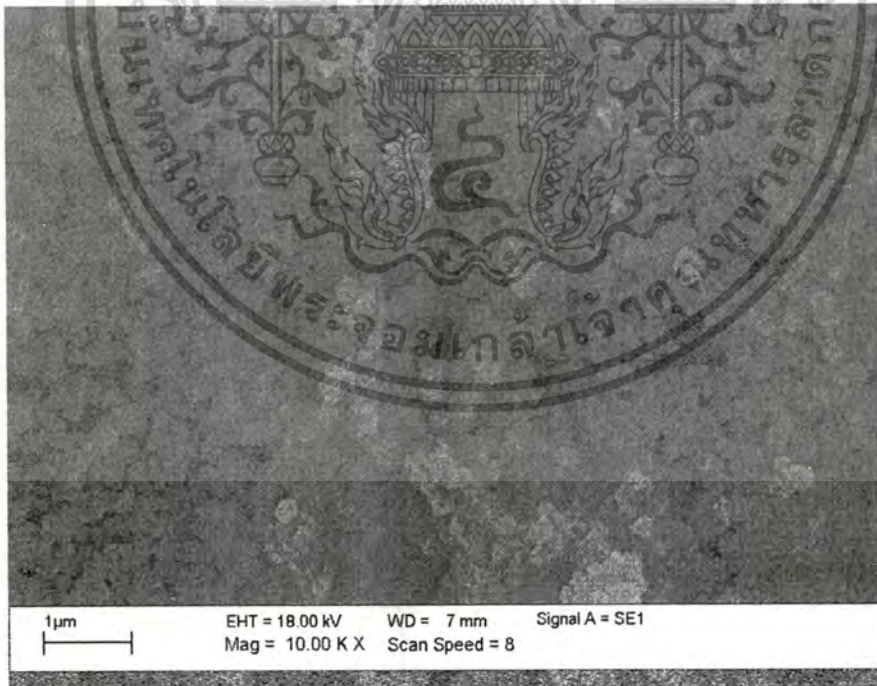


รูปที่ 4.6 SEM ซีโอไซด์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 SEM ซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.229 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

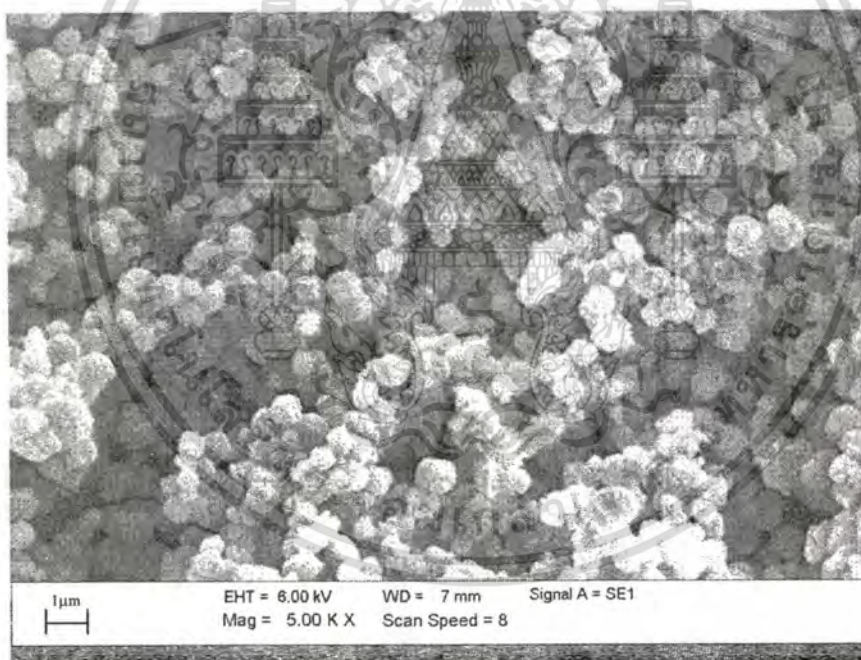


รูปที่ 4.8 SEM ซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.319 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการตกผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ

ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการตกผลึกของซีโอไลต์ชนิดเอ โดยสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิในการตกผลึก 100 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 เวลาที่ใช้ในการตกผลึกคือ 2, 4, 6, 8 และ 12 ชั่วโมง วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของซีโอไลต์ ด้วยภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่า ซีโอไลต์ชนิดเอที่เตรียมโดยใช้เวลาในการตกผลึก 2 ชั่วโมง อนุภาคมีลักษณะกลมเล็ก และรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ผลึกที่ได้ยังไม่สมบูรณ์มากนัก แสดงดังรูปที่ 4.9 เมื่อเพิ่มเวลาในการตกผลึกเป็น 4 ชั่วโมง พบว่า อนุภาคซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะคล้ายลูกตะกร้อ อนุภาคมีการกระจายตัวดีและมีขนาดใกล้เคียงกัน และผลึกที่ได้สมบูรณ์ที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.10 และเมื่อเพิ่มเวลาในการตกผลึกให้มีค่ามากขึ้น เป็น 6, 8 และ 12 ชั่วโมง พบว่า อนุภาคของซีโอไลต์ที่ได้มีลักษณะคล้ายลูกตะกร้อเหมือนเดิม แต่อนุภาคไม่สม่ำเสมอมีทั้งอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกัน ผลึกที่ได้ไม่ค่อยสมบูรณ์ และอนุภาคมีขนาดเล็กลงเมื่อเวลาในการตกผลึกนานขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 2 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

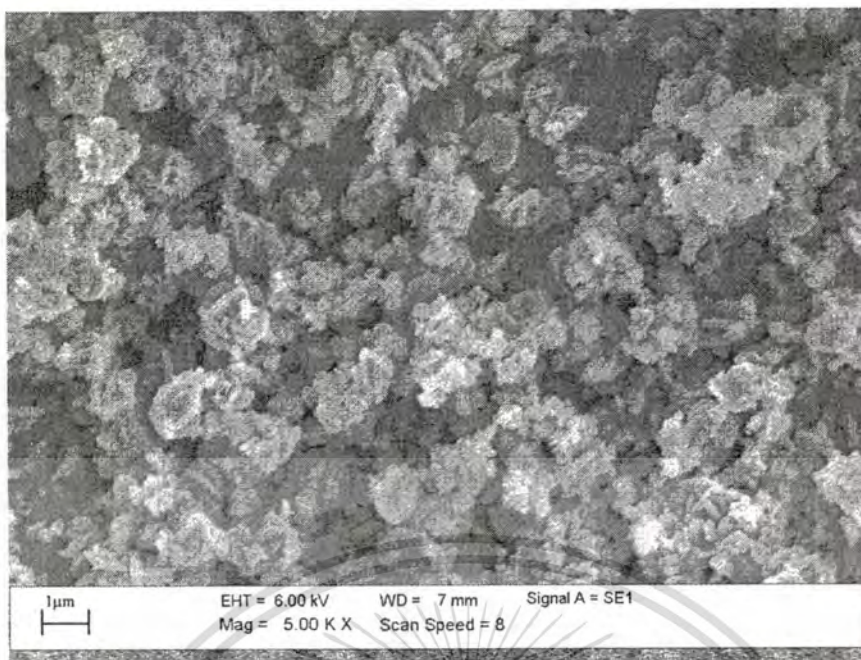


รูปที่ 4.10 SEM ซีโอไดต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

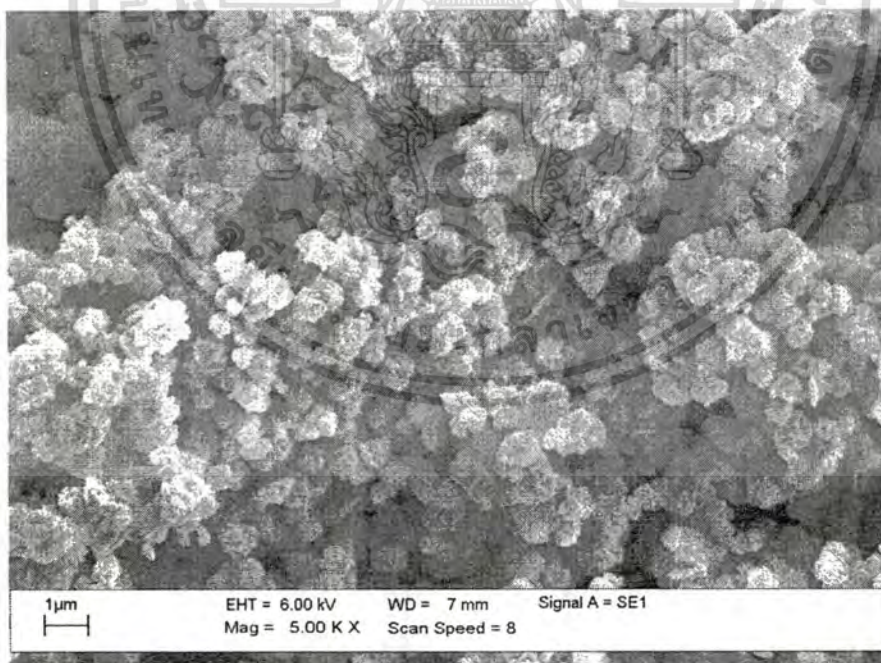


รูปที่ 4.11 SEM ซีโอไดต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 6 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 SEM ซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 8 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส



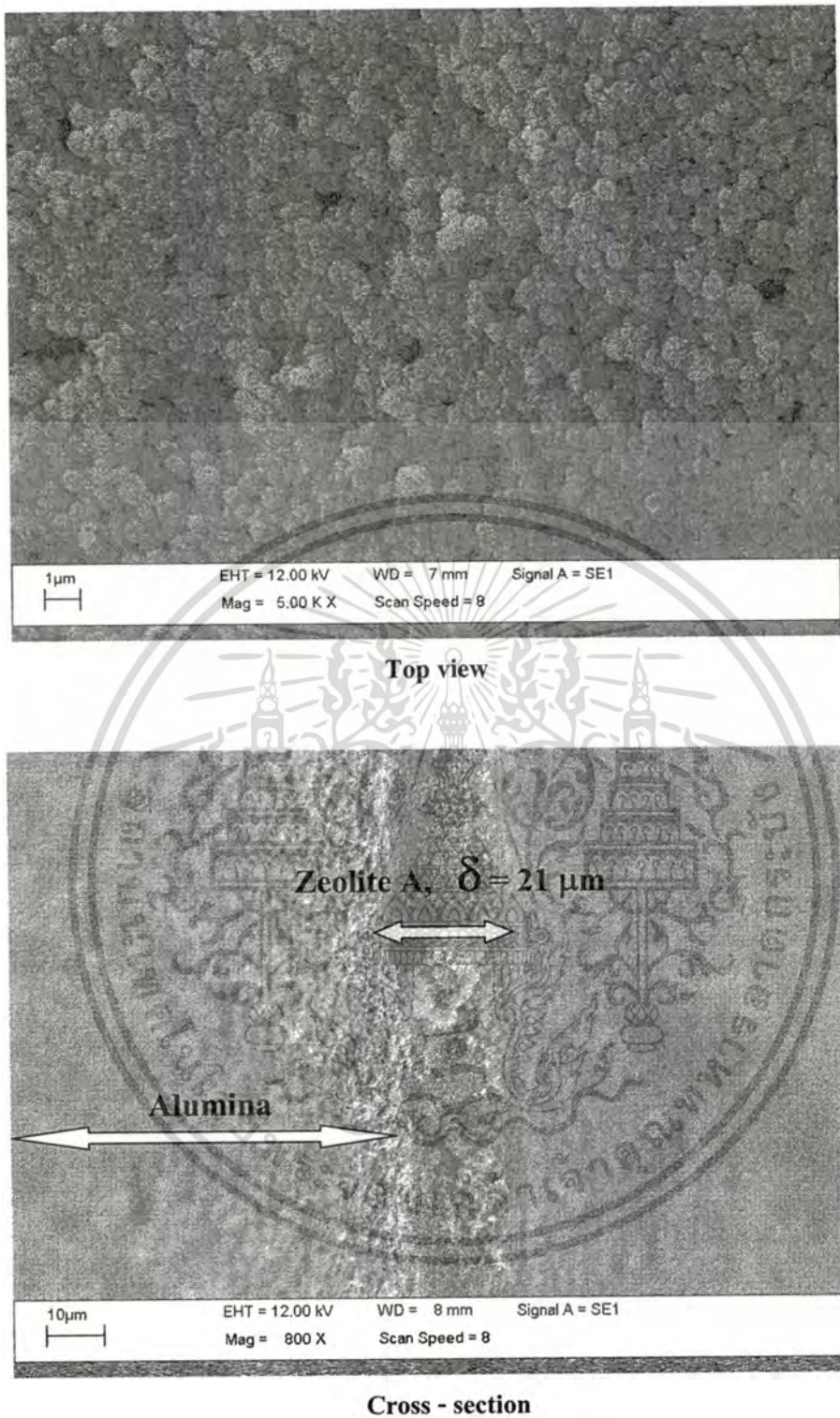
รูปที่ 4.13 SEM ซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 12 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอทีที่เคลือบบนผิวตัวรองรับอะลูมินา

