

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เอกสารรายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์
โครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
ประจำปี 2551

เรื่อง

การเพอร์แวนเพื่อเรชั่นสารละลายเอธานอลเข้มข้นด้วยเมมเบรน

ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

RCH
TP
593
พ 2847

เสนอ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 116866
วันเดือนปี..... 16 ส.ย. 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

b. 12728923
i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชื่อโครงการวิจัย

การเพอร์เวปเพอเรนซ์สารละลายเอทานอลเข้มข้นด้วยเมมเบรน

2. ผู้รับผิดชอบโครงการ

หัวหน้าโครงการวิจัย ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

ผู้ร่วมโครงการวิจัย ผศ.ดร. ดวงกมล ณ ระนอง

3. วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

กำจัดน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเข้มข้น

4. ชิ้นงานที่ต้องส่งมอบคณะฯ เมื่อสิ้นสุดโครงการ

บทความทางวิชาการ และ ชิ้นงานเมมเบรนที่เตรียมได้

5. จำนวนเงินวิจัยที่ได้รับอนุมัติ

91,860 บาท

6. สถานที่ทำการวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลงชื่อ *พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์* หัวหน้าโครงการวิจัย
(ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ

การเพอร์แวกเปอเรชันสารละลายเอทานอลเข้มข้นด้วยเมมเบรน

ชื่อนักวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

ผู้ร่วมโครงการวิจัย ผศ.ดร. ดวงกมล ณ ระนอง

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ทำการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเพื่อสารละลายแยกเอทานอล-น้ำ ซีโอไลต์ชนิดเอสังเคราะห์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ซึ่งได้แก่ เวลาในการตกผลึกและอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา จากการทดลองพบว่าเวลาในการตกผลึกที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 ชั่วโมง และอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.189 อนุภาคของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 685 นาโนเมตร จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้เคลือบลงบนผิวตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนพบว่าเมมเบรนมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 91 ไมโครเมตร ทดสอบประสิทธิภาพของเมมเบรนด้วยการแยกเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชันที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนเท่ากับ 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 ซีโอไลต์ (Zeolite)	
2.1.1 แหล่งกำเนิดของซีโอไลต์.....	5
2.1.2 โครงสร้างของซีโอไลต์.....	5
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	7
2.1.4 ความสามารถในการเลือกผ่านของซีโอไลต์	9
2.1.5 ซีโอไลต์เอ	10
2.2 เอทานอล	
2.2.1 องค์ประกอบของเอทานอล	12
2.2.2 กระบวนการทำเอทานอลบริสุทธิ์	12
2.3 กระบวนการเพอร์เวปอเรชัน	
2.3.1 คุณลักษณะของเพอร์เวปอเรชัน	15
2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อศักยภาพของเมมเบรน	16
2.3.3 ข้อดีของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปอเรชัน	16

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 สารเคมี	18
3.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	19
3.3 วิธีการทดลอง.....	19

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ผลของอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่อผลผลิตซีโอไลต์ชนิดเอ.....	23
4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการตกผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ.....	29
4.3 ผลของปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอที่เคลือบบนผิวตัวรองรับอะลูมินา.....	32
4.4 ผลการทดสอบกระบวนการเพอร์เวปอเรชันของเอทานอล-น้ำ.....	36

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง.....	44
-------------------------	----

เอกสารอ้างอิง.....	45
--------------------	----

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 แก๊สโซฮอล (gasohol) หรือผสมกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ดีโซฮอล (diesohol) ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้กับเครื่องยนต์ การใช้เอทานอลบริสุทธิ์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงที่สะดวกในขณะนี้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ คือการใช้ในรูปแบบของการผสมกับน้ำมัน โดยเอทานอลที่ผสมในสัดส่วน 5-30 vol.% [1] จะสามารถใช้เป็นสารทดแทนสารเอ็มทีบีอี (methyl-tertiary butyl ether; MTBE) ที่เป็นสารเพิ่มออกซิเจนและออกเทนในน้ำมันได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงในหลายประเทศ เช่น บราซิล สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย ฟิลิปปินส์ รวมถึงประเทศไทยด้วย ซึ่งการใช้ น้ำมันเบนซินผสมกับเอทานอลที่มีความเข้มข้น 99.5 wt.% เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ได้ดีกับรถยนต์ในปัจจุบันและสามารถลดมลภาวะทางอากาศได้อย่างดีอีกด้วย 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.% เนื่องจากสารละลายเอทานอลและน้ำเป็นของผสมอะซิโโทรอป (azeotropic mixture) กล่าวคือเป็นของผสมที่แยกได้อย่างมีข้อจำกัดโดยวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดา โดยของผสมจะเกิดอะซิโโทรอปที่ความเข้มข้นของเอทานอล 95.6 wt.% ที่จุดเดือด 78.15 องศาเซลเซียส และความดัน 101.3 กิโลปาสคาล [4] หากต้องการเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์อย่างน้อย 99.5 wt.% จะต้องทำการกลั่นแบบอะซิโโทรอป (azeotropic distillation) ซึ่งเป็นวิธีการกลั่นแยกของผสมโดยใช้คุณสมบัติแบบจุดเดือดร่วม (boiling point azeotropic) ของของผสมจะต้องเติมสารช่วยกลั่น ได้แก่ เบนซิน ซึ่งเป็นสารก่อระเบิดและติดไฟได้ง่าย รวมทั้งความซับซ้อนของการทำงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าใช้จ่ายสูง และมีการใช้พลังงานไอน้ำในการกลั่นทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน นอกจากนี้เอทานอลที่ทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีการนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยาและเวชภัณฑ์เนื่องจากมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ด้วย

กระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่นเป็นกระบวนการแยกสารละลายผ่านเมมเบรน ซึ่งได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมเคมีที่ประสบปัญหาในด้านพลังงานและการแยกด้วยกระบวนการแบบเดิม (การกลั่น, การแยก หรือ การดูดซับ) เช่น อะซีโโทป และ การแยกของเหลวผสมด้วยการกลั่นแบบเปิด การแยกน้ำออกจากตัวทำละลายออกแกนิค และการนำน้ำกลับมาเพิ่มค่าการเจือจางให้สูงด้วยกระบวนการ รีคอปเวอรี [5, 6] โดยกระบวนการนี้เหมาะสำหรับการแยกสารละลายผสมซึ่งมีองค์ประกอบหนึ่งอยู่ในอัตราส่วนที่ต่ำโดยเฉพาะสารละลายอะซีโโทป เช่น สารละลายแอลกอฮอล์กับน้ำ หรือสารอินทรีย์ที่เจือปนในน้ำทิ้ง เนื่องจากมีข้อได้เปรียบทั้งในแง่เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม กล่าวคือประหยัดพลังงาน ไม่ต้องใช้สารเคมีจึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำทิ้งจากกระบวนการมีน้อยมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวหากเราสามารถนำเทคโนโลยีระบบเมมเบรนมาแยกของเหลวผสมโดยใช้กระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่นก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลเกือบบริสุทธิ์จากชีวมวลแทนวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดาที่ใช้ในปัจจุบัน

กระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 โดยกระบวนการเริ่มแรกเป็นของบริษัท GFT (ปัจจุบัน Sulzer Chemtech) สำหรับแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อผลิตเอทานอล 99.5 wt.% แทนการกลั่นแบบอะซีโโทป [7] แต่อย่างไรก็ตาม การนำกระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่นไปใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมยังมีจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเมมเบรนแบบอื่นๆ เช่น ออสโมซิสแบบผันกลับ (reverse osmosis) อัลตราฟิลเตรชัน (ultra filtration) ไมโครฟิลเตรชัน (micro filtration) ในขณะที่กระบวนการเมมเบรนแบบอื่นได้รับการพัฒนาจนถึงขั้นเป็นที่น่าพอใจ กล่าวคือมีเมมเบรนทางการค้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมีราคาถูก รวมทั้งมีเมมเบรนหลากหลายชนิดที่สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารละลายที่ต้องการแยก แต่สำหรับกระบวนการเพอร์แวกพอเรชั่นยังมีจำกัดเกี่ยวกับชนิดของเมมเบรน กล่าวคือเมมเบรนที่ผลิตในทางการค้ายังมีไม่หลากหลายชนิด และมีประสิทธิภาพในการแยกไม่สูงมาก พอจึงพบว่าการวิจัยและประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการนี้ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา นักวิจัยหลายท่านจะเน้นการพัฒนาเมมเบรนสังเคราะห์ให้มีทั้งสมรรถนะในการแยกและค่าฟลักซ์ที่สูงขึ้นสำหรับสารละลายหนึ่งๆ 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] โดยเมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแบบแผ่นและแบบท่อ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ม้วน แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการใช้สารอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ ซีโอไลต์ โลหะ และเซรามิก เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสารอินทรีย์

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

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนเพื่อกำจัดน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเข้มข้น

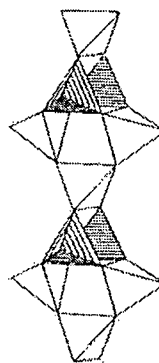
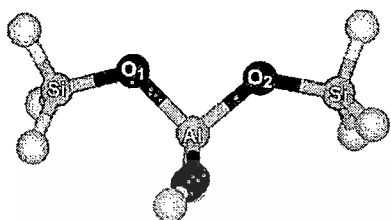
บทที่ 2

ทฤษฎี

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 สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้ ทำให้เป็นที่มาของชื่อ ซีโอไลต์ ซีโอไลต์นั้นอาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของแร่ธาตุจะเห็นได้จากมีการทำเป็นเหมือง ซีโอไลต์ในพื้นที่หลายแห่งของโลก หรืออาจสังเคราะห์ขึ้นได้โดยกระบวนการทางเคมี เพื่อประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีโอไลต์เองด้วย [27]

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา เราสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ในรูปที่ปรากฏในธรรมชาติและรูปแบบใหม่มากมาย สมบัติเด่นของซีโอไลต์คือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและการเลือกดูดซับโมเลกุลของสารบางชนิดขึ้นกับ ขนาด หรือรูปร่างของโมเลกุลของสารนั้น ซีโอไลต์บางชนิดโดยเฉพาะที่สังเคราะห์ขึ้นมายังมีสมบัติในการคัดแยก (Selectivity) สูง สามารถเลือกดูดซับสารที่มีโครงสร้างแตกต่างกันได้ เช่น การแยกพาราไซลีนจากของผสมไอโซเมอร์ของไซลีนโดยใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 [28] และพบว่าซีโอไลต์เป็นของแข็งที่มีฤทธิ์เป็นกรดเช่นเดียวกับกรดซัลฟิวริก หรืออะลูมินัมคลอไรด์ ซึ่งสามารถเร่ง ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ปฏิกิริยาการแตกตัว ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน ของโอเลฟิน พาราฟินและสารอะโรมาติก รวมทั้งปฏิกิริยาแอลคิลเลชันของสารอะโรมาติกและพาราฟิน เป็นต้น โดยมีการออกแบบซีโอไลต์สำหรับใช้ในหลายอุตสาหกรรม ซึ่งซีโอไลต์มีระบบรูพรุนและมีพื้นที่ผิวมาก [29]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทรงสี่หน้า SiO_4 และ AlO_4 ที่ถูกเชื่อมต่อกันของซีโอไลต์ Natrolite [28]

2.1.1 แหล่งกำเนิดของซีโอไลต์

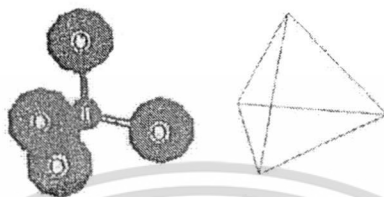
โดยทั่วไปแล้วซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติจาก 2 แนวทางใหญ่ คือ แนวทางแรกซีโอไลต์สามารถเกิดในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำมาก (ต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส) ซีโอไลต์ธรรมชาติทุกชนิดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบจำพวกอะลูมิโนซิลิเกตที่ละลายน้ำได้ได้ผิวดโลกผ่านกระบวนการตกผลึก (Crystallization) ภายใต้ความร้อนและความดันอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของชั้นเปลือกโลกโดยมีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น โลหะแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ทที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดโครงสร้างของซีโอไลต์รวมอยู่ด้วย กระบวนการการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ อาจยาวนานถึง 1-10 ล้านปี ขึ้นกับความเหมาะสมของความดัน อุณหภูมิ และชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น สภาวะที่ก่อให้เกิดการตกผลึกซึ่งมีน้ำ ความร้อน และความดันนี้ เราเรียกว่า การตกผลึกแบบไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal Crystallization) [28]

กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์แบบดั้งเดิม ซึ่งพัฒนามาจากการศึกษาสภาวะที่เกิดซีโอไลต์ในธรรมชาติ โดยใช้สารละลายเบสเป็นตัวกลางเท่านั้น ซึ่ง Barrer เป็นผู้ที่มียุทธศาสตร์สำคัญในยุคแรก (ในปี ค.ศ. 1950) ที่เริ่มจำลองสภาวะดังกล่าวเพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อนเป็นจำนวนมาก โดยที่เราสามารถเลือกชนิดและองค์ประกอบ ตลอดจนออกแบบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ต้องการได้ โดยการควบคุมชนิดและสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบของสารตั้งต้น รวมทั้งอุณหภูมิและความดันที่เพิ่มขึ้นเองเมื่อให้ความร้อนในระบบปิด (Autogeneous pressure) [28]

2.1.2 โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ทั้งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและจากการสังเคราะห์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicates) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำภายในโครงสร้าง มีโครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจนสี่อะตอม ($[\text{SiO}_4]^{4-}$ และ $[\text{AlO}_4]^{5-}$) เรียกส่วนโครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกอนและอะลูมิเนียมว่า หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Building Units) ซึ่งอะตอมของโลหะที่เป็นโครงสร้างหลักนี้รวมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

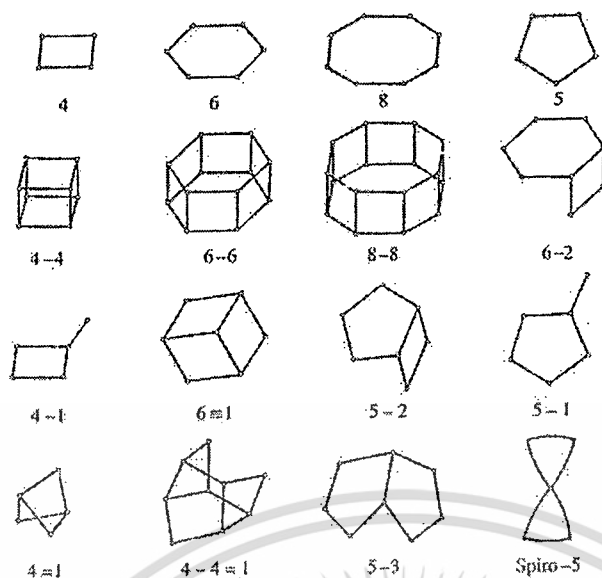
หลักนี้รวมเรียกว่า T อะตอม (T= Si หรือ Al) แสดงดังรูปที่ 2.2 [30] เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติ ขนาดของซีโอไลต์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดไอออนบวกภายในโครงสร้างและธรรมชาติของการปรับสภาพ เช่น การเผา การชะล้าง และการปรับสภาพทางเคมีอื่นๆ กว่า 30 ปีที่ซีโอไลต์มีความน่าสนใจโดยใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากซีโอไลต์มีความว่องไวสูง 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, Faujasite (ชนิด X หรือ Y) และ ซีโอไลต์ A มีหน่วยการสร้งประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 6 หรือ 4 อะตอม แต่ซีโอไลต์ A ยังมีหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิที่ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนแบบคู่ 4 อะตอม (4-4) ซึ่ง Faujasite ไม่มีโครงสร้างแบบนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (SBU) ในโครงสร้างของซีโอไลต์ [28]

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการตกผลึกโครงสร้างของซีโอไลต์มี 3 ประการ คือ องค์ประกอบทั้งหมดในของผสมที่ใช้ทำปฏิกิริยา อุณหภูมิและเวลา แสดงดังตารางที่ 2.1 [30]

ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตกผลึกของซีโอไลต์ [30]

1. องค์ประกอบทั้งหมด

- อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)
- 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

โดยทั่วไปซีโอไลต์จะไม่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส ยกเว้นซีโอไลต์ที่ใช้อุณหภูมิสูงในการสังเคราะห์ เช่น Analcime ใช้อุณหภูมิ 366 องศาเซลเซียส Clinoptilolite เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส Ferrierite ใช้อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และ Mordenite ใช้อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิสูงเกินไปจะเกิดเฟสของเหลวมากขึ้น ซีโอไลต์หลายชนิดตกผลึกได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เช่น ซีโอไลต์ A, X และ Y แต่เมื่อใช้เวลาในการตกผลึกนานขึ้น (อาทิตย์จนถึงหลายเดือน) ร่วมกับการใช้อุณหภูมิต่ำจะยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งอุณหภูมิที่สูงปานกลาง (120-200 องศาเซลเซียส) จะช่วยกระตุ้นการเกิดผลึกซีโอไลต์ตามที่ต้องการ

สำหรับอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) ของเจลที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นปัจจัยที่กำหนดความเป็นไปได้ของโครงสร้างที่จะตกผลึกได้ ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำตกผลึกได้เร็วกว่าซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูง และเมื่อมีปริมาณอะลูมิเนียมมากขึ้นจะตกผลึกได้เร็วขึ้น อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่สูงช่วยให้ซีโอไลต์ทนทานต่อการกัดกร่อน และมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งลดแรงดึงดูดตัวดูดซับมีขั้วและลดปริมาณไอออนบวก เมื่อลดอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาทำให้เพิ่มความชอบน้ำและสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน [34, 35]

การก่อผลึกของซีโอไลต์จำเป็นต้องมีตัวกลางเพื่อให้สารพวกอะลูมิเนียมในซิลิกาเกิดการจัดเรียงตัวได้ และเนื่องจากอะลูมินาและซิลิกาสามารถละลายได้ในสารละลายเบส ซึ่งความเป็นเบสจะควบคุมการก่อผลึกของซีโอไลต์ โดยหากความเป็นเบสสูงเกินไปจะทำให้ซิลิกาละลายดีเกินไปจนอาจไม่สามารถเกิดการก่อผลึกได้ 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 สารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์มีความสำคัญอย่างมากต่อการสังเคราะห์ ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ (< 3) ซึ่งซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติโดยทั่วไปจะมีไอออนของโลหะหมู่ I และ II เช่น โซเดียม (Na)

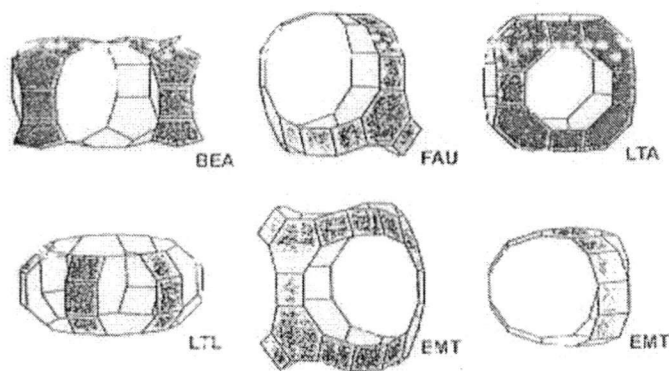
โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบซึ่งไอออนของโลหะเหล่านี้ เป็นตัวที่ก่อให้เกิดเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างทุติยภูมิและเกิดเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์ขึ้น เนื่องจากไอออนบวกจะเกิดอันตรกิริยากับสารพวกอะลูมิเนียมในสารละลายก่อให้เกิดโครงสร้างที่แตกต่างกันไป สำหรับสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์เริ่มมีบทบาทสำคัญ เมื่อมีความพยายามที่จะสังเคราะห์ซีโอไลต์ให้มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงชันกว่าซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติ และมีความแรงของเบสสูงกว่าสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์ซึ่งทำให้ซิลิกาละลายตัวรวมกับอะลูมินาได้ดีโดยไม่ทำให้สารละลายซิลิเกตเสถียรเกินไปจนซิลิเกตไม่อยู่ในรูปสารละลายคล้ายเจล หรือไม่เกิดการตกผลึกเลย โดยทั่วไปสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์จะช่วยในการเหนี่ยวนำให้เกิดการก่อผลึก ควบคุมการเกิดโครงสร้าง ขนาดของรูพรุน และรูปร่างของผลึกของซีโอไลต์ โดยการก่อผลึกจะเกิดผ่านการจัดเรียงตัวของสารพวกอะลูมิเนียมในซิลิเกตล้อมรอบสารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์ การใช้สารกำหนดโครงสร้างอินทรีย์ที่ต่างกันจะทำให้เกิดโครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่น TBP^+ (tetrabutylphosphonium), TMA^+ (tetramethylammonium), TEA^+ (tetraethylammonium) และ TPA^+ (tetrapropylammonium) เป็นต้น [30, 37, 38]

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

2.1.4 ความสามารถในการเลือกผ่านของซีโอไลต์ (shape selectivity)

ซีโอไลต์มีโครงสร้างภายในที่มีรูพรุนทำให้มีความสามารถในการยอมให้สารบางชนิดผ่านเข้าไปได้ สำหรับซีโอไลต์ที่มีวงแบบ 6T (6-membered rings) หรือน้อยกว่านั้น และรูพรุนมีขนาดประมาณ 2 Å ทำให้จำกัดการผ่านเข้าออกของสารบางชนิด ไอออนหรือโมเลกุลอาจถูกดักจับภายในโครงสร้างทำให้งงมีขนาดเล็ก (5-, 4-, and 3-membered rings) สำหรับซีโอไลต์ที่มีวงขนาดใหญ่ จะทำให้ไอออนและโมเลกุลสามารถผ่านเข้าไปภายในโครงสร้างได้ แสดงดังรูปที่ 2.4 [36] แสดงระบบของรูพรุนของซีโอไลต์บางชนิด [37]

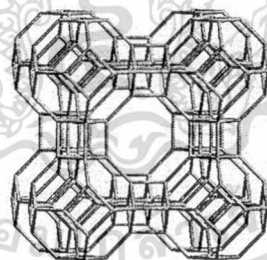


รูปที่ 2.4 รูปแบบของรูพรุนของซีโอไลต์บางชนิด [37]

2.1.5 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A)

พอลิฮีดรา (Polyhedra) ที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์เอ ได้แก่ โพรงโซดาไลต์ (Sodalite cage) และปริซึมเตทราฮีดรอล (Tetrahedral prisms, D4R) จะเชื่อมโยงกันจนเกิดเป็นช่องว่างหรือโพรง ดังรูปที่ 2.5

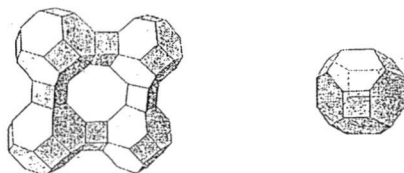
ซีโอไลต์เอมีโครงสร้างของรูพรุนเป็นแบบ 3 ทิศทาง (3-Dimensional) ซึ่งรูพรุนมีแนวเป็นเส้นตรงตลอดทั้งแนวแกน x, y และ z และมี secondary building units 4, 6, 8 และ 4-4 มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่แน่นอน โดยมีจำนวนของออกซิเจน 8 อะตอม ในวงแหวน (Ring) ที่ต่อกันเป็นทรงสี่หน้า ซึ่งรูพรุน ช่องว่าง หรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติมีขนาด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



รูปที่ 2.5 การเชื่อมโยงของโพรงโซดาไลต์และปริซึมเตทราฮีดรอล [31]

ซีโอไลต์เอประกอบด้วยรูปทรงหลายเหลี่ยม 2 ชนิด คือ

1. การจับตัวเป็นรูปลูกบาศก์โดย 2 รูปของทรงสี่หน้า หรือ D4R
2. จับตัวกันด้วย 24 รูปของทรงสี่หน้าเป็นรูปทรงกรวยหน้า หรือ ทรงเบต้า ดังรูปที่ 2.6



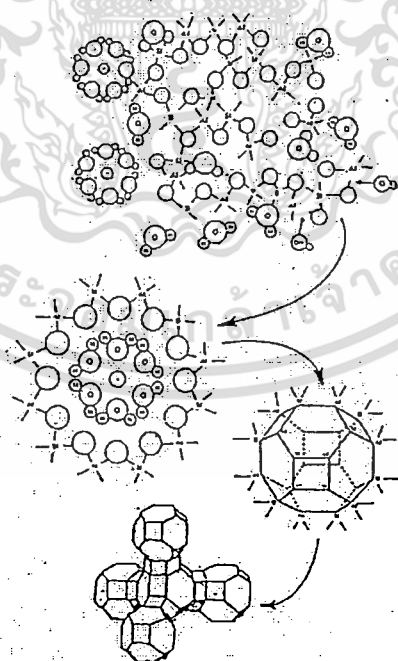
รูปที่ 2.6 การจับตัวเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้า (Truncated octahedron) ในซีโอไลต์เอ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ สามารถทำได้โดยสังเคราะห์ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัล โดยการตกผลึกซีโอไลต์จากระบบที่เป็นสารละลายของน้ำ ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมในสภาวะที่มีค่า pH สูง และส่วนประกอบของเจลที่มีความเข้มข้นอิมิตัวอย่างยิ่งยวดทำให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย

การเตรียมเจลจากสารเริ่มต้นในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะได้ซีโอไลต์ต่างชนิดกันในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอนั้นจะต้องกำหนดระยะเวลาในการตกผลึกและความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เพราะถ้าทิ้งไว้ให้ตกผลึกนานหรือใช้ NaOH ที่เข้มข้นมากจะทำให้ซีโอไลต์เอเปลี่ยนเป็น ซีโอไลต์พีที่เสถียรกว่า [31, 33]