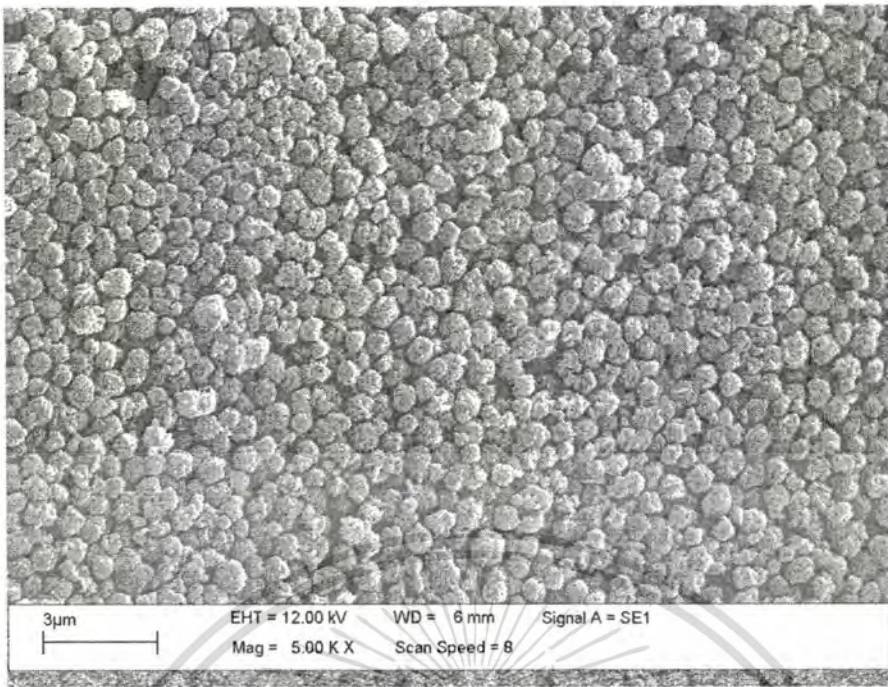
ศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอทีที่ใช้เคลือบบนผิวตัวรองรับอะลูมินาด้วยวิธีการดูดสารละลายซีโอไลต์เอผ่านผิวตัวรองรับอะลูมินาด้วยปั๊มสูญญากาศ ที่ปริมาณซีโอไลต์เท่ากับ 96, 241 และ 482 กรัมต่อตารางเมตร ที่เวลา 2 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ ด้วยภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าเมมเบรนที่เตรียมจากสารละลายที่มีปริมาณซีโอไลต์ 96 กรัมต่อตารางเมตร ผิวด้านบนของตัวรองรับอะลูมินาถูกเคลือบด้วยอนุภาคของซีโอไลต์เอไม่สม่ำเสมอ และเกิดเป็นช่องว่างบริเวณผิวที่เคลือบ โดยมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 21 ไมโครเมตร แสดงในรูปที่ 4.14 และเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์เป็น 241 กรัมต่อตารางเมตร พบว่าผิวด้านบนของตัวรองรับอะลูมินาถูกเคลือบด้วยอนุภาคซีโอไลต์อย่างหนาแน่นและอนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 91 ไมโครเมตร แสดงดังรูป 4.15 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ให้มากขึ้นเป็น 482 กรัมต่อตารางเมตร พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ที่เคลือบบนผิวตัวรองรับอะลูมินาจับตัวเป็นกลุ่มก้อนและก่อตัวเป็นผลึกขนาดใหญ่ทำให้พื้นผิวของตัวรองรับที่ถูกเคลือบไม่สม่ำเสมอมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 105 ไมโครเมตร แสดงดังรูป 4.16

เมื่อเปรียบเทียบเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอทีที่เตรียมได้ทั้ง 3 แบบ พบว่าเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอทีที่เคลือบด้วยปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอ 241 กรัมต่อตารางเมตร พื้นผิวด้านบนของตัวรองรับอะลูมินาถูกเคลือบปิดอย่างสนิทด้วยอนุภาคของซีโอไลต์ชนิดเอ พื้นผิวด้านบนของเมมเบรนเรียบสม่ำเสมอ อนุภาคของซีโอไลต์ชนิดเอมีการกระจายดีและยึดเกาะกันอย่างหนาแน่น ส่งผลทำให้เมมเบรนที่เตรียมได้มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงเลือกเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอทีที่เตรียมได้นี้ไปใช้ในการทดสอบแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ ด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน ต่อไป

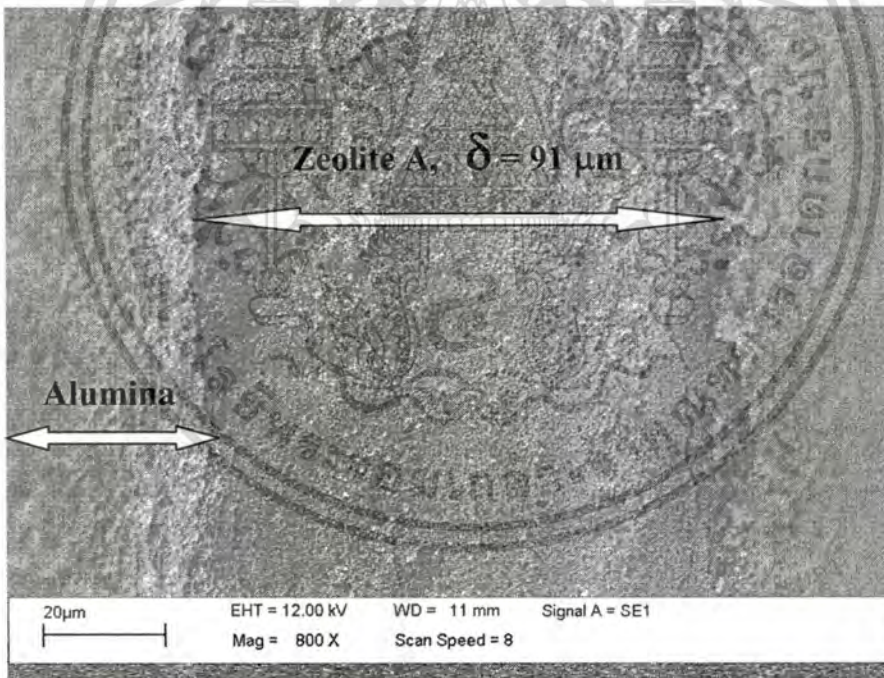


รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา: ปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอทีใช้ในการเคลือบ 96 กรัมต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



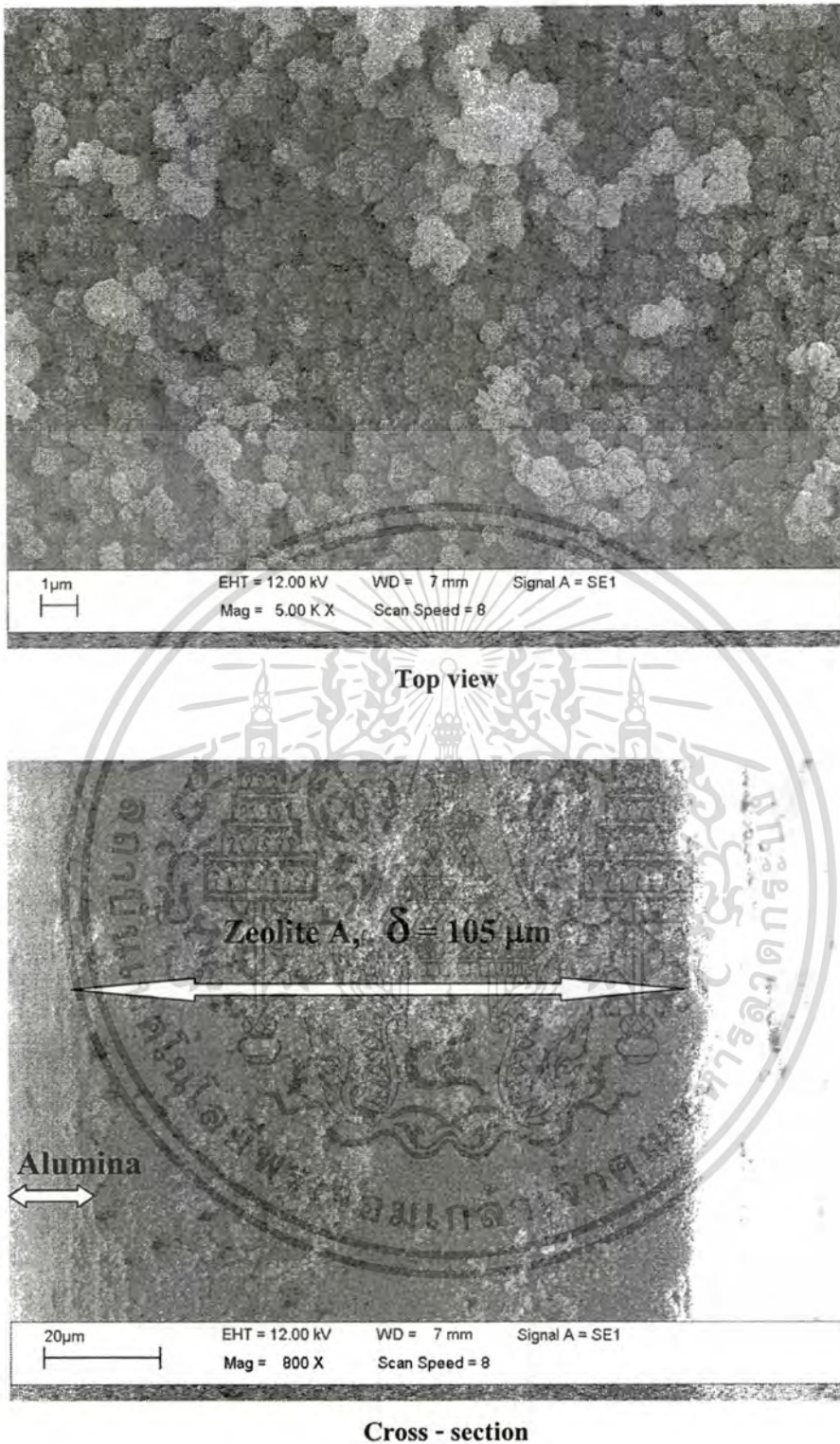
Top view



Cross - section

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา: ปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอทีใช้ในการเคลือบ 241 กรัมต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา: ปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอทีใช้ในการเคลือบ 482 กรัมต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบกระบวนการเพอร์เวปพอร์ชันของเอทานอล-น้ำ

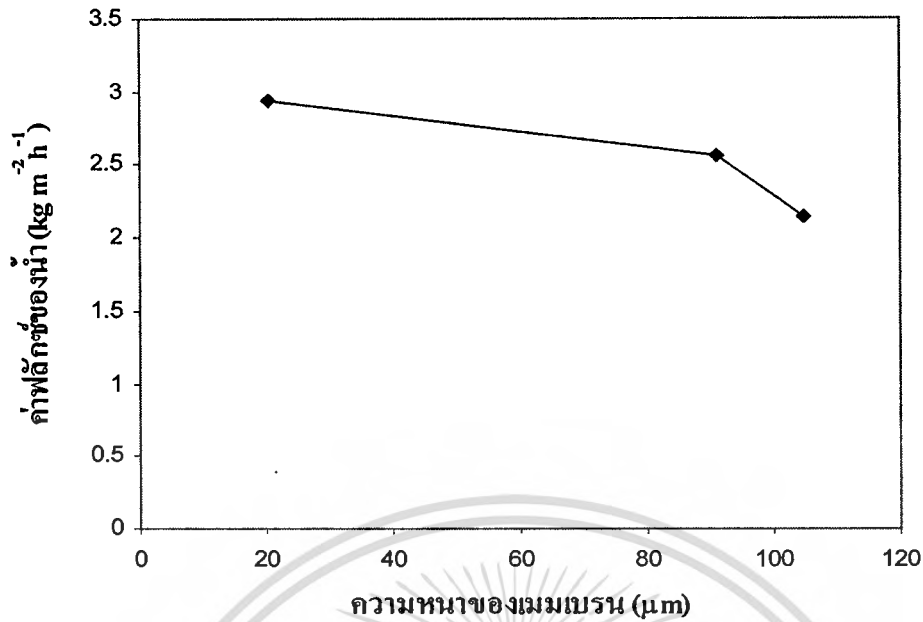
4.4.1 ผลของปริมาณซีโอไลต์เอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา

ศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์เอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินาต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์และค่าการแยกของน้ำ โดยทำการทดลองแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอทีที่มีความหนา 20, 91 และ 105 μm ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอ (δ) มีค่ามากขึ้น เนื่องจากค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์จะแปรผกผันกับ δ แสดงดังสมการที่ 6 เมื่อ δ มีความหนาเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะทางในการแพร่ผ่านของสารเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลทำให้สารแพร่ผ่านออกมาน้อยลง ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำลดลง แสดงดังรูปที่ 4.17

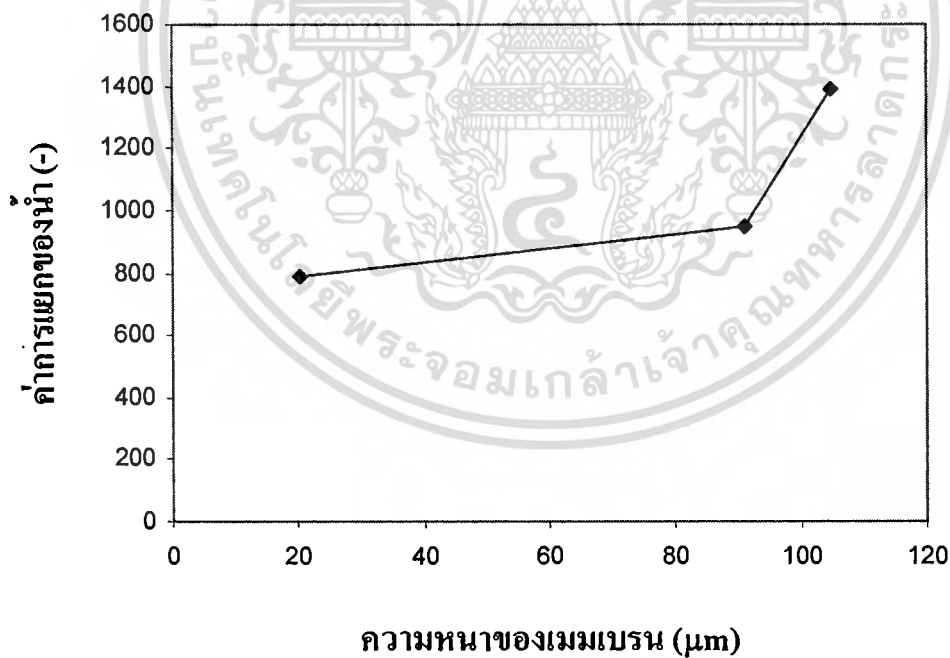
$$J = \frac{P\Delta P}{\delta} \quad (6)$$

โดยที่ J คือ ค่าฟลักซ์ ($\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$)
 δ คือ ความหนาของเมมเบรน (m)
 P คือ สภาพซึมผ่านสารของเมมเบรน (permeability)
 ($\text{kg m m}^{-2}\text{Pa}^{-1}\text{h}^{-1}$)
 ΔP คือ ผลต่างของความดัน (Pa)

ส่วนค่าการแยกของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ δ มากขึ้น เนื่องจาก δ มีค่ามากขึ้น ระยะทางในการคัดแยกโมเลกุลของน้ำกับเอทานอลก็มากขึ้นตามไปด้วย ทำให้สามารถคัดแยกโมเลกุลของน้ำออกมาได้มากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการแยกของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำต่อเอทานอลกับความหนาของเมมเบรน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส



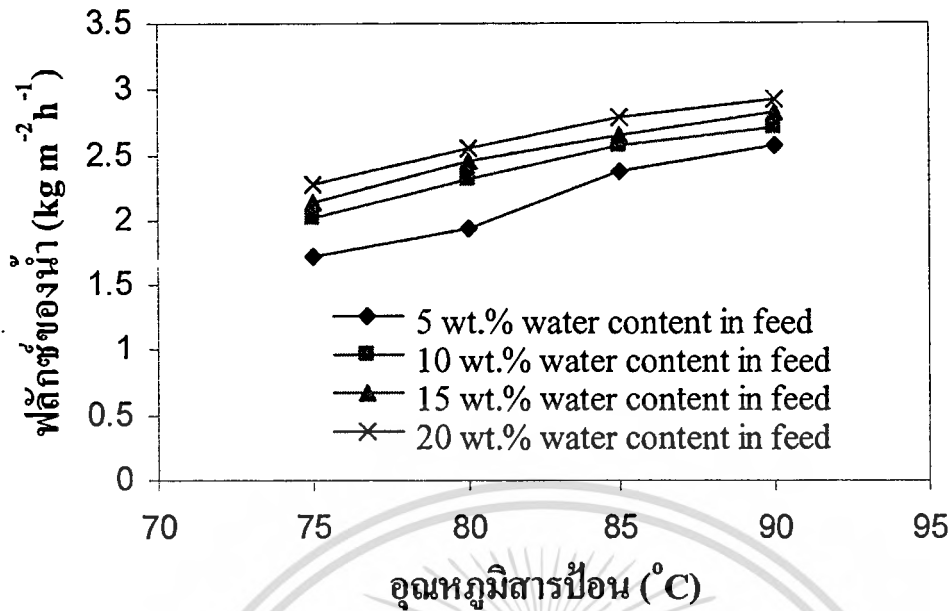
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับความหนาของเมมเบรน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

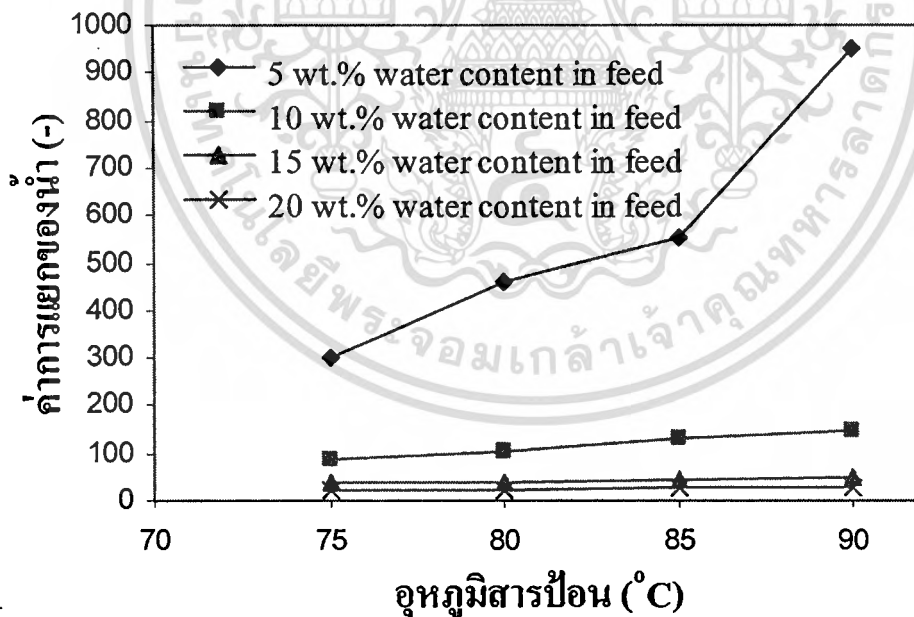
4.4.2 ผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อน

ศึกษาผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อนที่มีต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำ โดยทำการทดลองแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอที่มีความหนา 91 μm ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 wt.% และอุณหภูมิของสารละลายป้อนเท่ากับ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 75 องศาเซลเซียส ไปเป็น 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันไอมีค่ามากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving force) มากขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าฟลักซ์มีค่าเท่ากับ 1.73 ถึง 2.92 $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ และค่าการแยกมีค่าเท่ากับ 22 ถึง 949 แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่ามีผลสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Kiminori Sato และคณะ [40] ศึกษาการเตรียมซีโอไลต์ชนิด A ที่มีค่า ฟลักซ์สูงและทดสอบการแยกเอทานอล-น้ำ พบว่าค่าฟลักซ์และค่าการแยกของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.8 เป็น 4.5 $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ และค่าการแยกของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1,000 เป็น 10,000 ที่ความเข้มข้นของเอทานอล (90 wt.%) และน้ำ (10 wt.%) ในสารละลายป้อน และอุณหภูมิ 40-75 องศาเซลเซียส

เมื่อทดสอบการแยกเอทานอล-น้ำ ผ่านตัวรองรับอะลูมินา (ยังไม่เคลือบด้วย ซีโอไลต์ชนิดเอ) พบว่า ค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและคงที่ที่ค่าหนึ่ง ส่วนค่าการแยกของน้ำมีค่าคงที่ใกล้เคียงเท่ากับ 1 แสดงว่าสารละลายสามารถแพร่ผ่านผิวตัวรองรับอะลูมินาได้เกือบทั้งหมดทำให้สัดส่วนของน้ำต่อเอทานอลทั้งในเพอร์มิเอทและรีเทนเททมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ไม่เกิดการแยก แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22

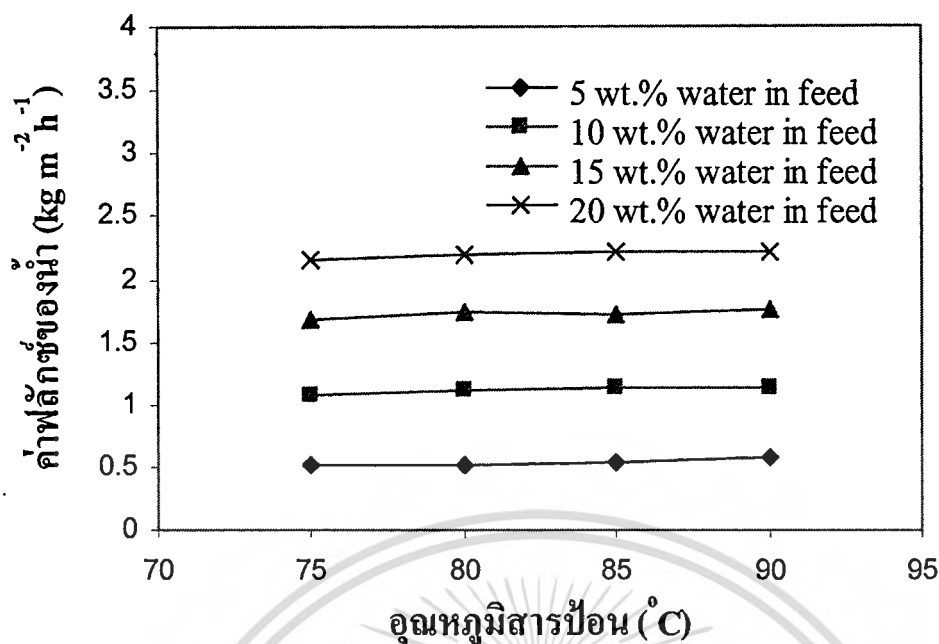


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm

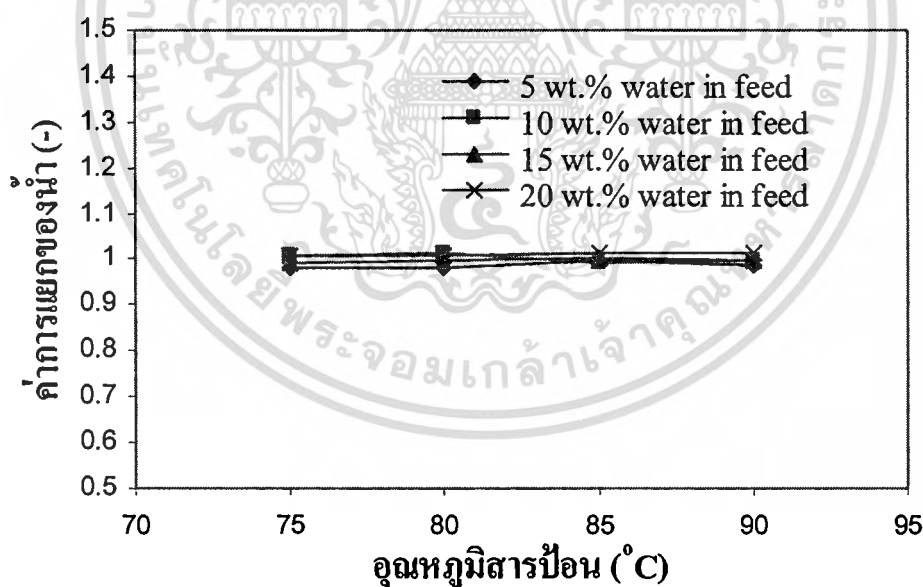


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านตัวรองรับอะลูมินาแมมเบรน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านตัวรองรับอะลูมินาแมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อน

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่มีต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำ โดยทำการทดลองแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอที่มีความหนา 90.98 μm ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 wt.% และอุณหภูมิของสารละลายป้อนเท่ากับ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของสารละลายในด้านเพอร์มิเอทและด้าน รีเทนเททมีค่าต่างกันมากขึ้น ค่า concentration gradient มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ driving force เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงดังสมการที่ 7 [45] ส่วนค่าฟลักซ์ของน้ำที่แยกด้วยตัวรองรับอะลูมินา (ยังไม่เคลือบด้วยซีโอไลต์เอ) พบว่ามีค่าน้อยกว่าค่า ฟลักซ์ที่แยกด้วยซีโอไลต์เมมเบรนชนิดเอ แสดงดังรูป 4.23

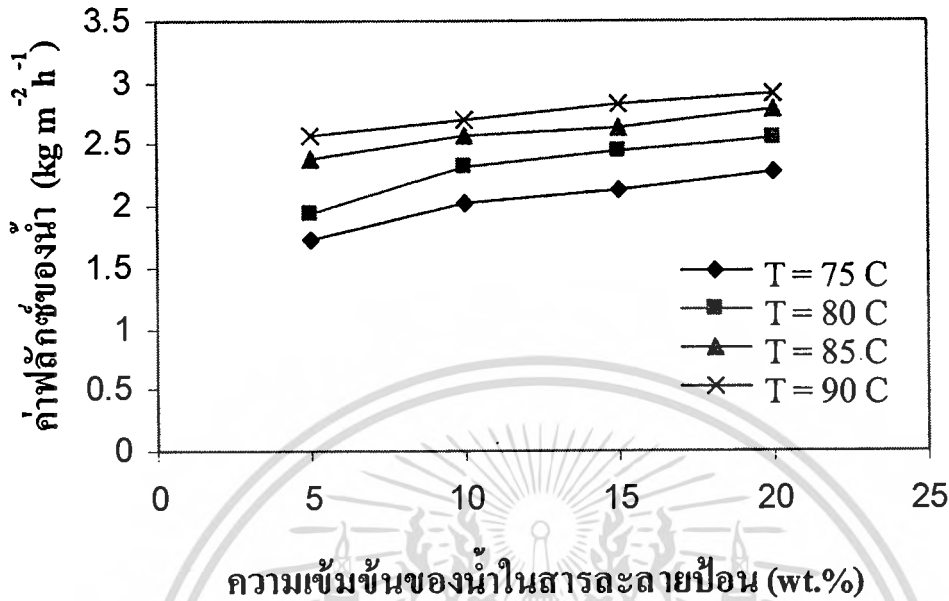
$$J_i = -D_i \frac{dC_i}{dx} \quad (7)$$

เมื่อ J_i = ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของสาร i
 D_i = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร i
 C_i = ความเข้มข้นของสาร i