สำหรับการเกิดผลึกของซีโอไลต์เกิดจากทรงสี่หน้าของซิลิกาและอะลูมินาเชื่อมต่อกันในลักษณะของ Cubochedron ซึ่งเรียกว่า Sodalite unit หรือ Truncated octahedron ดังรูปที่ 2.7 โดย Sodalite unit เป็นหน่วยโครงสร้างทศนิยมของซีโอไลต์ชนิดนี้ 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



รูปที่ 2.7 การเกิดผลึกซีโอไลต์ [31]

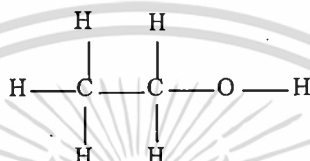
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เอทานอล (Ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol)

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นของเหลวใสไม่มีสี ติดไฟง่าย มีกลิ่นเฉพาะตัว สำหรับสารละลายเจือจางจะมีรสหวาน แต่ถ้าสารละลายเข้มข้นจะมีรสขม

2.2.1 องค์ประกอบของเอทานอล

เอทานอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง ที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เอทานอลมีขนาดโมเลกุล 0.52 นาโนเมตร และจัดเป็นโมเลกุลมีขั้ว จึงสามารถละลายในน้ำได้ โดยในหนึ่งโมเลกุลจะประกอบด้วย หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หนึ่งหมู่ แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล

เอทานอลมีจุดหลอมที่อุณหภูมิ -114 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่ 78.5 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่น 0.789 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เนื่องจากเอทานอลมีจุดเยือกแข็งต่ำ จึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในเทอร์โมมิเตอร์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลายสี ยา และแลคเกอร์ ใช้เช็ดทำความสะอาดแผลและใช้เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ (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) เหมาะสำหรับกลั่นแยก

ของเหลวที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน หรือแยกสารละลายที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายเป็นสารที่ระเหยง่ายทั้งคู่ ซึ่งถ้ากลั่นแบบธรรมดาเพียงครั้งเดียวจะได้สารที่ไม่บริสุทธิ์ เช่น การกลั่นน้ำผสมเอทานอล ต้องกลั่นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง จึงจะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นทุกครั้ง แต่ในทางปฏิบัติแทนที่จะนำของเหลวไปกลั่นซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและใช้เวลามาก จึงได้นำไปกลั่นในคอลัมน์ลำดับส่วนหรือในหอกลั่นซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับการกลั่นซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งจะทำให้เอทานอลมีความเข้มข้น $95.6 \text{ wt.}\%$ และมีน้ำอยู่ $4.4 \text{ wt.}\%$ เนื่องจากสารละลายเอทานอลและน้ำเป็นของผสมอะซีไอโทรป ซึ่งเป็นของผสมที่แยกได้อย่างมีข้อจำกัดด้วยวิธีการกลั่นแยกแบบธรรมดา โดยของผสมเกิดอะซีไอโทรปที่สัดส่วนเอทานอล $95.6 \text{ wt.}\%$

เอทานอลที่กลั่นได้มีปริมาณน้ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 ชั้นในแนวขนาน โมเลกุลน้ำจะถูกจับไว้ ในขณะที่เอทานอลบริสุทธิ์ถึง 99.8-99.9% จะผ่านลงมา และถูกนำไปยังถังเก็บ หลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการแยกน้ำ ชั้นของ molecular sieve แต่ละชั้นจะชุ่มไปด้วยน้ำ ซึ่งสามารถทำให้แห้งทำได้โดยผ่านไอน้ำ (steam) เพื่อไอน้ำที่ถูกดูดซับใน molecular sieve ออก ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือ เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ใช้ไอน้ำและพลังงานที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการกลั่น นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นๆ มาช่วยในการแยกน้ำ การกำจัดของเสียจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง แต่เทคโนโลยีนี้มีข้อเสียตรงที่ อัตราการสึกกร่อน หรือเกิดการเน่า (fouling of media) ของ Molecular sieve มีค่อนข้างสูง เมื่อมีการใช้งานมากกว่า 5 ปี จำเป็นต้องเปลี่ยนใหม่ ทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตค่อนข้างสูง

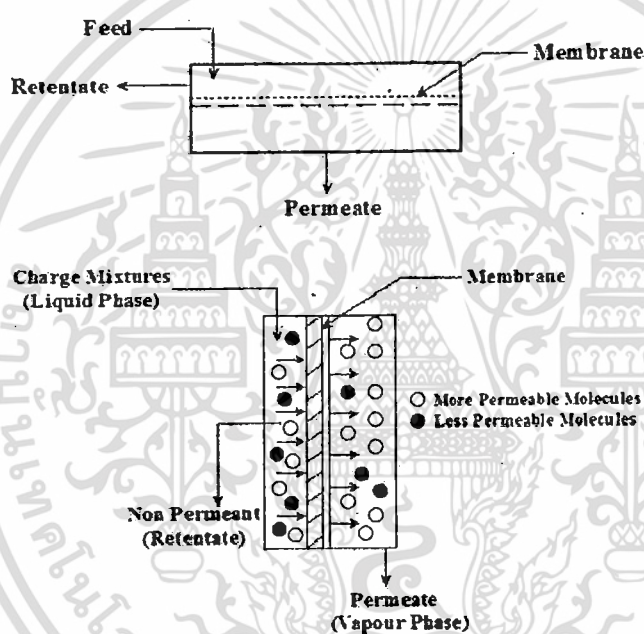
2.2.2.4 การแยกด้วยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน ซึ่งจะใช้หลักการทำงานของ เมมเบรน (permeate membrane) ร่วมกับกระบวนการระเหย (evaporation) ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีอื่นๆ คือ ประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ ไม่ต้องใช้ตัวทำละลายดูดซับ จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำที่จากกระบวนการมีน้อยมาก

2.3 กระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน (pervaporation process)

กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันเป็นกระบวนการสำหรับการแยกองค์ประกอบหนึ่งๆ ออกจากสารละลายผ่านเมมเบรน โดยกระบวนการนี้มีพื้นฐานมาจากกระบวนการเมมเบรนแบบออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) และแก๊สเพอร์มิเอชัน (gas permeation) ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมากระบวนการเพอร์แวกพอเรชันได้รับความสนใจและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน ซึ่งสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ของการแยกหรือชนิดของสารละลาย คือ การแยกน้ำออกจากสารละลายอินทรีย์ เช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเพื่อผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ การแยกสารอินทรีย์ออกจากเอทานอลเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายเจือจาง เช่น การแยกแอลกอฮอล์ออกจากสารละลายแอลกอฮอล์เจือจาง และการแยกพีนอลหรือสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากน้ำทิ้ง การแยกของผสมอินทรีย์ เช่น การแยก o-xylene จาก p-xylene เมมเบรนที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้สามารถแบ่งตามคุณสมบัติในการเลือกผ่านได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เมมเบรนแบบชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งเลือกผ่านน้ำมากกว่าสารอินทรีย์และเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งเลือกผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ สำหรับเมมเบรนชนิดหนึ่งจะเหมาะสำหรับสารละลายชนิดหนึ่งๆ เท่านั้น

หลักการของกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน คือ องค์ประกอบหนึ่งในสารละลายของเหลวป้อนสามารถแพร่และละลายผ่านเมมเบรนสังเคราะห์โดยอาศัยผลต่างของศักย์ภาพเคมีเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) เช่น ความเข้มข้น ความดัน ความต่างศักย์ไฟฟ้า กล่าวคือ องค์ประกอบต่างชนิดกันในสารละลายมีความสามารถในการละลายและการแพร่ผ่านเมมเบรนได้ไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9

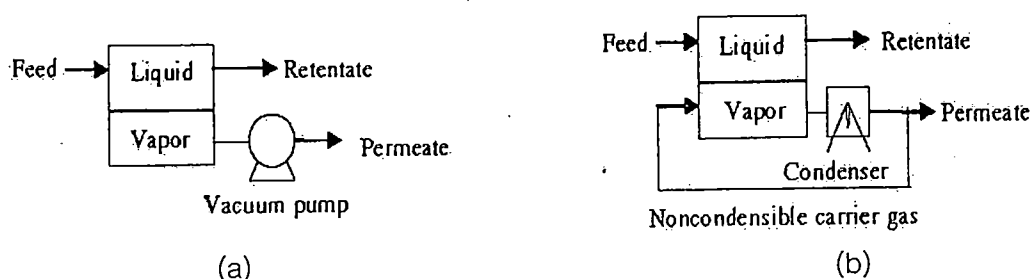


รูปที่ 2.9 หลักการของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปอเรชัน

ที่มา : Mahesh and Guest, 2004 [36]

สารละลายที่สามารถผ่านเมมเบรนได้เรียกว่า เพอร์มิเอท (permeate) จะอยู่ในสถานะไอซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากควบคุมความดันด้านเพอร์มิเอทให้มีค่าต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวของสารละลายที่สามารถผ่านเมมเบรน สำหรับวิธีการลดความดันด้านเพอร์มิเอทที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปมี 2 วิธีคือการใช้ปั๊มสุญญากาศและใช้แก๊สตัวพา (carrier gas) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10 (a) และ (b) ตามลำดับ โดยในการเปลี่ยนเฟสของของเหลวป้อนเป็นไอในเพอร์มิเอทจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการระเหยร่วมด้วย ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายป้อน และการเก็บตัวอย่างที่เป็นไอของเพอร์มิเอทสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้สารนั้นกลั่นตัวเป็นของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วิธีการลดความดันด้านเพอมีเอทสำหรับเพอร์เวปพอเรชัน

(a) ใช้ปั๊มสุญญากาศ (b) ใช้แก๊สพา

ที่มา : Winston and Karmalesh, 1992 [7]

กระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน (Pervaporation process) เป็นกระบวนการแยกของผสมโดยใช้เมมเบรน ซึ่งการเคลื่อนที่ของของเหลวผสมผ่านเมมเบรนสามารถอธิบายด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (solution-diffusion mechanism) สมมติฐานพื้นฐานของการซึมผ่านเมมเบรนโดยกระบวนการเพอร์เวปพอเรชัน คือ

- 1) ของเหลวผสมที่ป้อนเข้าสู่เมมเบรนจะสัมผัสด้านหนึ่งของเมมเบรนและจะถูกละลายหรือดูดซับเข้าสู่เมมเบรน
- 2) แต่ละองค์ประกอบในของเหลวผสมจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนโดยกลไกการแพร่ด้วยอัตราการแพร่ที่แตกต่างกัน
- 3) องค์ประกอบที่สามารถซึมผ่านเมมเบรนจะเคลื่อนที่มาสู่อีกด้านหนึ่งของเมมเบรนและเกิดการระเหยเป็นแก๊สเนื่องจากความดันที่ลดลง

2.3.1 คุณลักษณะของเพอร์เวปพอเรชัน

การคำนวณหาเพอร์มีเอทฟลักซ์ (Permeate flux)

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

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

W_i คือ น้ำหนักของสารที่ผ่านเมมเบรนในช่วงเวลา t , kg

A คือ พื้นที่ผิวของเมมเบรน, m^2

t คือ เวลาที่เพอร์มีเอทสะสมใน cold trap, h

การคำนวณหาค่าการแยก (Separation factor, α_{ij})

อัตราส่วนสมมูล คือ อัตราส่วนของสัดส่วนมวลของสารชนิดนั้น ๆ ใน 2 เฟสที่จุดสมดุลสำหรับกรณีของไอ-ของเหลว (vapor - liquid) จะนิยามโดยค่า K (K -value) หรืออัตราส่วนที่สมดุลระหว่างไอและของเหลว คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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 จะสามารถนิยามอยู่ในรูปของอัตราส่วนสมดุล เรียกว่า separation factor สำหรับกรณีของ vapor-liquid ความสามารถในการระเหยสัมพัทธ์ (relative volatility) สามารถนิยามตามสมการดังนี้

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

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

y_i, y_j คือ เศษส่วนเชิงมวลของสารชนิด i และ j ในเฟอรัมไอ

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

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

2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อศักยภาพของเมมเบรน

ตามกลไกการละลาย-การแพร่ ค่าพลักซ์จะสูงขึ้นเมื่อสายโซ่ของพอลิเมอร์ในเมมเบรนมีความสามารถในการเคลื่อนไหว และชนิดของสารป้อนมีความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนได้เพิ่มขึ้น คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการแพร่ของสารคือ โครงสร้างทางเคมีที่ใช้ผลิตเมมเบรน จำนวนการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ในเมมเบรนและการมีรูพรุนของเมมเบรน อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโมเลกุลของสารกับเมมเบรน [45]

2.3.3 ข้อดีของกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์เวปพอเรชัน

กระบวนการเพอร์เวปพอเรชันมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการแยกอื่นๆ ดังนี้คือ