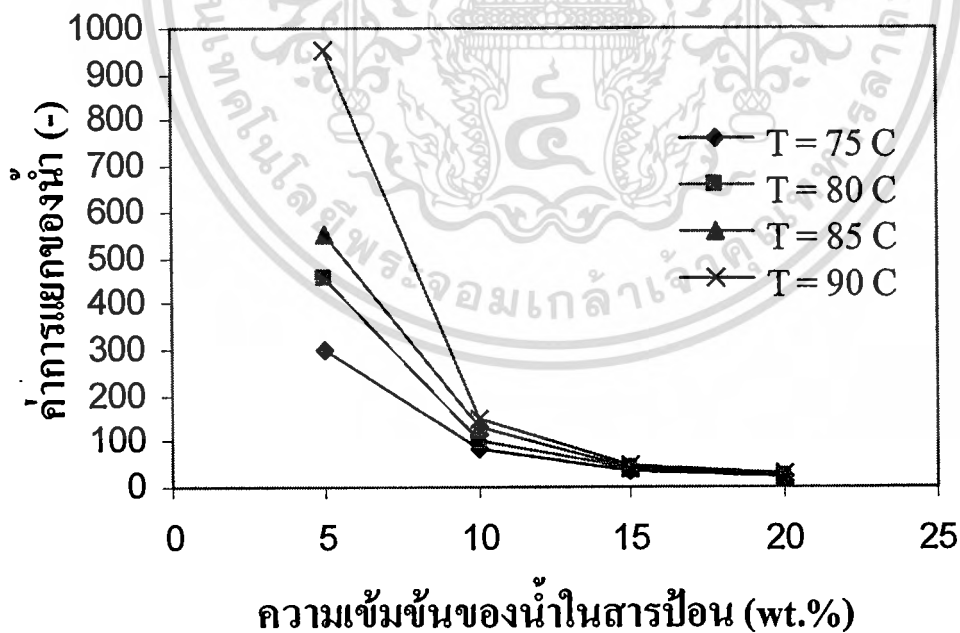
ส่วนค่าการแยกของน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก น้ำ-เอทานอล สามารถเกิด coupling effect ได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้โมเลกุลของน้ำและเอทานอลเกิดการคู่ควบ (Coupling) ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้ช้าลง [45] ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้โมเลกุลของน้ำและเอทานอลเกิดการคู่ควบเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีปริมาณน้ำที่แพร่ผ่านออกมาน้อยลง ส่งผลทำให้ค่าการแยกของน้ำมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.24 จากผลการทดลองที่ได้พบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองของ Jalal J. Jafar และคณะ[46] ทำการศึกษาการแยกของผสมแอลกอฮอล์กับน้ำด้วยกระบวนการเพอร์แวลพอเรชัน โดยใช้เมมเบรนซีโอไลต์ชนิด A พบว่า ค่า ฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1 เป็น 0.3 $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าการแยกของน้ำมีค่าลดลงจาก 10,000 เป็น 2,000 ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.025 ถึง 10 wt.% และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เมื่อทดสอบการแยกเอทานอล-น้ำ ผ่านตัวรองรับอะลูมินาพบว่า ค่าฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมากขึ้นแต่ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่า ฟลักซ์ที่แยกด้วยซีโอไลต์เมมเบรนชนิดเอ ซึ่งค่าฟลักซ์มีค่าเท่ากับ 0.467 ถึง 1.917 $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ และค่าการแยกมีค่าคงที่ใกล้เคียงเท่ากับ 1 แสดงว่าสารละลายสามารถแพร่ผ่านผิวตัวรองรับอะลูมินาได้เกือบทั้งหมดทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนของน้ำต่อเอทานอลทั้งในเพอร์มิทและรีเทนเทมมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ไม่เกิดการแยก แสดง ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26

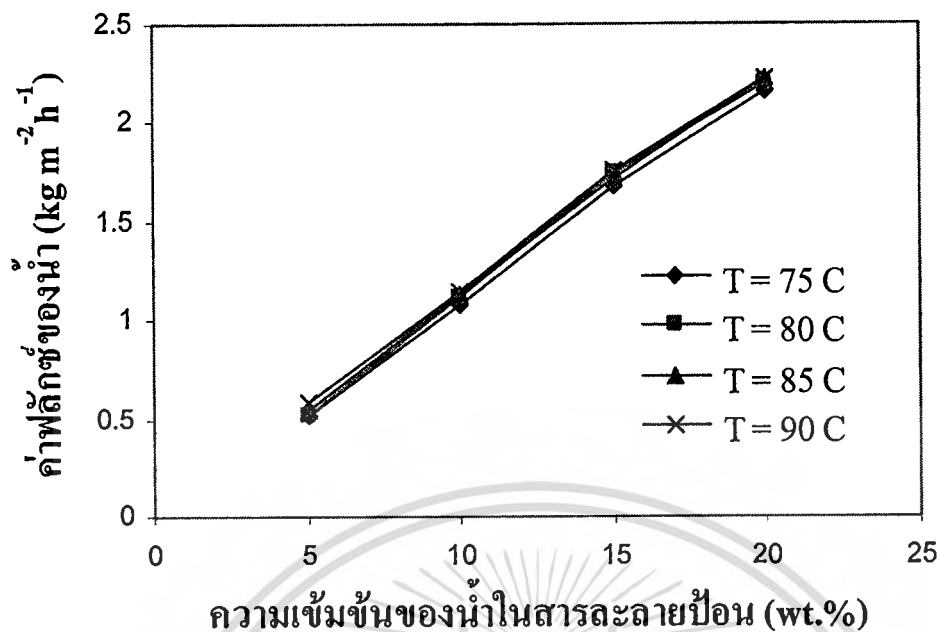


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm

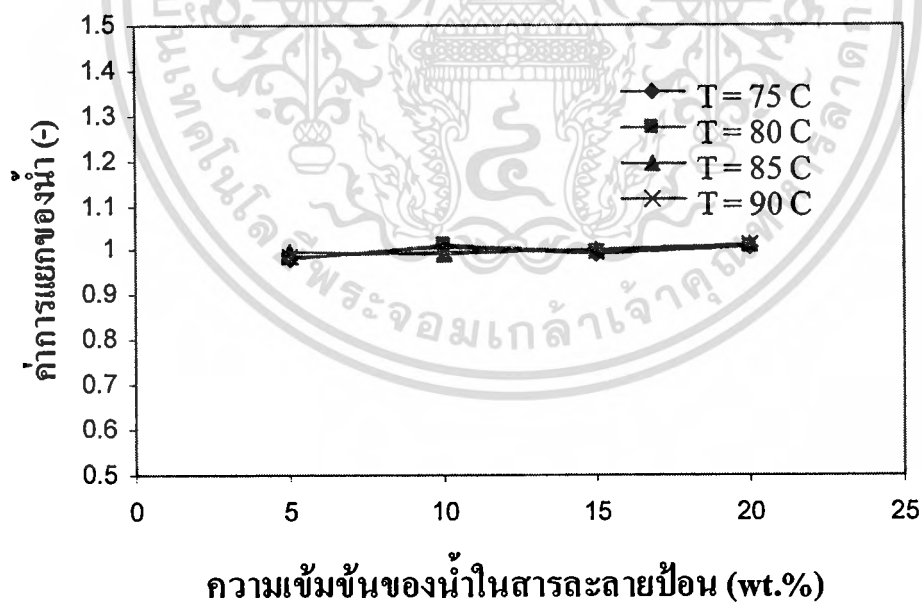


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรน



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

ซีโอไลต์ชนิดเอสามารถสังเคราะห์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ได้แก่ เวลาในการตกผลึก และอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการตกผลึกที่สมบูรณ์ที่สุดคือ 4 ชั่วโมง และอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ทำให้ความเป็นผลึกที่ดีที่สุดคือ 1.189 อนุภาคของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 685 นาโนเมตร เมื่อนำซีโอไลต์ชนิดเอที่สังเคราะห์ได้เคลือบลงบนผิวตัวกรองรับอะลูมินาเมมเบรนพบว่า เมมเบรน ซีโอไลต์ชนิดเอ มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 91 ไมโครเมตร เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของเมมเบรนด้วยการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ โดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความหนาของเมมเบรน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายป้อน พบว่าเมื่อความหนาของเมมเบรนมีค่ามากขึ้นค่าฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าลดลง ส่วนค่าการแยกของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของเมมเบรนมากขึ้น และค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายป้อนสูงขึ้น ส่วนค่าฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมากขึ้นแต่ค่าการแยกของน้ำจะมีค่าลดลง เมมเบรนที่มีความหนา 91 ไมโครเมตร ให้ค่าการแยกสูงสุดเท่ากับ 949 และค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเท่ากับ $2.57 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และเวลาในการแยก 1 ชั่วโมง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ของเมมเบรนมีค่าต่ำ ดังนั้นหากต้องการนำไปใช้งานและเพื่อต้องการเพิ่มกำลังการผลิตจึงควรเพิ่มปริมาณของสารป้อน หรืออาจเลือกใช้เมมเบรนที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า เช่น เมมเบรนแบบท่อม้วนหรือเมมเบรนแบบแผ่น

5.2.2 งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการและเป็นแนวทางการศึกษาเริ่มต้น หากต้องการนำไปใช้ควรมีการศึกษาขั้นสูงต่อไป

5.2.3 ในงานวิจัยมีการศึกษาผลของความหนาของเมมเบรนเพียง 3 ค่าเท่านั้น อาจมีการศึกษาที่ค่าอื่นๆ ที่สูงขึ้น ซึ่งค่าการแยกอาจมีค่าเพิ่มขึ้น

5.2.4 ในงานวิจัยได้เตรียมเมมเบรนโดยวิธีการดูดสารละลายผ่านผิวตัวกรองรับด้วยปั๊มสุญญากาศ ดังนั้นในการศึกษาแบบต่อเนื่องควรเคลือบด้วยวิธีการอื่นๆ เพื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ และสิทธิโชค วัลลภาทิตย์. 2547. โอกาสของมันสำปะหลังกับอุตสาหกรรม.
[Online].Available : <http://www.cassava.org/News/Starchasso>
- [2] มูลนิธิสถาบันพลังงานทดแทนเอทานอล-ไบโอดีเซลแห่งประเทศไทย. 2000. เชื้อเพลิงเอทานอล.
[Online].Available : <http://www.ethanol-thailand.com>
- [3] Kazuhisa, M. 1997. **Production of fuel alcohol from cellulosic biomass.**
สืบค้นจาก: <http://www.fao.org/docrep/W7241E/w7241e00.htm#Contents>
- [4] Seader, J. D. and Henley, E. J. 1998. **Separation Process Principle.**
New Yoek : John Wiley and Sons.
- [5] Lipniki, R.W. and Field, P.K.Ten. 1999. "Ethanol Production from Lactose in a Fermentation/
Pervaporation system." **Journal of Membrane Science.** 153 :183-189
- [6] Feng, X. and Huang, R. Y. M. 1997. "Estimation of Activation Energy for Permeation in
Pervaporation Processes." **Ind. Eng. Chem. Res.** 36 :1048-1054
- [7] Winston Ho, W.S. and Kamalesh, K.S. 1992. **Membrane Handbook.**
New York : Van Nostrand Reinhold.
- [8] Shaban, H.I. 1997. "Pervaporation Separation of Water from Organic Mixture." **Separation
and Purification Technology.** 11 : 119-126
- [9] Vauclair, C., Tarjus, H. and Schaetzel, K. 1997. "Permeselective Properties of PVA-PAA
Blended Membrane used for Dehydration of Fuel oil by Pervaporation." **Journal of
Membrane Science.** 125 : 293-302
- [10] Seok, D.R., Kang, S.G. and Hwang S.T. 1987. "Use of Pervaporation for Separating
Azeotropic Mixtures using two Different Hollow fiber Membranes." **Journal of
Membrane Science.** 179 : 185-194
- [11] Kim, J.H., Lee, K.H. and Kim, S.y. 2000. "Pervaporation Separation of Water from Ethanol
through Polyimide Composite Membrane." **Journal of Membrane Science.** 169 : 81-89
- [12] Kusakabe, K., Kuroda, T. and Morooka, S. 1998. "Separation of Carbondioxide from Nitrogen
using Ion-Exchanged Faujasite-type Zeolite Membranes Formed on Porous Support
Tubes." **Journal of Membrane Science.** 148 : 13-22

- [13] ณัฐพล ทรงประเสริฐ. 2536. “การผลิตเยื่อแผ่น เซรามิกโดยวิธี โซล-เจล เทคนิค.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [14] Kusakabe, K., Kuroda, T. and Morooka, S. 1998. “Separation of Carbondioxide From Nitrogen using Ion- Exchanged Faujasite-type Zeolite Membranes Formed on Porous Support Tubes.” **Journal of Membrane Science.** 148 : 13-22
- [15] Takaaki, M., Norikazu, N., Masahiko, M. and Korekazu. U. 2000. “Separation of Butane and Xylene Isomers with MFI-type Zeolitic Membrane Synthesized by a Vapor-Phase Transport Method.” **Journal of Membrane Science.** 178 : 25-33
- [16] Julbe, A., Farrusseng, D., Jalibert, J. C., Mirodatos, C., and Guizard, C. 2000. “Characteristics and Performance in the Oxidative Dehydrogenation of Propane of MFI and V-MFI Zeolite Membranes.” **Catalysis Today.** 56 : 199-211
- [17] Illgen, U., Schafer, R., Noack, M., Kolsch, P., Kuhnle, A. and Caro, J. 2001. “Membrane Supported Catalytic Dehydrogenation of iso-Butane using and MFI Zeolite Membrane Reactor.” **Catalysis Communications.** 2 : 339-348
- [18] Kita, H., Horii, K., Ohtoshi, Y., Tanaka, K. and Okamoto, K. 1995. “Synthesis of a Zeolite NaA Membrane for Pervaporation of Water/Organic Liquid Mixtures.” **Journal of Membrane Science.** 5 : 206-215-314
- [19] Yan, Y., Davis, M.E. and Gavalas, G.R. 1997. “Use of Diffusion Barriers in the Preparation of Supported Zeolite ZSM-5 Membranes.” **Journal of Membrane Science.** 53 : 126-137
- [20] Boudreau, L.C. and Tsapatsis, M. 1997. “A highly Oriented thin Film of Zeolite A.” **Chemistry of Materials.** 9 : 1705-1720
- [21] Yan, Y., Chaudhuri, S.R. and Sarkar, A. 1996. “Synthesis of Oriented Zeolite Molecular sieve Films with Controlled Morphologies.” **Chemistry of Materials.** 8 : 473-489
- [22] Yan, Y. and Bein, T. 1995. “Zeolite thin Films with Tunable Molecular sieve Function.” **Journal of the American Chemical Society.** 117 : 90-99.
- [23] Kusakabe, K., Kuroda, T. and Morooka, S. 1998. “Separation of Carbondioxide from Nitrogen using ion-Exchanged Faujasite-type Zeolite Membranes forme Donporous Support Tubes.” **Journal of Membrane Science.** 148 : 13-26
- [24] Nomura, M., Yamaguchi, T. and Nakao, S. 1997. “Silicate Membranes Modified by Counter Diffusion CVD Technique.” **Ind. Eng. Chem. Res.** 36 : 4217-4230

- [25] Aoki, K., Tuan, V.A., Falconer, J.L. and Noble, R.D. 2000. "Gas Permeation Properties of ion-Exchanged ZSM-5 Zeolite Membranes." **Microporous and Mesoporous materials.** 39 : 485-497
- [26] Yan, Y., Davis, M.E. and Gavalas, G.R. 1995. "Preparation of Highly Selective Zeolite Membranes by Apost- synthetic Coking Treatment." **Journal of Membrane Science.** 123 : 95-108
- [27] คณิงรัตน์ พุ่งสงค์ และสุชาติ วิโรจน์ยืนยง. 2543 "การดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วยซีลิคาเจล, ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY." วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [28] King, R.B. 1994. **Encyclopedia of inorganic chemistry.** Chichester : John Wiley, 4365 – 4391
- [29] ภาณุสิทธิ์ ชูระท่า. 2544. "การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้าจากเถ้าลอยถ่านลิกไนต์." สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [30] Szoztak, R. 1989. **Molecular Sieve Principle of Synthesis and Identification.** New York : Van Norstrand Reingold. 1-50
- [31] Mrier, W.M. and Olson, D.H. 1992. **Atlas of Zeolite Structure Type, 3rd** revised ed., int. zeolite Assoc. Boston: Butterworth – Heiemann,
- [32] Chen William, N.Y., Garwood, E. and Dwyer, F.G. 1996. **Shape Selective Catalysis in Industrial Applications.** 2nd ed. New York : Mardel Dekker.
- [33] Hagen, J. 1999. **Industrial Catalysis.** Wiley – VCH : A practical approach.
- [34] Mintova, S., Valtchev, V., Onfroy, T., Marichal, C., Knozinger, H. and Bein. 2006. "Variation of the Si/Al Ratio Nanosized Zeolite Beta Crystals." **Microporous and Mesoporous Materials.** 90 : 237-248
- [35] Jon, H., Lu, B., Oumi, Y., Itabashi, K. and Sano. 2006. "Synthesis and Thermal Stability of Beta Zeolite using Ammonium Fluoride." **Microporous and Mesoporous materials.** 89 : 88-98
- [36] Auerbach, S.M., Carrado, K.A and Dutta, P.K. 2003. **Handbook of Zeolite Science and Technology.** New York : Mardel Dekker.
- [37] Ding, L., Zheng, Y., Zhang, Z., Ring, Z. and Chen J. 2006. "Effect of Agitation On the Synthesis of Zeolite Beta and its Synthesis Mechanism in Absence of Alkali Cations." **Microporous and Mesoporous Materials.** 94 :1-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [38] Schmidt, W., Toktarev, A., Schuth, F., Lone, G.K. and Unger, K, K. 1998. "The Influence of Different Silica Source on the Crystallization Kinetics of Zeolite Beta." **Journal of Membrane Science.** 12 : 241-252
- [39] Mathesh, K.S. and Guest, A. 2004. **Pervaporation: An Overview.**
[Online].Available : <http://www.cheresources.com/pervaporation.shtml>
- [40] Kiminori, S., Kazunori, S., Takashi, N. 2008. "Preparation of Higher Flux NaA Zeolite Membrane on Asymmetric porous Support and Permeation Behavior at Higher Temperatures up to 145 C in Vapor Permeation." **Journal of Membrane Science.** 307 : 181-188
- [41] Aisheng, H. and Weishen, Y. 2007. "Electrophoretic Technique for Hydrothermal Synthesis of NaA Zeolite Membranes on Porous α - Al_2O_3 Supports." **Materials Research Bulletin.** 42 : 657-667
- [42] Mansoor, K. and Toraj, M. 2006. "Preparation of NaA Zeolite Membranes for Separation of Water/UDMH Mixtures." **Separation and Purification Technology.** 47 : 173-187
- [43] Jeong-Hoon, K., Kew-Ho, L. and Sang, Y. Kim. 2000. "Pervaporation Separation of Water from Ethanol through Polyimide Composite Membranes." **Journal of Membrane Science.** 169 : 81-96
- [44] สุภาพร ฉิ้นฉิ้ว และไพบุลย์ อินนาจิตร. 2548. "การแยกเอทานอล-น้ำ โคนวิธีเพอร์เวปอเรชัน ด้วยเมมเบรนชนิดวิลิโคนและโพลีไวนิลแอลกอฮอล์." สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลตรา.
- [45] ชันทอง สุนทรภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [46] Jalal J. J. and Peter M. B. 1997. "Separation of Alcohol/Water Mixtures by Pervaporation through Zeolite A Membranes." **Microporous and Mesoporous materials.** 12 : 305-318
- [47] รัตนา จิระรัตนานนท์. 2541. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [48] Gonzalez – Velasco, J.R., Gonzalez-Marcos, J.A. and Lopez – Dehesa, C. 2002. "Pervaporation of Ethanol – Water Mixture through Poly(1-trimethylsilyl-1-propyne)(PTMSP) Membranes." **Desalination.** 149 : 61-74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [49] Li, S., Tuan, V.A., Nobel, R.D. and Falconer, J.L. 2002. "ZSM-11 Membranes: Characterization and Pervaporation Performance." **AICHE Journal**. 48 : 269-279
- [50] Molina, J.M., Vatai, G. and Bekassy – Molnar, E. 2002. "Comparison of Pervaporation of Different Alcohols from Water on CMG – OM – 010 and 1060 Sulzer Membrane." **Desalination**. 149 : 89-104
- [51] Chang, C. L. and Chang, M. S. 2004. "Preparation of Muti – layer Silicone/PVDF Composite Membranes for Pervaporation of Ethanol Aqueous Solution." **Journal of Membrane Science**. 238 : 117-125
- [52] Aisheng, H., Weishen Y. and Jie, L. 2007. "Synthesis and Pervaporation Properties of NaA Zeolite Membranes Prepared with Vacuum-assisted Method." **Separation and Purification Technology**. 56 :158-170
- [53] Marc, P.T., Joan, L., Fidel C., Reyes M. and Jesu, S. 2005. "Preparation of Zeolite NaA Membranes on the inner side of Tubular Supports by means of a Controlled Seeding Technique." **Catalysis Today**. 104 : 281-290
- [54] Pina, M.P., Arruebo, M., Felipe, M., Fleta, F., Bernal, M.P., Coronas, J., Menendez, M. and Santamaria, J. 2004. "A Semi-Continuous Method for the Synthesis of NaA Zeolite Membranes on Tubular Supports." **Journal of Membrane Science**. 244 : 141-151



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลการทดลองเพอร์เวปพรेशन

ตาราง ก.1 เพอร์เวปพรेशनของเอทานอล เพอร์เมทริกซ์ของน้ำ และการแยกของน้ำที่เกี่ยวกับเอทานอล ที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างกัน (เอทานอล/น้ำ) เท่ากับ 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 wt.% และอุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 ไมโครเมตร เวลาในการแพร่ ผ่าน 1 ชั่วโมง

Ethanol-Water (wt.%)	Temperature (°C)	W ^{total} (g)	J _{water} (kg/m ² h)	J _{ethanol} (kg/m ² h)	α _{water/ethanol}
95-5	75	0.385	1.730	0.109	302.182
	80	0.425	1.945	0.081	457.537
	85	0.517	2.382	0.082	550.121
	90	0.548	2.569	0.051	949.431
90-10	75	0.467	2.019	0.213	85.328
	80	0.528	2.312	0.204	101.953
	85	0.574	2.565	0.177	130.568
	90	0.602	2.703	0.164	148.794
85-15	75	0.514	2.133	0.320	37.794
	80	0.587	2.450	0.345	40.295
	85	0.628	2.642	0.346	43.232
	90	0.665	2.833	0.335	47.900
80-20	75	0.566	2.279	0.422	21.581
	80	0.625	2.552	0.419	24.368
	85	0.673	2.782	0.434	25.614
	90	0.701	2.917	0.431	27.066

ตาราง ก.2 ความเข้มข้นของเอทานอลกับน้ำ ในเพอร์มีเอท ที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (เอทานอล/น้ำ) เท่ากับ 95/5, 90/10, 85/15 และอุณหภูมิสารป้อน 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 ไมโครเมตร เวลาในการแพร่ผ่าน 1 ชั่วโมง

EtOH-H₂O (wt.%)	T (°C)	Ethanol in permeate (wt.%)	Water in permeate (wt.%)	Total permeate (wt.%)
95-5	75	5.906	93.934	99.840
	80	3.973	95.677	99.650
	85	3.328	96.351	99.679
	90	1.961	98.011	99.972
90-10	75	9.536	90.412	99.948
	80	8.082	91.551	99.632
	85	6.441	93.450	99.891
	90	5.680	93.898	99.577
80-20	75	13.012	86.784	99.796
	80	12.272	87.265	99.537
	85	11.532	87.982	99.514
	90	10.537	89.071	99.608
80-20	75	15.606	84.201	99.807
	80	14.016	85.386	99.402
	85	13.497	86.425	99.922
	90	12.861	87.023	99.883

ตาราง ก.3 เฟอร์มิเอทฟลักซ์ของเอทานอล เฟอร์มิเอทฟลักซ์ของน้ำ และค่าการแยกของน้ำ ที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน(เอทานอล/น้ำ) เท่ากับ 95/5 wt.% และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการแพร่ผ่าน 1 ชั่วโมง ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 20, 91 และ 105 ไมโครเมตร

Thickness of membrane (μm)	J_{water} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$)	J_{ethanol} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$)	$\alpha_{\text{water/ethanol}}$
20	2.941	0.071	787.84
91	2.569	0.051	949.431
105	2.139	0.029	1393.456

ตาราง ก.4 เพอร์มิเอทฟลักซ์รวม เพอร์มิเอทฟลักซ์ของเอทานอล เพอร์มิเอทฟลักซ์ของน้ำ ที่ความเข้มข้นของเอทานอล-น้ำ ในสารป้อนเท่ากับ 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 wt.% และอุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ผ่านตัวกรองรับอะลูมิเนียมเบรอน เวลาในการแพร่ผ่าน 1 ชั่วโมง

EtOH-H ₂ O (wt.%)	T (°C)	Ethanol in permeate		Water in permeate		Total permeate	
		(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)	(wt.%)
95-5	75	4.913	95.079	99.992			
	80	4.887	94.764	99.650			
	85	4.976	94.880	99.857			
	90	4.920	94.521	99.441			
90-10	75	10.039	89.767	99.806			
	80	10.095	89.862	99.957			
	85	9.923	89.950	99.873			
	90	9.966	89.856	99.821			
85-15	75	14.872	84.847	99.719			
	80	14.982	85.007	99.989			
	85	15.008	84.941	99.949			
	90	14.949	85.014	99.962			
80-20	75	19.931	79.098	99.029			
	80	19.998	79.337	99.335			
	85	20.058	79.214	99.272			
	90	20.041	79.107	99.148			

ตาราง ก.5 เพอร์มิเอทฟอสเฟตของทานอด เพอร์มิเอทฟอสเฟตของน้ำ และค่าการแยกของน้ำ ที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (เอทานอล/น้ำ) 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 wt.% และอุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ผ่านตัวกรองรับอะลูมินาเมมเบรน เวลาในการแพร่ผ่าน 1 ชั่วโมง

Ethanol-Water (wt.%)	Temperature (°C)	J_{water} (kg/m ² h)	$J_{ethanol}$ (kg/m ² h)	$\alpha_{water/ethanol}$
95-5	75	0.520	10.063	0.982
	80	0.520	10.079	0.980
	85	0.548	10.441	0.997
	90	0.580	11.134	0.989
90-10	75	1.084	9.689	1.006
	80	1.121	9.975	1.011
	85	1.132	10.264	0.993
	90	1.150	10.365	0.998
85-15	75	1.681	9.592	0.993
	80	1.742	9.883	0.999
	85	1.715	9.705	1.001
	90	1.756	9.985	0.996
80-20	75	2.163	8.583	1.008
	80	2.204	8.746	1.008
	85	2.224	8.781	1.013
	90	2.227	8.792	1.013

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำ และวิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานเอทานอล-น้ำ เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำ

1.1 วิธีการเตรียมสารละลายเอทานอล-น้ำ

เตรียมสารละลายเอทานอล 20, 40, 60, 80, 90, 95, 97 และ 99.99 wt.% โดยชั่งเอทานอลชนิดเข้มข้น 99.99 wt.% และชั่งน้ำกลั่นตามความเข้มข้นต่างๆ ที่กำหนด แสดงดังตาราง ข.1 ผสมลงในขวดเก็บตัวอย่าง โดยในแต่ละความเข้มข้นสารละลายจะมีน้ำหนักรวม 10 กรัม จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งแสดงดังตารางที่ ข.1

ตาราง ข.1 น้ำหนักของเอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ สำหรับเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล (wt.%)	น้ำหนักของเอทานอล (g)	น้ำหนักของน้ำ (g)
20	2	8
40	4	6
60	6	4
80	8	2
90	9	1
95	9.5	0.5
97	9.7	0.3
99.99	99.99	0

1.2 วิธีการวิเคราะห์

ใช้เข็มฉีดยา (ซึ่งผ่านการกั้วล้าง 3 ครั้งด้วยสารที่ต้องการวิเคราะห์) ฉีดสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาตร 1 ไมโครลิตร จากนั้นฉีดสารละลายตัวอย่างลงไปในรูสำหรับฉีดวิเคราะห์สาร (Injection port) ของเครื่อง GC เครื่องจะวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบของสารแต่ละตัวที่ฉีดเข้าไป และจะแสดงผลออกมาเป็นพื้นที่ใต้พีคของสารแต่ละตัว (หน่วย mV.s) จากนั้นนำค่าพื้นที่ใต้พีคที่คำนวณได้ไปพล็อตกราฟสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคของสารแต่ละตัวกับน้ำหนักของสารแต่ละตัวในสารละลายที่เตรียม (หน่วย wt.%) และกราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำ แสดงในภาคผนวก ค