1 ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถแยกโดยใช้ความดันต่ำ ตัวอย่างเช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ ถ้ากระบวนการเพอร์เวปพอเรชันจะมีข้อได้เปรียบทางด้านพลังงานกว่าการกลั่นหรือการต้มระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เนื่องจากกระบวนการเพอร์แวกพอเรชันสามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งเพอร์มิเอทและรีเทนเทท เช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลโดยใช้เมมเบรนที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) จะได้รีเทนเทท คือ เอทานอลเข้มข้น สำหรับเพอร์มิเอทส่วนใหญ่เป็นน้ำซึ่งมีเอทานอลปนออกมาเพียงเล็กน้อย โดยสามารถนำกลับไปแยกใหม่ได้อีกครั้งโดยใช้เมมเบรนที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

3 สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิห้องได้ เนื่องจากเป็นการแยกสารตามคุณสมบัติการเลือกผ่านของเมมเบรนต่อสารละลายป้อนที่ต้องการแยก จึงเหมาะสำหรับการแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้

4 สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ไม่ยาก เนื่องจากชุดเมมเบรนมีลักษณะเป็นชุด (module) หรือหน่วย และสามารถนำหน่วยย่อยๆ มาเรียงต่อกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแยกได้

5 สามารถดำเนินการแบบกะ (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) ตลอดจนถึงติดตั้งระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้ไม่ยุ่งยาก

6 เนื่องจากอุปกรณ์เมมเบรนมีการออกแบบให้มีพื้นที่ในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูงจึงมีขนาดกระทัดรัด ไม่เปลืองพื้นที่ในการดำเนินการ

7 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเพอร์แวกพอเรชันมีขนาดเล็กกระทัดรัดสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย

8 หลักการทำงานของกระบวนการไม่ถูกจำกัดด้วยสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องจุดอะซิโทรอป

9 ระบบเพอร์แวกพอเรชันไม่ต้องการใช้สารเคมีตัวที่สามเหมือนการกลั่นแบบอะซิโทรอป จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

จากข้อได้เปรียบของกระบวนการดังกล่าว หากสามารถนำกระบวนการเมมเบรนแบบเพอร์แวกพอเรชันไปใช้แทนกระบวนการแบบเดิมได้ เช่น สำหรับการแยกเอทานอล-น้ำ จากชีวมวลแทนการกลั่นที่ใช้อยู่ หรืออาจนำมาใช้แทนบางขั้นตอน เช่น แทนการกลั่นแบบอะซิโทรอปก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์

บทที่ 3

การทดลอง

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

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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

- 3.3.1 เครื่องอัดความดัน (Autoclave)
- 3.3.2 เครื่องเหวี่ยงแยกหนีศูนย์กลาง (Centrifuge)
- 3.3.3 เครื่องกวน (hot plate stirrer)
- 3.3.4 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
- 3.3.5 ขวดโพลีโพรพิลีน
- 3.3.6 ตู้อบ (Oven)
- 3.3.7 เต้าเผา (Carbolite)
- 3.3.8 ปีกเกอร์ (Beaker)
- 3.3.9 ฟอลด์ยถนอมอาหาร(Aluminum foil)
- 3.3.10 ถ้วยกระเบื้องเคลือบ
- 3.3.11 บิวเรท (Buret)
- 3.3.12 เครื่องชั่ง
- 3.3.13 กระบอกลม (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)

3.3 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมพื้นผิวของตัวรองรับ

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

3.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอ

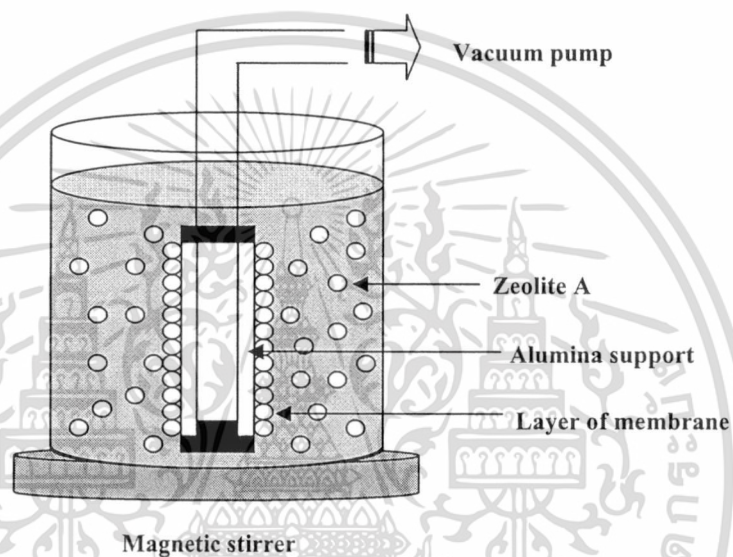
ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.723 กรัม กับน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร ในปีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร บั่นกวนให้เข้ากัน เติมน้ำละลายลงในปีกเกอร์ขนาด 40 มิลลิลิตร สองส่วนเท่าๆกัน ผสมโซเดียมอะลูมิเนต 8.258 กรัม ลงในปีกเกอร์แรก บั่นกวนจนได้สารละลายสีเหลืองใส ผสมโซเดียมเมตาซิลิเกต 15.48 กรัม ลงในปีกเกอร์ที่สอง บั่นกวนจนได้สารละลายสีขาวใส จากนั้นเติมน้ำละลายในปีกเกอร์ที่สองลงในสารละลายปีกเกอร์ที่หนึ่งอย่างรวดเร็ว ภายในขวดโพลีเมอรัลชนิดโพลีโพรพิลีน ขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

125 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเขย่าขวดประมาณ 10 นาที จะได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นเจลลี่เหลืองครีม 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



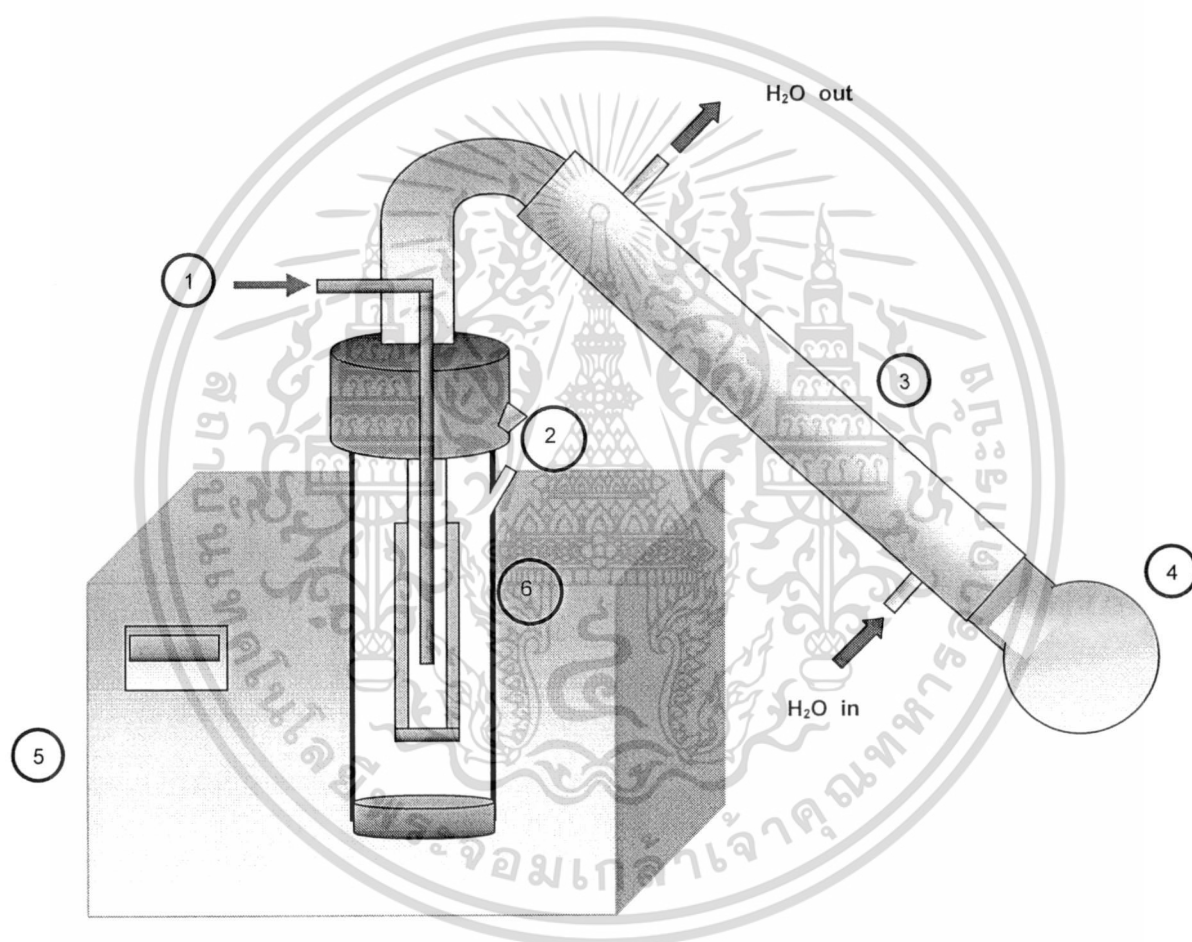
รูปที่ 3.2 ชุดสำหรับ Coat ซีโอไลต์ชนิดเอลงบนผิวตัวรองรับอะลูมินา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.3 เครื่อง Autoclave สำหรับอัดความดันให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 กระบวนการเมมเบรนเพอร์เวปอเรชัน

การทดลองนี้ใช้เมมเบรนแบบท่อโดยมีการจัดวางตามแผนผังในรูปที่ 3.4 โดยป้อนสารละลายเอทานอลกับน้ำเข้าสู่รีแอกเตอร์ (6) และควบคุมความเข้มข้นของสารป้อนให้คงที่ด้วยการเติมสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านช่องเติมสาร (2) ให้ความร้อนแก่สารละลายด้วยฮีตเตอร์ (5) โขงสารละลายที่แพร่ผ่านเมมเบรนจะเคลื่อนที่ไปยังชุดควบแน่น (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 ให้ระยะเวลาในการทดลอง 1 ชั่วโมง และนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารละลาย

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

3.4.6 ศึกษาสัณฐานวิทยา (morphology) ของเมมเบรนเชิงประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

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

3.4.7 ศึกษาการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) ของเมมเบรนเชิงประกอบ

ตรวจสอบความเป็นผลึกและรูปแบบ 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

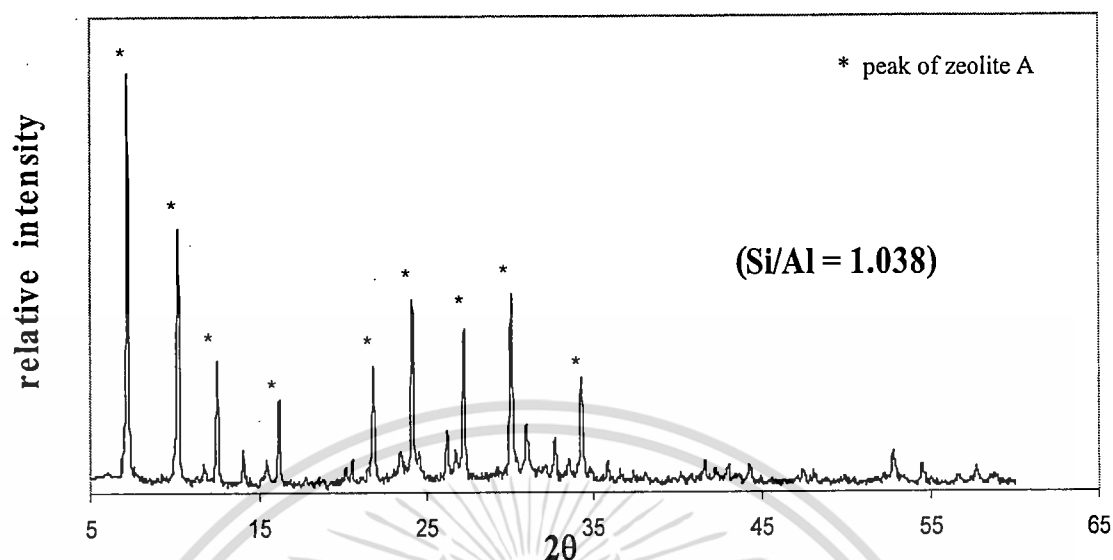
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