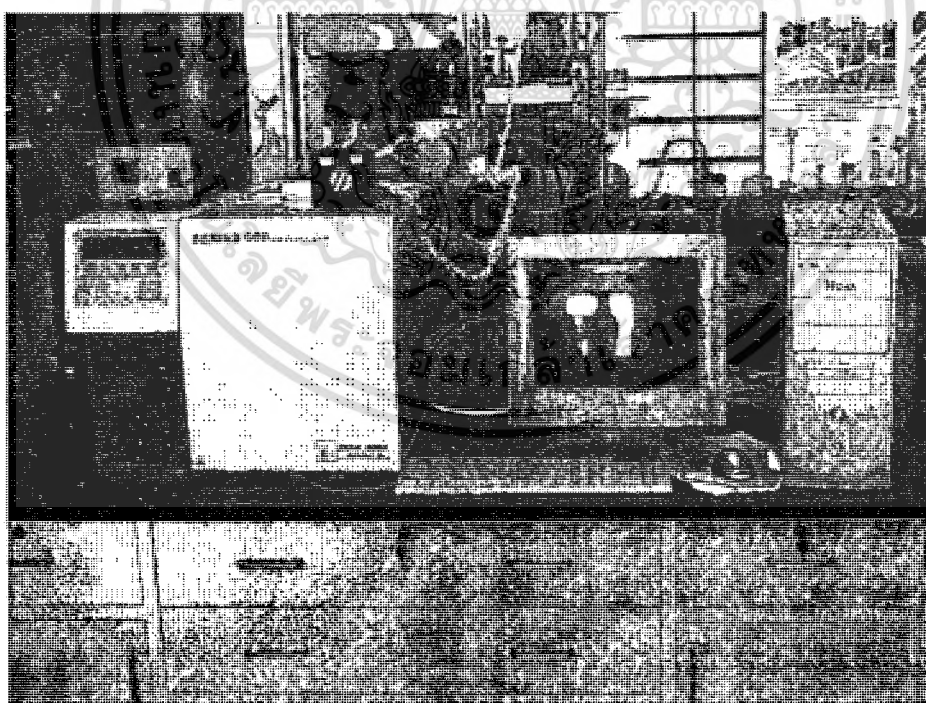
สภาวะการทำงานของเครื่อง GC เป็นดังนี้

Column : Porapak Q อุณหภูมิ 110 °C

Injection : อุณหภูมิ 120 °C

Detector : TCD อุณหภูมิ 150 °C

Carrier gas : He อัตราการไหล เท่ากับ 20 ml/min



รูปที่ ข.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟฟี (GC/TCD) ของบริษัท GOWMAG series 600

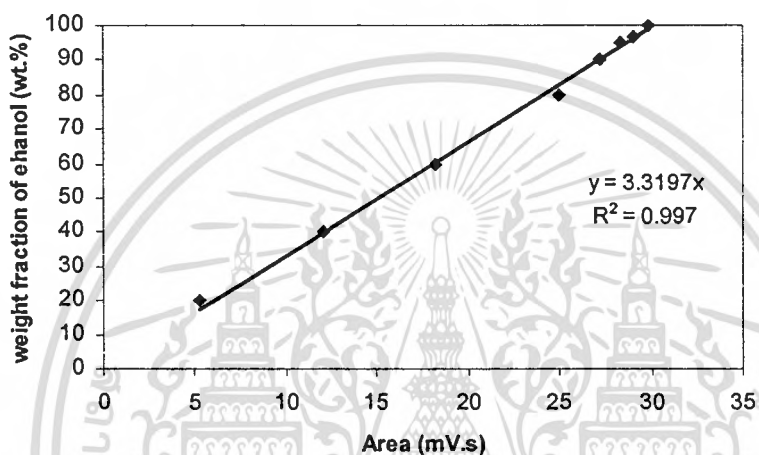
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

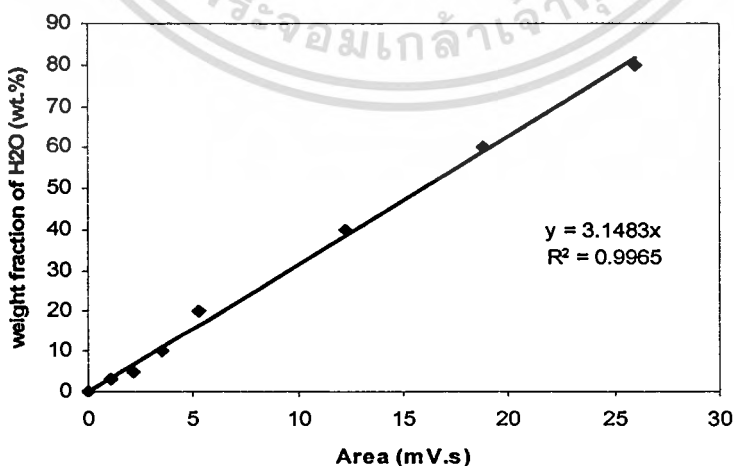
กราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำ

กราฟมาตรฐานสำหรับสารละลายเอทานอล-น้ำ วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟฟี
(บริษัท GOWMAG รุ่น 600)

Calibration curve (EtOH wt.%)



รูปที่ ค-1 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคของเอทานอลกับน้ำหนักของเอทานอลในสารละลายมาตรฐานแต่ละความเข้มข้น

Calibration curve (H₂O wt.%)

รูปที่ ค-2 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคของน้ำกับน้ำหนักของน้ำในสารละลายมาตรฐานแต่ละความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

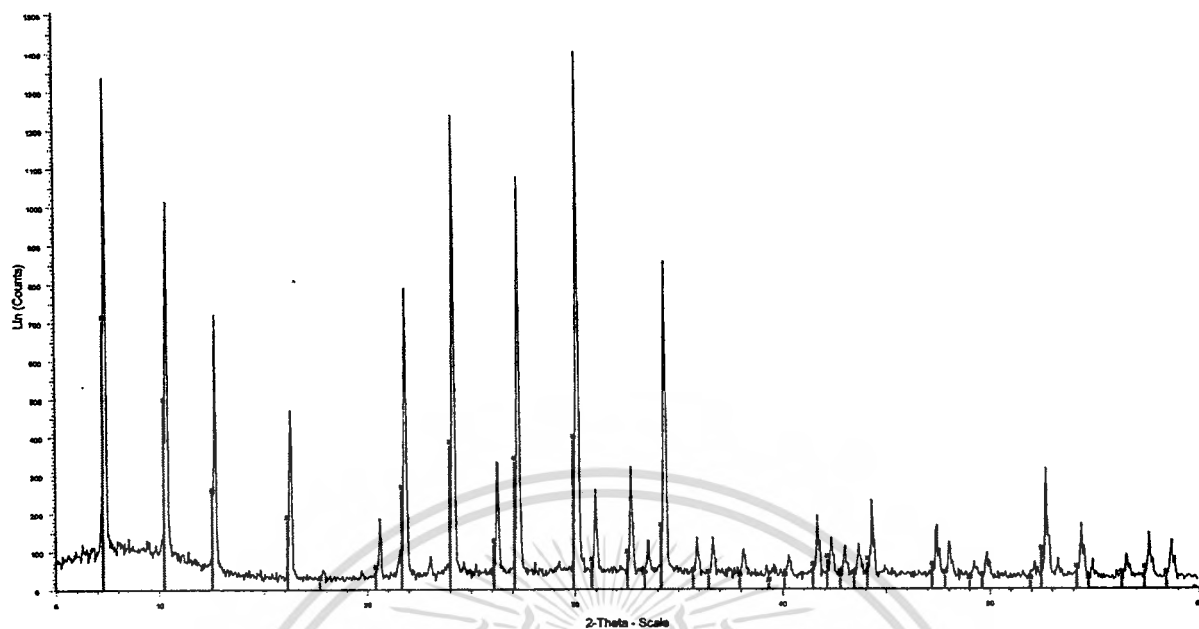
ตำแหน่งมาตรฐานของของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ

ตารางที่ ง-1 ตำแหน่งมาตรฐานของของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ (ผลจากเครื่อง XRD)

2-Theta-Scale	ร้อยละความเป็นผลึกของซีโอไลต์เอ
7.187	100
10.148	69
12.439	35
16.073	25
17.618	2
20.352	6
21.621	36
23.941	53
26.057	16
27.056	47
29.889	55
30.764	9
32.485	12
33.305	4
34.116	22
35.671	5
36.435	4
37.917	3
39.33	1
40.059	3
41.444	7
42.112	10
42.76	3
43.407	4
44.074	9
47.202	7
47.808	4
48.986	2
49.584	3
51.942	2
52.455	13
54.163	6
54.723	2
56.328	4
57.402	6
58.479	4
60.546	2
61.076	1
62.587	3
63.06	2
65.084	3
65.599	2
66.548	5
68.482	2
68.999	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้วางใจหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-1 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ชุดการทดลองเพอร์แวกพอเรชัน (Pervaporation)



รูป จ.1 ชุดทดลองเพอร์แวกพอเรชันสำหรับแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ

1. แก๊สพา คือ แก๊สไนโตรเจน
2. รีแอกเตอร์สำหรับบรรจุสารละลายป้อนและเมมเบรน
3. ชุดควบแน่น (condenser)
4. ขวดเก็บสารตัวอย่างที่ควบแน่น
5. water bath

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช

วิธีการคำนวณหาฟลักซ์ และค่าการแยก

1. การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารในเพอร์มิเอท

สมมุติว่าจะหาความเข้มข้นของเอทานอลในเพอร์มิเอท จากการวิเคราะห์สารตัวอย่างเพอร์มิเอทโดยเครื่อง GC เมื่อฉีดสารตัวอย่างในปริมาณ 1 ไมโครลิตร ได้พื้นที่ใต้พีคเท่ากับ 28.296 mV.s ซึ่งจากกราฟมาตรฐานรูปที่ ค-1 และ ค-2 สามารถคำนวณหาความเข้มข้นของเอทานอลได้โดยใช้สมการความสัมพันธ์ของกราฟมาตรฐาน คือ

$$Y = aX \quad (1)$$

เมื่อ a คือ ความชัน มีค่าเท่ากับ 3.3197

X คือ พื้นที่ใต้กราฟของน้ำ

Y คือ ความเข้มข้นของน้ำ

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความเข้มข้นของเอทานอลในเพอร์มิเอท} &= 3.3197 \times 28.296 \\ &= 93.934 \text{ wt.}\% \end{aligned}$$

2. สมการคำนวณหาค่าฟลักซ์ (Flux, J)

$$J_i = \frac{W_i W_T}{A \cdot t} \quad (2)$$

โดยที่ J_i คือ ค่าฟลักซ์ของสาร i ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

W_i คือ น้ำหนักของเพอร์มิเอทของสาร i (kg)

W_T คือ น้ำหนักรวมของเพอร์มิเอท (kg)

A คือ พื้นที่ผิวหน้าของเมมเบรน (m^2)

t คือ เวลาที่ใช้ทำการทดลอง (h)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (เอทานอล/น้ำ) เท่ากับ 95/5 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการแยกเท่ากับ 1 ชั่วโมง

➡ A คือ พื้นที่ผิวหน้าของเมมเบรน (m^2)

$$\begin{aligned} A &= 2\pi rL \\ &= 2 \times \pi \times [(11 \times 10^{-3} + 90.98 \times 10^{-6}) \text{ m}] \times (3 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 2.091 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

➡ W คือ น้ำหนักของเพอร์มิเอท (kg)

สารละลายตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ (ผ่านกระบวนการ pervaporation) มีน้ำหนักรวม

เอทานอล มีค่าพื้นที่ที่ได้พิดเท่ากับ 0.623 mV.s

น้ำ มีค่าพื้นที่ที่ได้พิดเท่ากับ 29.524 mV.s

จากกราฟมาตรฐาน แทนค่าพื้นที่ที่ได้พิดของแต่ละตัวลงในสมการเชิงเส้น (แสดงในภาคผนวก ข) ของแต่ละตัว จะได้ค่า weight fraction (wt.%)

เอทานอล มีค่า weight fraction เท่ากับ $Y = 3.3197X$

$$\begin{aligned} &= 3.3197 \times 0.649 \text{ wt.}\% \\ &= 2.152 / 100 \\ &= 0.02 \text{ g} \end{aligned}$$

น้ำ มีค่า weight fraction เท่ากับ $Y = 3.1483X$

$$\begin{aligned} &= 31.044 \times 3.1483 \text{ wt.}\% \\ &= 97.789 / 100 \\ &= 0.98 \text{ g} \end{aligned}$$

➡ W_T คือ น้ำหนักรวมของเพอร์มิเอท (kg)

$$W_{\text{total}} = 0.548 \text{ g}$$

จากสมการที่ 2 แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ

$$\begin{aligned} J &= \frac{W_{\text{water}} W_{\text{Total}}}{A \cdot t} \\ &= \frac{(0.548 \times 0.98) \text{ g}}{2.091 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \quad \left| \quad \frac{1 \text{ h}}{10^3 \text{ g}} \right. \\ &= 2.569 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สมการคำนวณค่าการแยก (Separation factor, α)

$$\alpha_{water/ethanol} = \frac{[y_{water}/y_{ethanol}]_p}{[x_{water}/x_{ethanol}]_f} \quad (2)$$

เมื่อ α_{ij} คือ ค่าการแยก (Separation factor) ของของผสมสำหรับสารชนิด i และ j

$y_{water}, y_{ethanol}$ คือ weight fractions ของเพอร์มิเอท

และ $x_{water}, x_{ethanol}$ คือ weight fractions ของสารละลายป้อน

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่ความเข้มข้นของสารละลายป้อน (เอทานอล/น้ำ) เท่ากับ 95/5 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการแยกเท่ากับ 1 ชั่วโมง