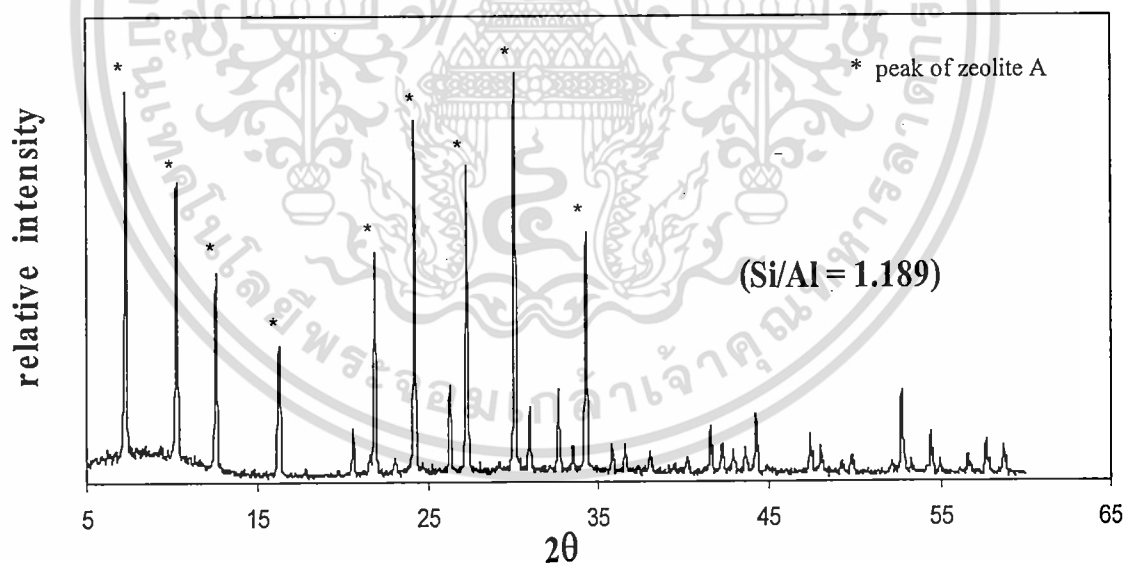
การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอ ได้แก่ ผลของอัตราส่วนโดยโมลซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 1.038, 1.189, 1.229 และ 1.319 ผลของเวลาในการตกผลึกเท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 12 ชั่วโมง โดยขั้นตอนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอนั้น เริ่มจากเตรียมสารละลายซิลิกาและสารละลายอะลูมินต ผสมลงในขวดโพลีเอทิลีน นำไปอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส ล้างผลึกด้วยน้ำกลั่นเพื่อปรับ pH อยู่ในช่วง 8-9 จากนั้นนำผลึก ซีโอไลต์ที่ได้ไปอบที่ 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 เกิดพีคที่ตำแหน่ง 2θ ซึ่งใกล้เคียงกับตำแหน่งมาตรฐานของซีโอไลต์ชนิดเอทั้งคู่ แต่พีคของ ซีโอไลต์ชนิดเอที่เตรียมด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 เกิดพีคสูงสุด นั้นแสดงว่า ซีโอไลต์ที่เตรียมได้มีความเป็นผลึกสูงสุด แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 และเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของสารละลายเริ่มต้นเป็น 1.229 และ 1.319 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะของกราฟ XRD แตกต่างจากกราฟมาตรฐานของซีโอไลต์เอคือ มีพีคที่ตำแหน่งอื่นๆ ที่ไม่ใช่ตำแหน่งของ ซีโอไลต์ชนิดเอเกิดขึ้น ดังแสดงรูปที่ 4.3 และ 4.4 จึงอาจสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.229 และ 1.319 ซีโอไลต์ชนิดเอมีการเกิดผลึกที่ไม่สมบูรณ์ และมีองค์ประกอบอื่นผสมอยู่

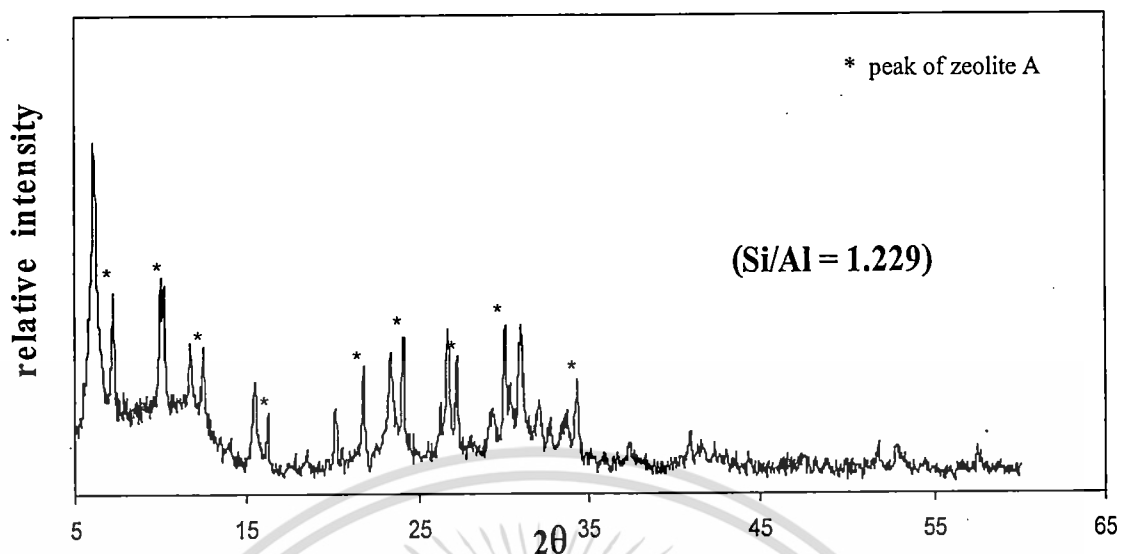


รูปที่ 4.1 XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.038

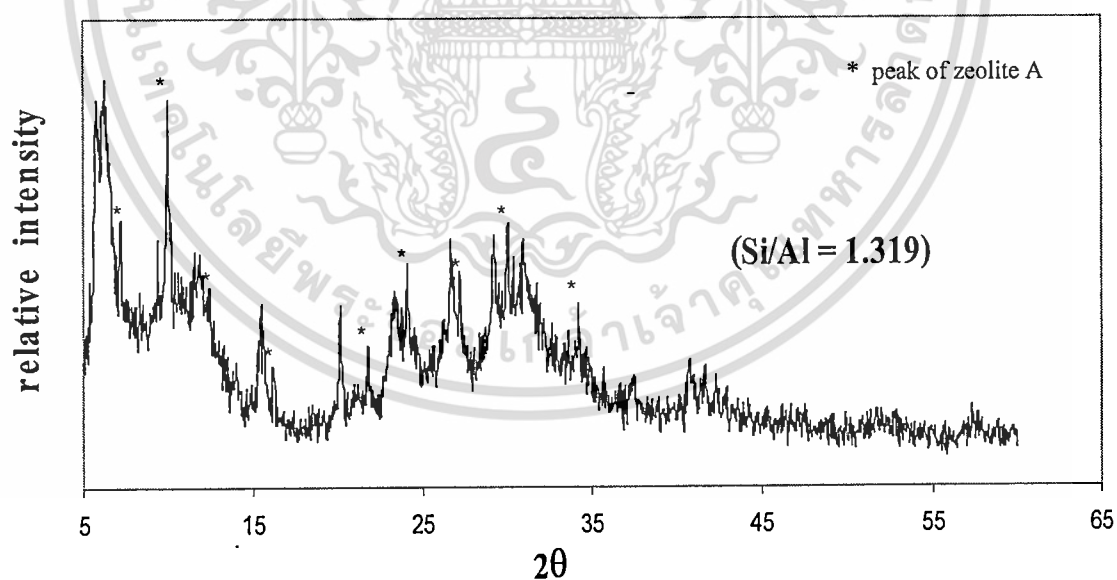


รูปที่ 4.2 XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



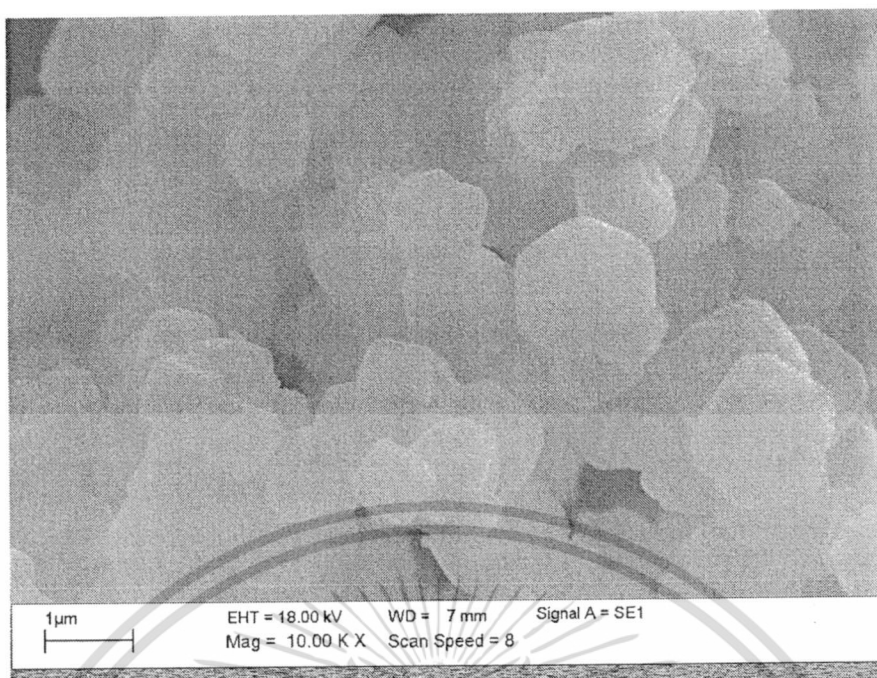
รูปที่ 4.4 XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ที่สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.319

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

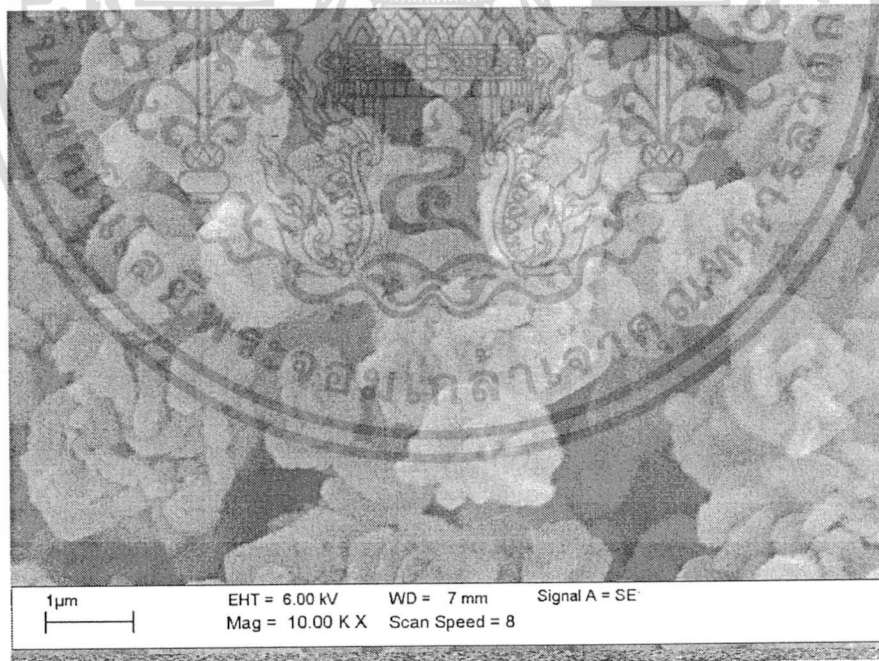
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของซีโอไลต์ชนิดเอ (XRF)

คำนวณ		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

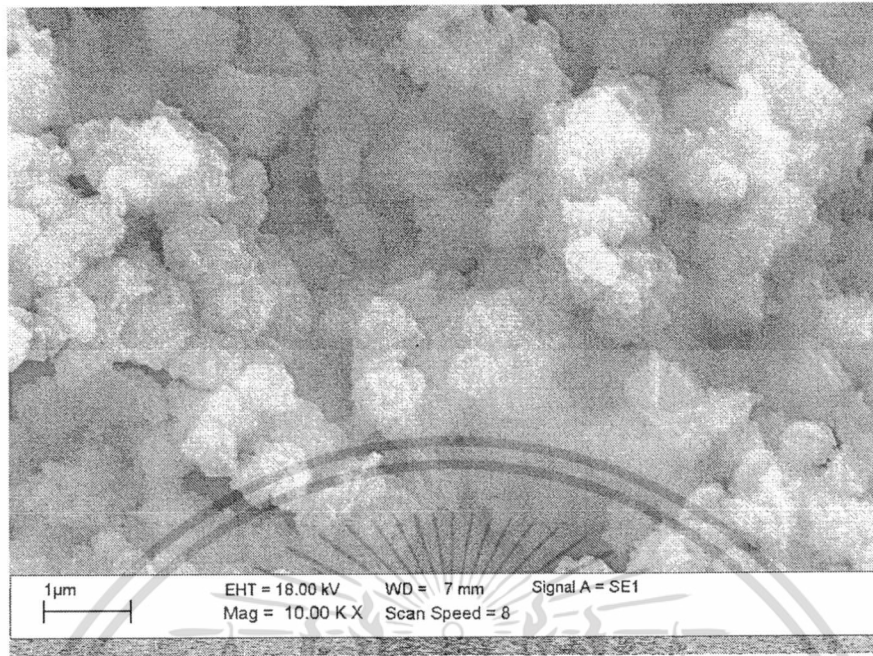
วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์ชนิดเอที่สังเคราะห์ ด้วยเครื่อง XRF แสดงในตารางที่ 4.1 โดยองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์ชนิดเอที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลของ Si/Al เท่ากับ 0.641, 0.961, 1.441 และ 2.242 มีสัดส่วนโมลของ Si/Al ของซีโอไลต์ชนิดเอที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 1.038, 1.189, 1.229 และ 1.319 ตามลำดับ 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 เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของ ซีโอไลต์ชนิดเอด้วยภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่า ซีโอไลต์ที่เตรียมจากอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 SEM ซีโอไซด์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.229 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

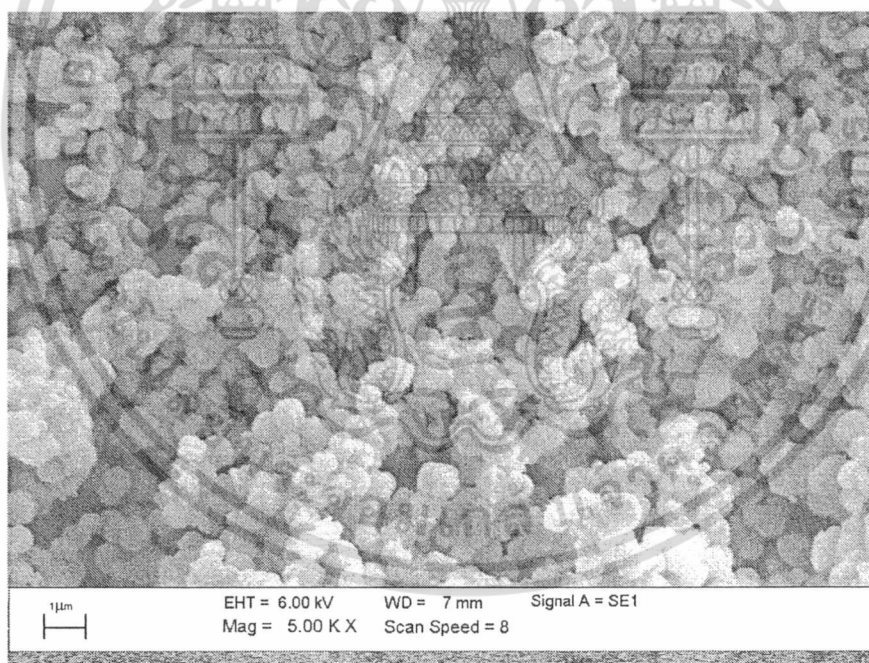


รูปที่ 4.8 SEM ซีโอไซด์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.319 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

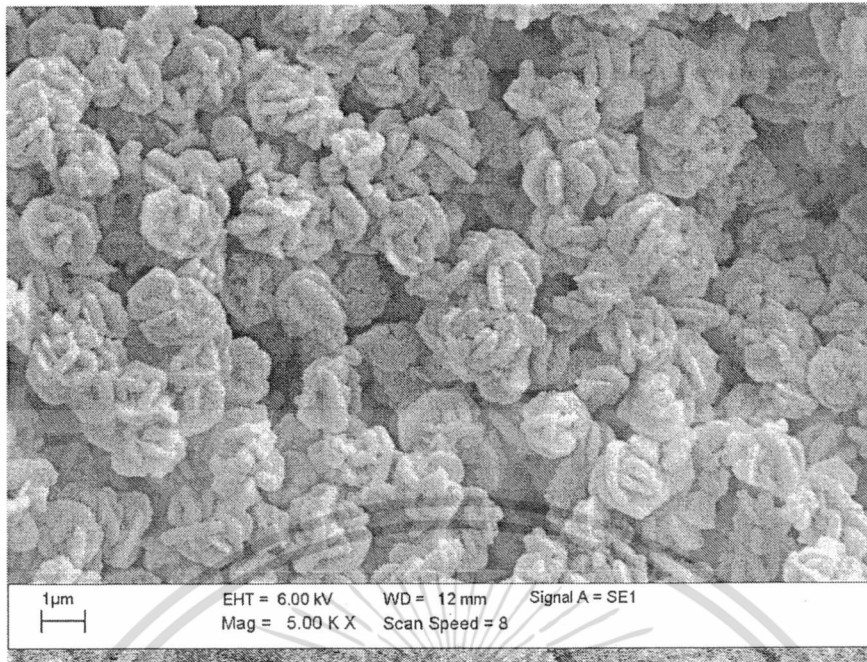
4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการตกผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ

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

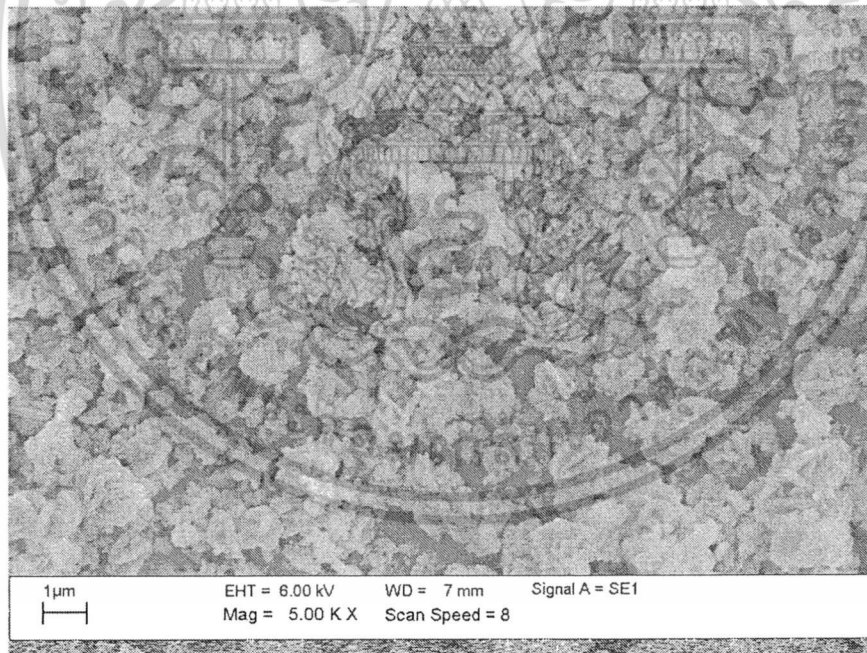


รูปที่ 4.9 SEM ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 2 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

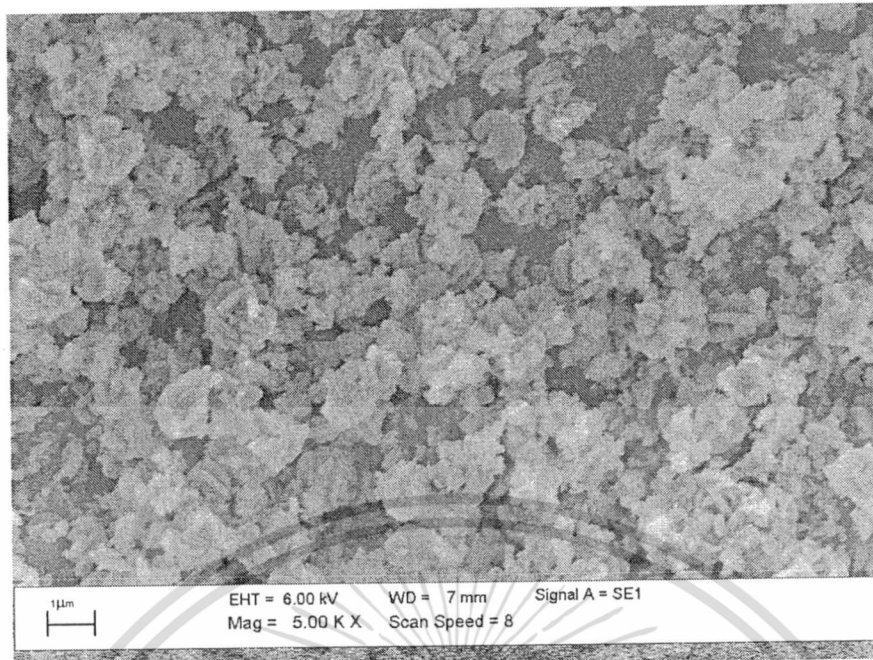


รูปที่ 4.10 SEM ซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

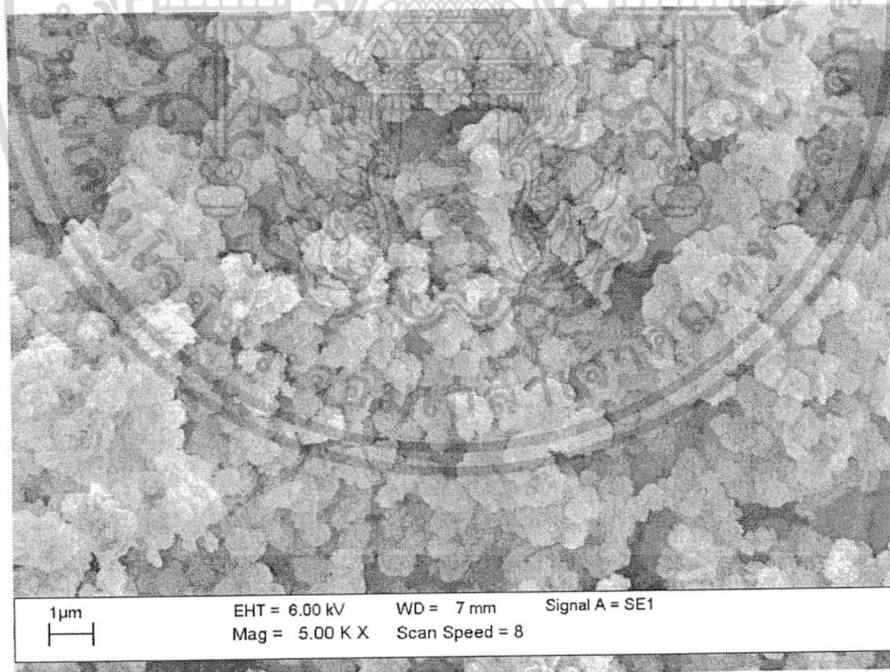


รูปที่ 4.11 SEM ซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 6 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 SEM ซีโอไซด์เอทีสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 8 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส



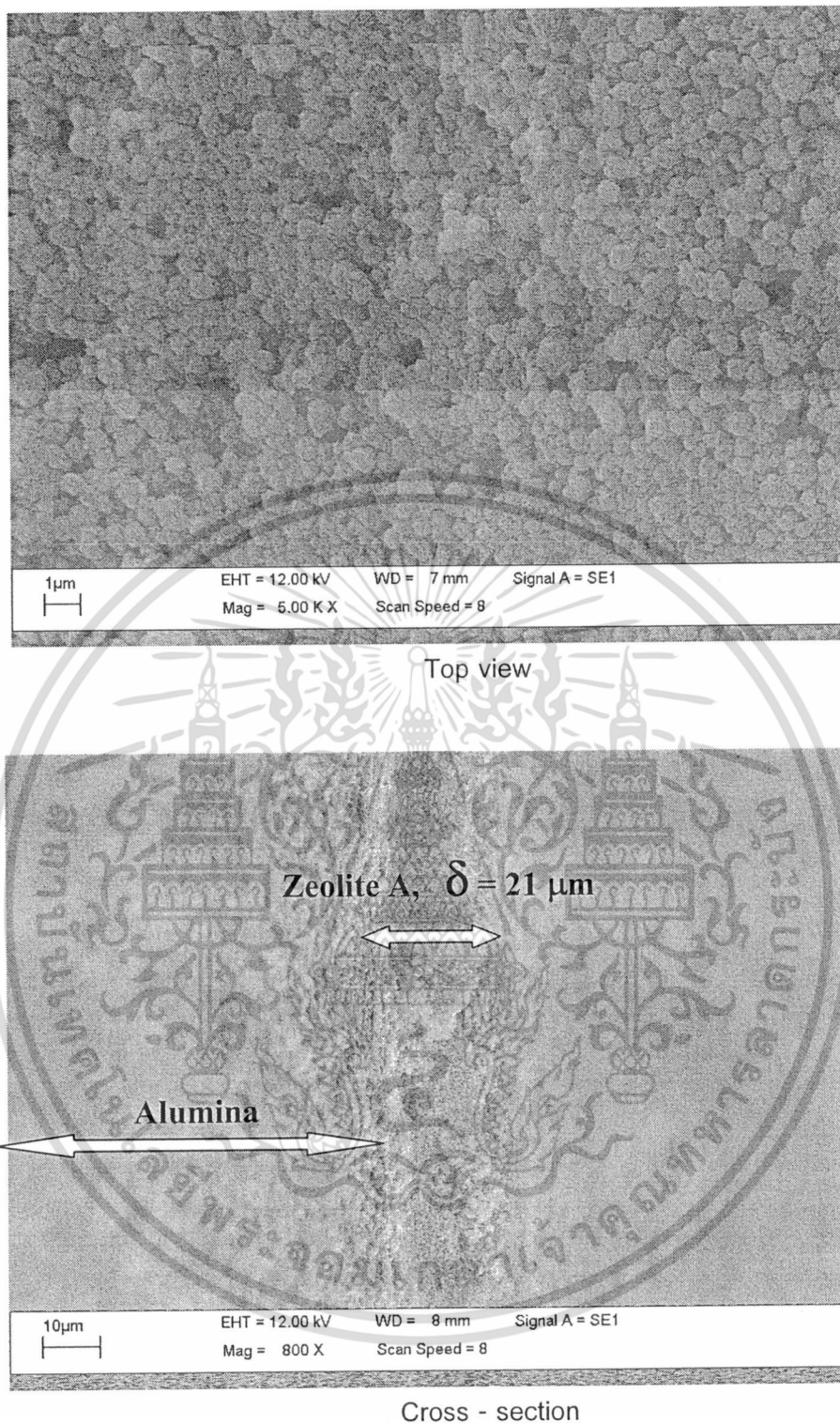
รูปที่ 4.13 SEM ซีโอไซด์เอทีสังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1.189 ที่เวลาในการตกผลึก 12 ชั่วโมง อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของปริมาณซีโอไลท์ชนิดเอทีเคลือบบนผิวตัวรองรับอะลูมินา