➔ เพอร์มิเอท

เอทานอล มีค่า weight fraction เท่ากับ 1.961 wt.%

น้ำ มีค่า weight fraction เท่ากับ 98.011 wt.%

➔ สารละลายป้อน

เอทานอล มีค่า weight fraction เท่ากับ 95 กรัม

น้ำ มีค่า weight fraction เท่ากับ 5 กรัม

แทนค่าในสมการที่ 2

$$\begin{aligned} \alpha_{water/ethanol} &= \frac{[y_{water}/y_{ethanol}]_p}{[x_{water}/x_{ethanol}]_f} \\ &= \frac{[98.011/1.961]_{\text{permeate}}}{[5/95]_{\text{feed}}} \\ &= 949 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

หลักการทํางานของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

ฉ-1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ คีเอเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น ผู้ผลิตได้พัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคนี้ให้มีความสามารถมากยิ่งขึ้นและใช้งานได้ง่ายขึ้น ทำให้เอื้อประโยชน์สำหรับนักวิทยาศาสตร์ที่จะนำไปใช้ปรับปรุง พัฒนา หรือยกระดับการวิเคราะห์วิจัยหรือตรวจสอบในระดับสูงขึ้นไป

หลักการพื้นฐาน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึกซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

โดยที่ $n = 1, 2, 3, \dots$

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์,

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก และ

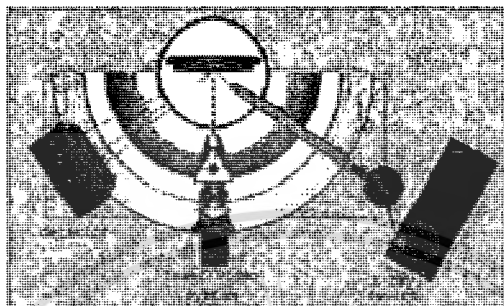
θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

ในขั้นตอนแรกนั้นต้องทำการปลูกผลึกที่สนใจแล้วนำผลึกที่ได้ไปแช่ในโตรเจนเหลว ผลึกที่แช่แข็งนี้จะไปลด radiation damage ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรวบรวมข้อมูลและลดการเคลื่อนไหวยของอนุภาคภายในผลึก ผลึกจะถูกวางในเครื่อง diffractometer แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มุมต่างๆ จะถูกนำมาพล็อตจนได้กราฟที่เรียกว่า diffractogram ซึ่งแต่ละพีคที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด

ด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้เราได้ทราบถึงข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษาทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และคุณสมบัติเชิงกลอย่างมากมาย



รูป ๑-1 แผนภาพแสดงการทำงานของ XRD

เทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิค ได้แก่

1. Single-Crystal Methods

โดยหลักแล้วเทคนิคนี้ใช้ในการตรวจวัด โครงสร้างอะตอม (ความสมมาตร ตำแหน่ง ช่องว่าง เป็นต้น) ซึ่งวิธีการดั้งเดิมนั้น (Laue method) จะใช้ผลึกติดอยู่กับที่และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เมื่อฉายลำรังสีให้ตกลงบนผลึกเดี่ยว จะทำการบันทึกผลการเลี้ยวเบนลงบนแผ่น Photographic plate ซึ่งใช้ในการบันทึกค่าความเข้มและตำแหน่งของรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันนั้นจะทำให้ผลึกเกิดการหมุนและอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของกล้องก้าวข้ามขีดจำกัดของการตรวจวัดปริมาณของรังสีที่เลี้ยวเบนจากวิธีการดั้งเดิม วิธีการนี้จะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแต่อาศัยการเปลี่ยนมุม θ โดยการเคลื่อนที่ของผลึก ซึ่งอยู่บนแท่นหมุน แล้วใช้ diffractometer และคอมพิวเตอร์ในการเก็บรวบรวมและจัดการข้อมูลซึ่งจะให้ผลที่มีความแม่นยำมากกว่า

2. Powder Method

เบื้องต้นแล้ววิธีการนี้จะใช้ในการระบุแร่ธาตุ โดยจะใช้บอกร่องค์ประกอบและตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ Single-Crystal Methods คือ แต่เดิมนั้นจะใช้เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า X-ray Powder Diffractometer และยังสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างผลึกแล้วไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้

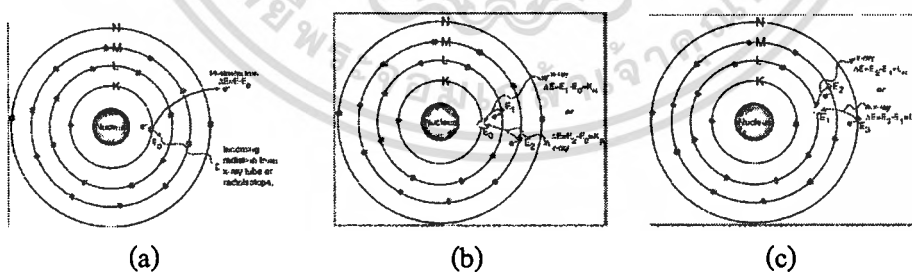
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ-2 เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออโรเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence spectrometry, XRFs)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์เรย์ฟลูออโรเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

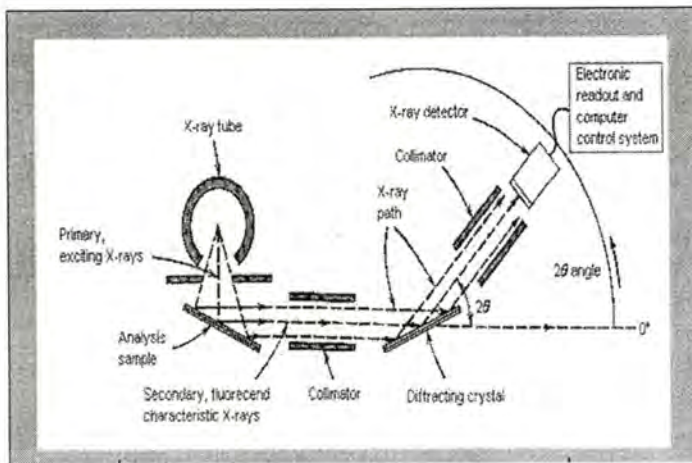
เมื่อรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ดังแสดงในรูปที่ ฉ-2 (a) ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ดังแสดงในรูปที่ ฉ-2 (b) และ (c) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” (Fluorescence) พลังงานของรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่ เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ ฉ-3 รังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟลูออโรเรสเซนซ์จะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นเทคนิค XRF จึงใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ ของสารตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเทคนิค XRF จะไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุ 11 ธาตุแรกของตารางธาตุได้



รูป ฉ-2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดรังสีเอ็กซ์ฟลูออโรเรสเซนซ์ของสารตัวอย่าง

รังสีเอ็กซ์ฟลูออโรเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่าน collimator ในรูปลำ รังสีขนานไปยัง Diffracting crystal ซึ่งมีค้ำระยะห่างระหว่างระนาบผลึก(d) ที่แน่นอน เช่น ควอทซ์, ลิเทียมฟลูออไรด์ ฯลฯ โดย Diffracting crystal จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ (X-ray detector) โดยปกติ Diffracting crystal จะทำมุม Theta กับระนาบรังสีขนานจาก collimator และทำมุม 2-Theta กับเครื่องตรวจวัด (รูป ฉ-3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ๑-3 รูปแสดงส่วนประกอบหลักของ XRF

การคำนวณค่าความยาวคลื่น (Wavelength, λ) ของรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์จากสารตัวอย่าง จะทำได้โดยแทนค่าในสมการ Bragg's law ค่าความยาวคลื่นที่คำนวณได้จะสามารถจับบอกได้ว่ารังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ของสารตัวอย่างประกอบด้วยธาตุใดบ้าง เทคนิคการวิเคราะห์นี้ เรียกว่า Wavelength dispersive XRF

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

ความสามารถในการตรวจวิเคราะห์ของเครื่อง XRF รุ่น SRS3400 เครื่อง XRF สามารถตรวจวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างที่มีปริมาณตั้งแต่ 0.1 ppm ขึ้นไปในสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ-3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

Scanning Electron Microscope เรียก โดยย่อว่า SEM หรือในภาษาไทยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้อิเล็กตรอนในการสร้างภาพขยายเช่นเดียวกับ TEM แต่มีความแตกต่างในรายละเอียดของกระบวนการในการสร้างภาพอย่างมาก SEM เครื่องแรกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 1960 จากนั้น SEM ก็ค่อยๆ กลายเป็นเครื่องมือที่นำไปประยุกต์ใช้แพร่หลายทั่วไป ทั้งในด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี การแพทย์ อุตสาหกรรม นิติวิทยาศาสตร์ โบราณคดี และอื่นๆ อีกหลายด้าน

หลักการทำงาน

อิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Electron Gun จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสให้เข้มข้นและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงโดย Condenser Lens จากนั้นจะถูกโฟกัสให้ตกลงบนผิวตัวอย่าง โดย Objective Lens ซึ่ง ณ ตอนนี อิเล็กตรอนที่ตกลงบนผิวตัวอย่างจะเป็นเพียงจุดที่เล็กมาก Scan Coil จะควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนให้กวาดจากซ้ายไปขวา เมื่อสุดก็เลื่อนลงอีกขั้นและกวาดจากซ้ายไปขวาอีกครั้ง เป็นเช่นนี้จนครบ Frame การกวาดลำอิเล็กตรอนเช่นนี้เรียกว่า raster scan และเมื่อครบ frame แล้วก็จะไปเริ่มสแกนที่จุดแรกใหม่ ในการกวาดลำอิเล็กตรอนในแต่ละ frame จะถูกกำหนดจำนวนจุดและแถวไว้อย่างแน่นอน โดยในภาพตัวอย่าง 1 เฟรม ตามเส้นตามแนวนอนจะประกอบด้วยจุด 1000 จุด และมีทั้งหมด 1000 เส้น ที่ผิวตัวอย่างที่อิเล็กตรอนตกใส่ จะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนขึ้นหลายรูปแบบซึ่งคล้ายกับการที่แสงตกกระทบวัตถุและสะท้อนออกจากผิววัตถุ ในที่นี้ถ้ากล่าวอย่างง่าย ๆ ว่าถ้าผิวตัวอย่างเรียบก็จะให้สัญญาณสะท้อนอิเล็กตรอนได้ดี แต่ถ้าผิวตัวอย่างเป็นหลุมลึกก็จะไม่ให้สัญญาณหรือให้ได้น้อย ซึ่งเราสามารถรับสัญญาณได้โดยใช้ Detector ที่เหมาะสมกับชนิดของสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะนำมาขยายให้มีความแรงที่เหมาะสมแล้วนำมาสร้างเป็นภาพ

ถ้าเราใช้จอหลอดรังสีแคโทด (Cathode ray tube, CRT) เพื่อแสดงภาพ ในหลอดรังสีแคโทดจะมีการสร้างลำอิเล็กตรอนและถูกบีบให้เป็นลำเล็กๆ แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าในกล้อง SEM มาก กล่าวคือใน SEM ลำอิเล็กตรอนมีขนาดศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร คืออาจทำได้ถึง 5 นาโนเมตรหรือต่ำกว่า แต่ในจอ CRT มีขนาดศูนย์กลางประมาณ 0.1 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของลำอิเล็กตรอนของ SEM ต่อ CRT จะพบว่าห่างกันถึง 20000 เท่า ทำให้เกิดเป็นอัตราส่วนของกำลังขยายที่จะให้ภาพที่มีรายละเอียดได้ดี ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปการสแกนใน CRT จะถูกควบคุมให้มีการสแกนแบบ Raster scan พร้อม ๆ กับการสแกนของลำอิเล็กตรอนในกล้องขณะเดียวกันความสว่างของจุดอิเล็กตรอนใน CRT จะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณจาก Amplifier ที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายสัญญาณจาก Detector รับสัญญาณอิเล็กตรอนในกล้อง ถ้าสัญญาณแรงก็จะให้ความสว่างของลำอิเล็กตรอนมาก เมื่อส่งลงบนจอของ CRT ก็จะปรากฏเป็นจุดสว่าง ในทางกลับกันถ้าสัญญาณเบา ก็จะได้จุดที่มีความสว่างน้อย บนจอก็จะปรากฏเป็นจุดสว่างน้อยด้วย บนจอ CRT จะทำการเรียงจุดของสัญญาณที่ได้นี้เป็นแถวจนครบเฟรมก็จะได้เป็นภาพออกมา

ถ้าบนจอ CRT มีขนาดกว้างและยาวเป็น 20 เซนติเมตร และเรากำหนดการกวาดลำอิเล็กตรอนในกล้อง ให้ 1 เฟรมมีพื้นที่ขนาด กว้างยาวเป็น 20 เซนติเมตรด้วย อัตราส่วนการขยายของภาพก็จะ เป็น 1 เท่า แต่ถ้าเราให้การกวาดลำอิเล็กตรอนในกล้องเป็นพื้นที่ 1×1 เซนติเมตร ก็จะขยายภาพเป็น 20 เท่า แต่ในความเป็นจริงขนาดของการสแกน 1 เฟรมในกล้องอาจควบคุมให้เล็กมากถึงระดับไมโครเมตร โดยที่การสแกนบนหน้าจอยังเท่าเดิม ดังนั้นการขยายจึงได้ถึงระดับหมื่นเท่า

สัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่าง

อิเล็กตรอนจาก Column ของ SEM เราเรียกว่า Primary Electron เมื่อตกกระทบผิวตัวอย่างจะมีสัญญาณหลาย อย่างเกิดขึ้นแต่พอจะแบ่งเป็นกลุ่มได้สองกลุ่มคือ