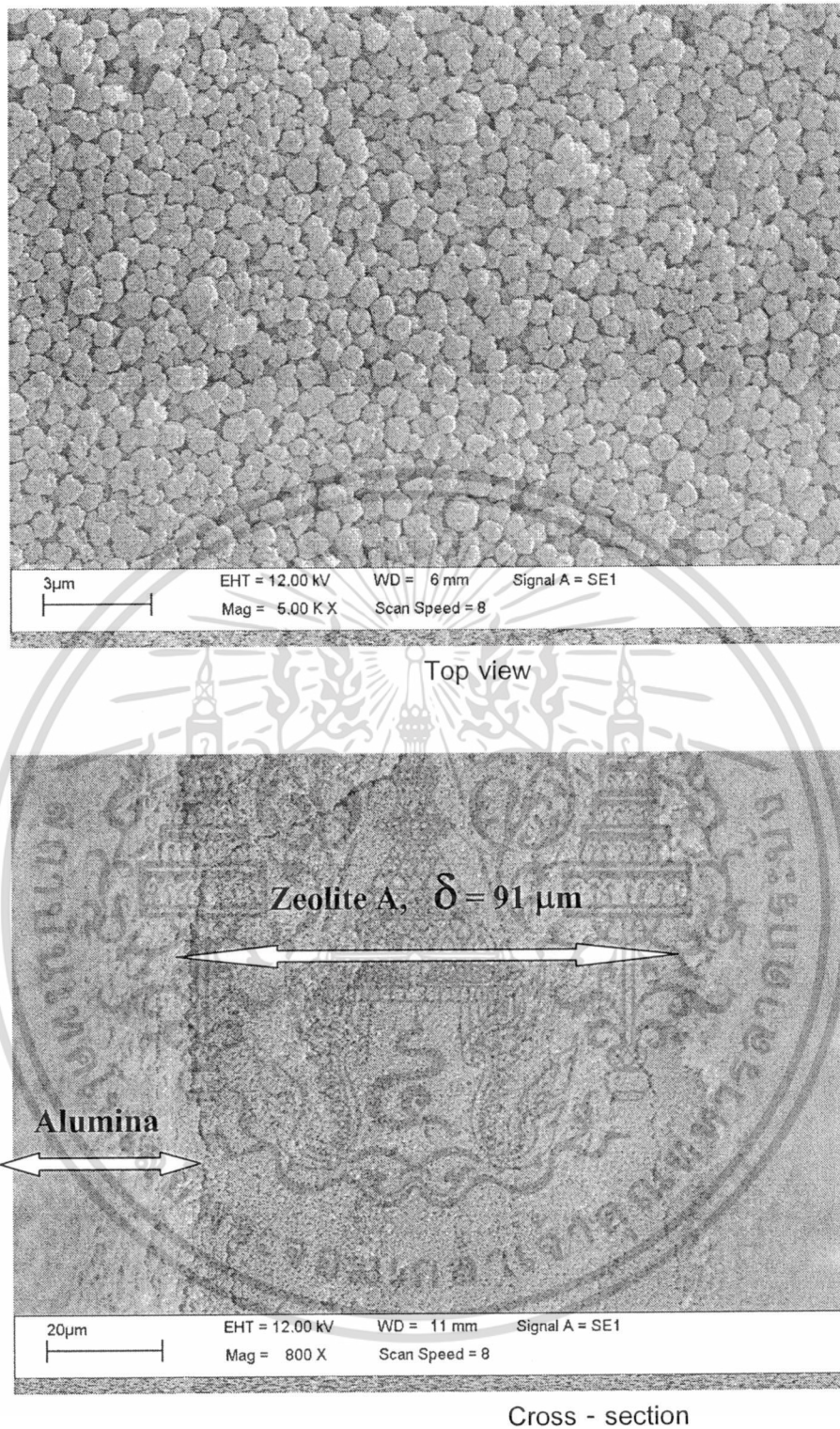
ศึกษาผลของปริมาณซีโอไลท์ชนิดเอทีเคลือบบนผิวตัวรองรับอะลูมินาด้วยวิธีการดูดสารละลายซีโอไลท์ผ่านทางผิวตัวรองรับอะลูมินาด้วยปั๊มสุญญากาศ ที่ปริมาณซีโอไลท์เท่ากับ 96, 241 และ 482 กรัมต่อตารางเมตร ที่เวลา 2 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ ด้วยภาพถ่ายจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าเมมเบรนที่เตรียมจากสารละลายที่มีปริมาณ ซีโอไลท์ 96 กรัมต่อตารางเมตร ผิวด้านบนของตัวรองรับอะลูมินาถูกเคลือบด้วยอนุภาคของ ซีโอไลท์ไม่สม่ำเสมอ และเกิดเป็นช่องว่างบริเวณผิวที่เคลือบ โดยมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 21 ไมโครเมตร แสดงในรูปที่ 4.14 และเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลท์เป็น 241 กรัมต่อตารางเมตร พบว่าผิวด้านบนของตัวรองรับอะลูมินาถูกเคลือบด้วยอนุภาคซีโอไลท์อย่างหนาแน่น และอนุภาคมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 91 ไมโครเมตร แสดงดังรูป 4.15 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลท์ให้มากขึ้นเป็น 482 กรัมต่อตารางเมตร พบว่าอนุภาคซีโอไลท์ที่เคลือบบนผิวตัวรองรับอะลูมินาจับตัวเป็นกลุ่มก้อนและก่อตัวเป็นผลึกขนาดใหญ่ทำให้พื้นผิวของตัวรองรับที่ถูกเคลือบไม่สม่ำเสมอมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 105 ไมโครเมตร แสดงดังรูป 4.16

เมื่อเปรียบเทียบเมมเบรนซีโอไลท์ชนิดเอทีเตรียมได้ทั้ง 3 แบบ พบว่าเมมเบรนซีโอไลท์ชนิดเอทีเคลือบด้วยปริมาณซีโอไลท์ชนิดเอ 241 กรัมต่อตารางเมตร พื้นผิวด้านบนของตัวรองรับอะลูมินาถูกเคลือบปิดอย่างสนิทด้วยอนุภาคของซีโอไลท์ชนิดเอ พื้นผิวด้านบนของเมมเบรนเรียบสม่ำเสมอ อนุภาคของซีโอไลท์ชนิดเอมีการกระจายดีและยึดเกาะกันอย่างหนาแน่น ส่งผลทำให้เมมเบรนที่เตรียมได้มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงเลือกเมมเบรนซีโอไลท์ชนิดเอทีเตรียมได้นี้ไปใช้ในการทดลองแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ ด้วยกระบวนการเพอร์เมอเรนซ์ต่อไป



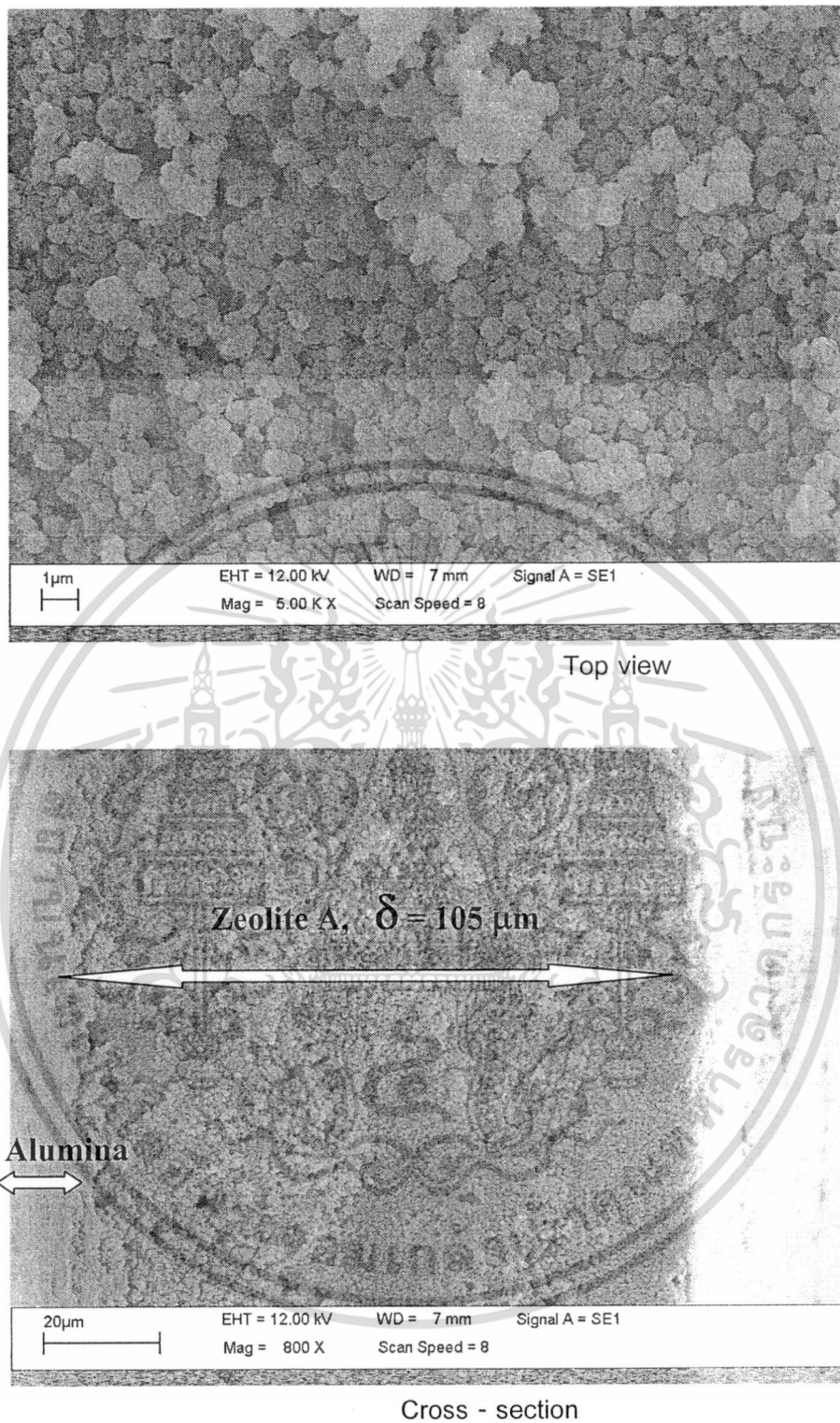
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา: ปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอทีใช้ในการเคลือบ 96 กรัมต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา: ปริมาณซีโอไลต์ชนิดเอทีใช้ในการเคลือบ 241 กรัมต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา: ปริมาณ ซีโอไลต์ชนิดเอทีใช้ในการเคลือบ 482 กรัมต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดสอบกระบวนการเพอร์เวปพอร์ชันของเอทานอล-น้ำ

4.4.1 ผลของปริมาณซีไอไลต์เอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา

ศึกษาผลของปริมาณซีไอไลต์เอทีเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินาต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์และค่าการแยกของน้ำ โดยทำการทดลองแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนซีไอไลต์ชนิดเอทีที่มีความหนา 20, 91 และ 105 μm ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของเมมเบรนซีไอไลต์ชนิดเอ (δ) มีค่ามากขึ้น เนื่องจากค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์จะแปรผกผันกับ δ แสดงดังสมการที่ 6 เมื่อ δ มีความหนามากขึ้น ทำให้ระยะทางในการแพร่ผ่านของสารเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลทำให้สารแพร่ผ่านออกมาน้อยลง ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำลดลง แสดงดังรูปที่ 4.17