1. Inelastic Scattering

a. Secondary Electrons

b. X-Rays

c. Auger Electrons

d. Phonons

e. Transmitted Electron

f. Cathodoluminescence

2. Elastic Scattering สัญญาณที่นำมาใช้ประโยชน์ใน SEM มี 4 ชนิดได้แก่

a. **Secondary Electrons (SE)** เป็นอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่เกิดจาก Primary Electrons ไปชนเอาอิเล็กตรอนที่ผิวตัวอย่างหลุดออกมา โดยจะหลุดออกจากผิวตัวอย่างที่ความลึกจากพื้นผิวไม่เกิน 10 นาโนเมตร ให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง ความเข้มของ SE จะขึ้นกับมุมที่ Primary Electrons ตกใส่ และสภาพพื้นผิวตัวอย่าง ให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง ภาพที่ได้จาก SE เรียกว่า Secondary Electron Image, SEI

b. **Back Scattered Electrons (BSE)** คือ Primary Electrons ที่กระเจิงกลับออกมาจากผิวตัวอย่าง กล่าวคือ เมื่อ Primary Electrons วิ่งเข้าใกล้หรือเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมบนผิวตัวอย่างก็จะเกิดการเปลี่ยนทิศทางกระเจิงกลับออกมาจากผิวตัวอย่าง โดย BSE จะเกิดมากกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ความเข้มของสัญญาณ BSE จะขึ้นกับมุมที่ Primary Electrons ตกใส่ตัวอย่าง และยังขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุที่ผิวตัวอย่าง ภาพที่ได้จาก BSE เราเรียกว่า Back Scattered Electron Image (BEI) หรือ Primary Electron Image

c. **Characteristic X-rays** เกิดจากการที่เมื่ออิเล็กตรอนวงในของธาตุตัวอย่างถูกชนโดย Primary Electrons จนหลุดออกไป ก็จะเกิดเป็นระดับชั้นพลังงานที่ว่าง ทำให้อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานลง พร้อมกันนี้ก็จะปล่อยพลังงานในรูปแบบ X-Rays ออกมา พลังงานของ X-Rays ที่ได้จะมีรูปแบบของระดับพลังงานเฉพาะตัวแตกต่างกันไปในแต่ละธาตุเรียกว่า Characteristic X-Rays ดังนั้นจึงสามารถทำให้วิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบที่ผิวตัวอย่างโดยอาศัยประโยชน์จากการวิเคราะห์พลังงานหรือความยาวคลื่นของ X-rays ที่เกิดขึ้นนี้

d. **Cathodoluminescence** ธาตุบางชนิดเมื่อได้รับการถ่ายทอดพลังงานจาก Primary Electrons ก็จะปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงในช่วงที่ตาเห็นหรืออาจเลยไปถึงช่วง UV ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตัวอย่างบางชนิดเท่านั้น

ฉ-4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph, GC)

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) เป็นเทคนิคแรกเริ่มของเทคนิคการแยกและวิเคราะห์สารอินทรีย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน บทความแรกที่ตีพิมพ์ถึงการนำเทคนิคนี้ไปใช้งานเป็นเรื่องของการวิเคราะห์กรดไขมัน หลังจากนั้นเป็นต้นมาเครื่องมือที่ใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีก็ได้รับการปรับปรุงทั้งในส่วนของเครื่องมือและในส่วนของเทคนิคที่ใช้จนสามารถวิเคราะห์สารได้อย่างหลากหลาย ด้วยความรวดเร็ว และแม่นยำมากยิ่งขึ้น และยังคงมีการพัฒนาต่อไปอย่างไม่หยุดยั้งโดยการผสมเข้ากับเทคนิคการวิเคราะห์แบบอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

บทนำ

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นหนึ่งในเทคนิคของการแยกและวิเคราะห์สาร โดยเทคนิคนี้ใช้สำหรับการแยกสารผสมที่สามารถทำให้กลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิพอเหมาะ เครื่องมือรุ่นใหม่ๆ ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาทั้งในส่วนของอุปกรณ์และเทคนิคเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานที่หลากหลายไม่ว่าจะเป็นด้านการแพทย์ พลังงาน และสิ่งแวดล้อม

หลักการ

เทคนิคโครมาโทกราฟีทุกประเภทจะมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกัน นั่นคือ ทำการแยกองค์ประกอบของสารที่กระจายอยู่ระหว่างเฟสที่ไม่ผสมกันสองเฟส คือ เฟสอยู่กับที่ (stationary phase) และ เฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) องค์ประกอบของสารตัวอย่างซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างจากเฟสทั้งสองจะเคลื่อนที่ผ่านด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน เมื่อองค์ประกอบของสารเคลื่อนที่ผ่านออกมาจากระบบจะถูกชะแล้วผ่านไปยังเครื่องตรวจวัด ซึ่งจะทำการรายงานผลออกมาในรูปแบบของโครมาโทแกรมเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป สิ่งที่ทำให้เทคนิคโครมาโทกราฟีแต่ละเทคนิคมีความแตกต่างกันคือ เฟสเคลื่อนที่ สำหรับแก๊สโครมาโทกราฟีจะมีเฟสเคลื่อนที่ที่เป็นแก๊สนั่นเอง

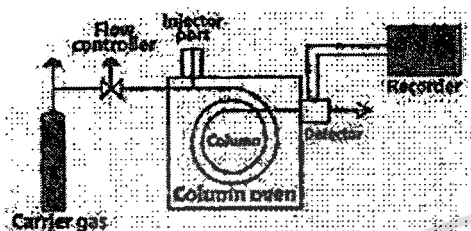
ประเภท

นอกจากการจำแนกประเภทของเทคนิคโครมาโทกราฟีด้วยเฟสเคลื่อนที่แล้ว เราสามารถใช้เฟสอยู่กับที่ในการแยกย่อยประเภทของแก๊สโครมาโทกราฟีได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. แก๊สโครมาโทกราฟีแบบของแข็ง (Gas-solid chromatography, GSC) โครมาโทกราฟีประเภทนี้จะใช้ของแข็ง เช่น ซิลิกาเจลเป็นเฟสอยู่กับที่ กลไกการแยกสารที่เกิดขึ้นเป็นแบบการดูดซับ ดังนั้นการแยกสารจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการดูดซับของสารที่บรรจุในคอลัมน์ แต่โดยทั่วไปแล้วโครมาโทกราฟีชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แก๊สโครมาโทกราฟีแบบของเหลว (Gas-liquid chromatography, GLC) โครมาโทกราฟีประเภทนี้จะใช้ของเหลวเป็นเฟสอยู่กับที่ ดังนั้นจึงต้องทำการเคลือบของเหลวให้เป็นชั้นบางๆ บนของแข็งที่เรียกว่า solid supporter กลไกการแยกสารที่เกิดขึ้น เป็นแบบพาร์ทิชันซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากและให้ผลการทดลองที่ดีกว่า GSC จึงทำให้ GLC เป็นที่นิยมใช้



รูปที่ ๑-4 แผนผังแสดงลักษณะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



ชนิดคอลัมน์

เครื่องมือ

ลักษณะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยทั่วไป จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ 4 ส่วน ดังนี้

1. **Gas supply unit** แก๊สที่ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่จะต้องเป็นแก๊สเฉื่อย โดยปกติแล้วจะใช้ไนโตรเจน ฮีเลียม อาร์กอน หรือคาร์บอน ไดออกไซด์ ซึ่งการเลือกชนิดของแก๊สจะขึ้นกับชนิดของเครื่องตรวจวัด เฟสเคลื่อนที่นี้จะถูกนำเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีผ่านทางตัวควบคุมอัตราการไหลเพื่อรักษาให้มีอัตราการไหลคงที่ถ้าอัตราการไหลมีการเปลี่ยนแปลงไปเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เวลาในการหน่วงเหนี่ยวเปลี่ยนไป 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อจะให้ความแม่นยำมีค่าไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ จะต้องทำการควบคุมอัตราการไหลให้มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน +0.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นเรื่องยากในการควบคุมเพราะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำโปรแกรมอุณหภูมิก็จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดและอัตราการไหลของแก๊ส ดังนั้นเครื่องมือในรุ่นใหม่ๆ จึงมีระบบไมโครโปรเซสเซอร์ในการควบคุมอัตราการไหลเพื่อแก้ไขปัญหา

2. **Sampling unit** หลังจากที่เปิดให้แก๊สพาหะผ่านเข้าสู่ส่วนต่างๆ ของเครื่องมือแล้ว สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกฉีดผ่านมาทางส่วนของ Sampling unit ที่ประกอบด้วยเครื่องฉีดสารและดูดซับ ซึ่งในส่วนนี้สารตัวอย่างจะถูกทำให้ระเหยกกลายเป็นไอแล้วส่งผ่านเข้าสู่คอลัมน์เพื่อทำการแยกองค์ประกอบต่างๆ การใช้เครื่องฉีดสารแต่ละชนิดจะขึ้นกับสถานะของตัวอย่างและชนิดของคอลัมน์แต่วิธีการที่ง่ายที่สุดคือการใช้เข็มฉีดสารตัวอย่างผ่านทาง septum ไปยังส่วนที่ทำให้

ให้สารระเหยกกลายเป็นไอซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของสารประมาณ 50 องศาเซลเซียส การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแพ็คเกจคอลัมน์สารตัวอย่างที่ฉีดจะต้องมีปริมาณ 10-20 ไมโครลิตร ในขณะที่แคปปีลารีคอลัมน์จะใช้ตัวอย่างเพียง 10-3 ไมโครลิตร โดยใช้ตัว splitter สำหรับเครื่องมือในปัจจุบันจะมีระบบฉีดสารแบบอัตโนมัติ มีระบบที่คอยควบคุมอุณหภูมิของตู้อบเพื่อให้วิเคราะห์ได้เร็วขึ้น สามารถทำความสะอาดคอลัมน์ปรับปรุงประสิทธิภาพของการแยกสามารถเลือกการระเหยสำหรับการฉีดสารเข้าสู่คอลัมน์โดยตรงจากส่วนบนของคอลัมน์และสามารถลดปัญหาการสลายตัวของสารที่ไม่เสถียรได้

3. Column unit คอลัมน์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดในการแยกสาร โดยทั่วไปแล้วคอลัมน์สำหรับแก๊สโครมาโตกราฟ มี 2 ประเภทคือ แพ็คเกจคอลัมน์ และแคปปีลารีคอลัมน์ แพ็คเกจคอลัมน์จะมี solid support ซึ่งโดยส่วนใหญ่คือ diatomaceous earth เป็นตัวยึดเฟสอยู่กับที่ มีความยาว 1.5-10 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2-4 มิลลิเมตร ในขณะที่แคปปีลารีคอลัมน์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่าระดับมิลลิเมตรถึง 10 เท่า และสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ wall-coated open tubular (WCOT) ซึ่งผนังภายในถูกเคลือบไว้ด้วยเฟสอยู่กับที่ที่เป็นของเหลว และ support-coated open tubular (SCOT) ซึ่งผนังภายในถูกเคลือบไว้ด้วยสาร เช่น diatomaceous earth เป็นชั้นบางๆ เพื่อดูดซับเฟสอยู่กับที่โดยทั่วไปแล้ว SCOT จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่า WCOT แต่อย่างไรก็ตามทั้งคู่ก็มี ประสิทธิภาพที่ดีกว่าแพ็คเกจคอลัมน์นอกจากคอลัมน์แล้วในส่วนนี้ยังต้องมีตู้อบที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ อุณหภูมิของคอลัมน์จะต้องถูกควบคุมไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยทั่วไปอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าสูงกว่าจุดเดือดของตัวอย่างในช่วง 2-30 นาทีในช่วงของการระเหย อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้การแยกที่ดีแต่จะทำให้เวลาในการระเหยเพิ่มขึ้น และถ้าตัวอย่างมีช่วงของการเดือดที่กว้างจะต้องอาศัยการทำโปรแกรมอุณหภูมิเข้าช่วย

4. Detector unit เครื่องตรวจวัดเป็นอุปกรณ์ขั้นสุดท้ายของแก๊สโครมาโทกราฟ ทำหน้าที่ในการตรวจวัดสารที่ถูกชะออกมาจากคอลัมน์แล้วส่งสัญญาณไฟฟ้า ไปยังระบบประมวลผล ซึ่งในปัจจุบันจะใช้ระบบการควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะให้รายละเอียดของโครมาโทแกรม ข้อมูลของพีค (พื้นที่ ความสูง ความกว้างเป็นต้น) การสอบเทียบ การคำนวณ การรายงานผล และสถิติเครื่องตรวจวัดมีหลายประเภท แต่ละประเภทมีลักษณะเฉพาะตัวแปรในการทำงาน และประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไป ในตารางที่ 1 แสดงเครื่องตรวจวัดต่างๆ ไปที่ใช้ในเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟเครื่องตรวจวัดและท่อที่เชื่อมระหว่างคอลัมน์กับเครื่องตรวจวัดจะต้องรักษาอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิของตู้อบไม่เกิน 15 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างเกิดการควบแน่นตรงบริเวณท่อหรือเครื่องตรวจวัดซึ่งจะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนและลดประสิทธิภาพในการตอบสนองของเครื่องตรวจวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี

แก๊สโครมาโทกราฟีให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูงความหลากหลายในการเลือกใช้เฟสอยู่กับที่ทำให้มีคุณสมบัติการหน่วงเหนี่ยวสารที่แตกต่างกันส่งผลให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นจำนวนมาก เครื่องตรวจวัดที่ใช้ในแก๊สโครมาโทกราฟีมีความไวสูงสามารถตรวจวัดสารประกอบได้อย่างถูกต้อง แม่นยำเนื่องจากเฟสเคลื่อนที่เป็น แก๊ส จึงสามารถต่อเข้ากับ mass spectrometer ทำให้แก๊สโครมาโทกราฟีกลายเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงมากขึ้น นอกจากนี้แก๊สโครมาโทกราฟียังสามารถใช้ในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ปนเปื้อนได้หลายชนิด



ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายปรมินทร์ ขวัญนอน อายุ 26 ปี
วัน/เดือน/ปี เกิด	วันที่ 29 กรกฎาคม 2525
ที่อยู่	31 ม. 5 บ.ดงม่วง ต.สำโรง อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม 44170
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2548
ผลงานทางด้านวิชาการ	“การเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรน เพื่อแยกเอทานอล-น้ำ” วิทยาสารลาดกระบัง, ฉบับที่ 3 ตีพิมพ์ในปี 25 เดือน กันยายน 2551



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้