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

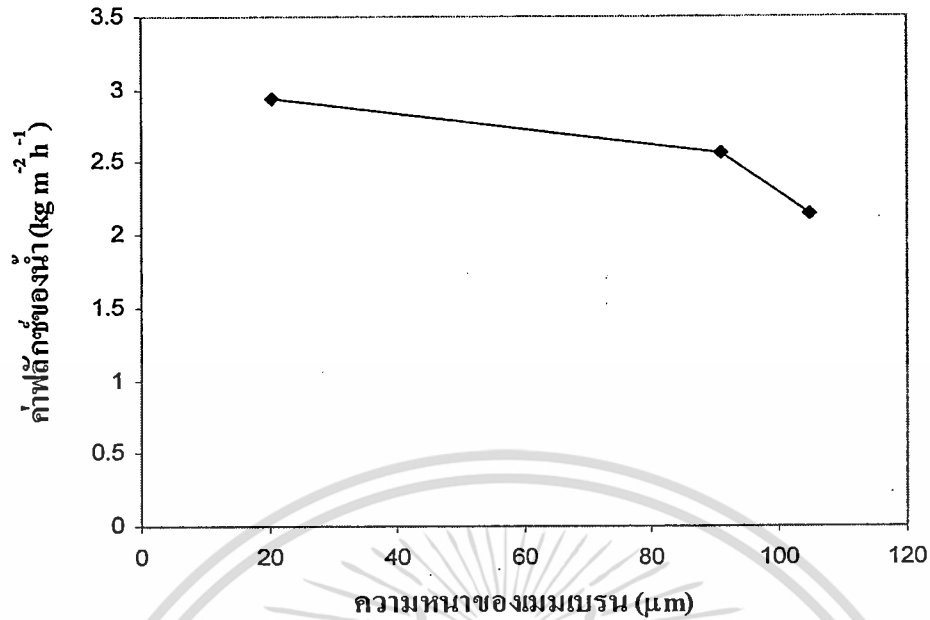
โดยที่ J คือ ค่าฟลักซ์ ($\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$)

δ คือ ความหนาของเมมเบรน (m)

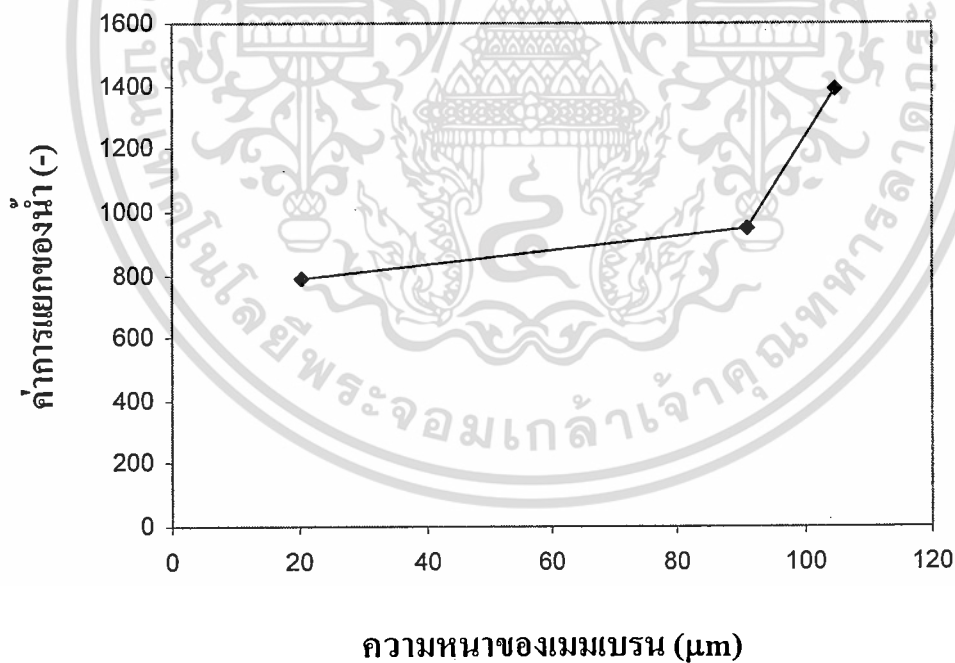
P คือ สภาวะซึมผ่านสารของเมมเบรน (permeability)
($\text{kg m m}^{-2}\text{Pa}^{-1}\text{h}^{-1}$)

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



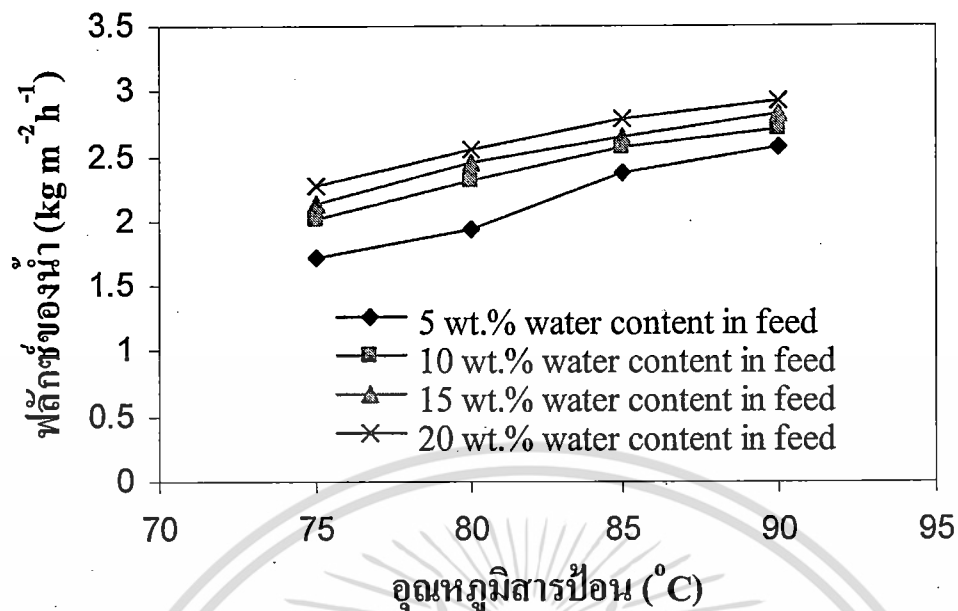
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับความหนาของเมมเบรน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

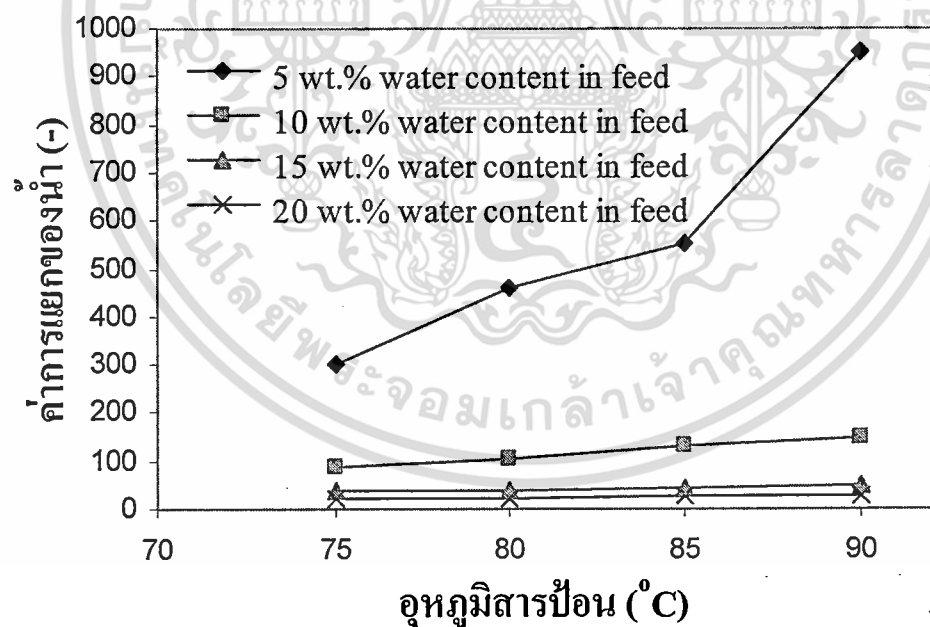
4.4.2 ผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อน

ศึกษาผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อนที่มีต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำ โดยทำการทดลองแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอที่มีความหนา $91 \mu\text{m}$ 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 ส่งผลทำให้เกิดแรงขับดัน (Driving force) มากขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น ส่งผลทำให้ค่า ฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าฟลักซ์มีค่าเท่ากับ 1.73 ถึง $2.92 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ และค่าการแยกมีค่าเท่ากับ 22 ถึง 949 แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่ามีค่าสอดคล้องกับ 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

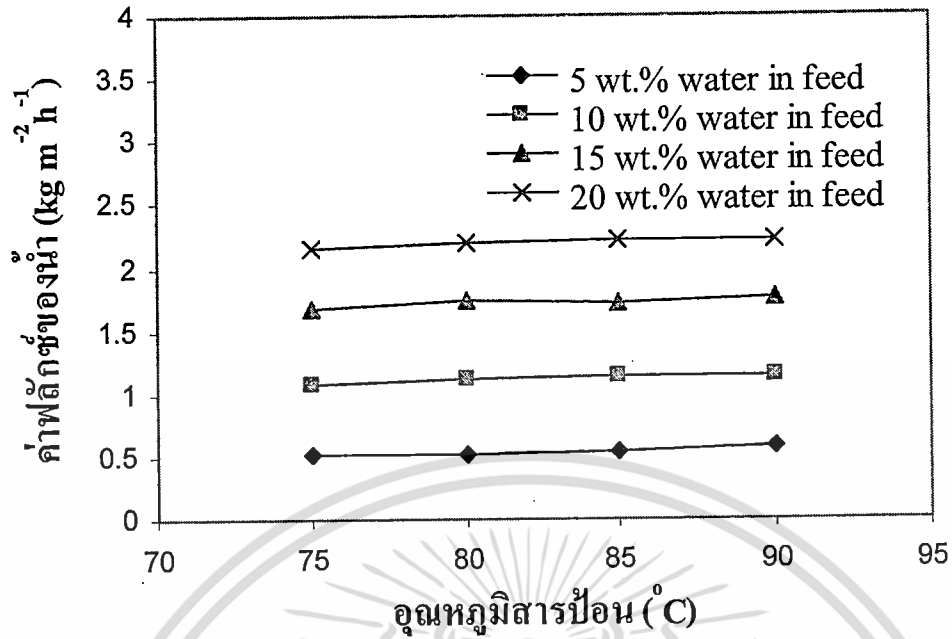


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm

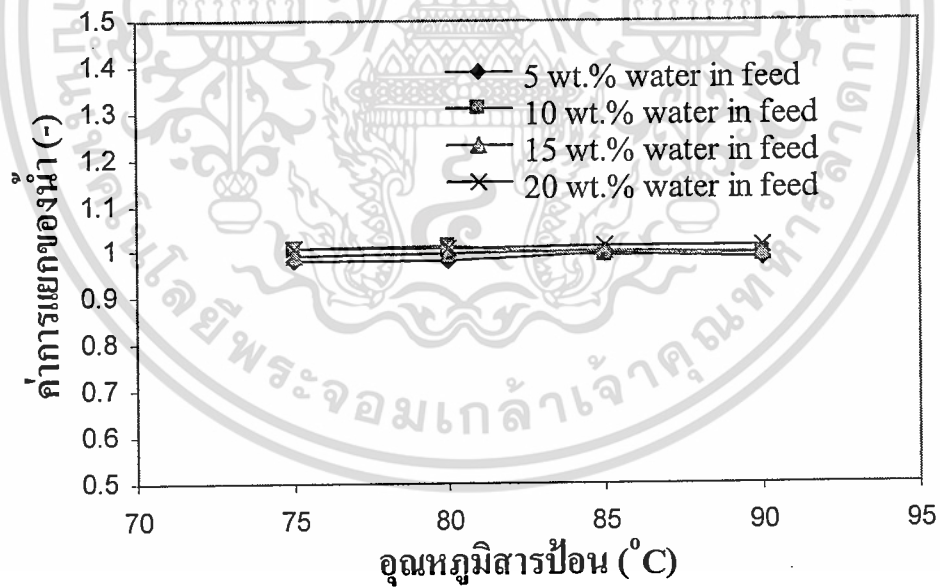


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10, 15 และ 20 wt.% ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อน

ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่มีต่อค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของน้ำ และค่าการแยกของน้ำ โดยทำการทดลองแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ ผ่านเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอที มีความหนา 90.98 μm ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 wt.% และอุณหภูมิของสารละลายป้อนเท่ากับ 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของสารละลายในด้านเพอร์มิเอทและด้านรีเทนเททมีค่าต่างกันมากขึ้น 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

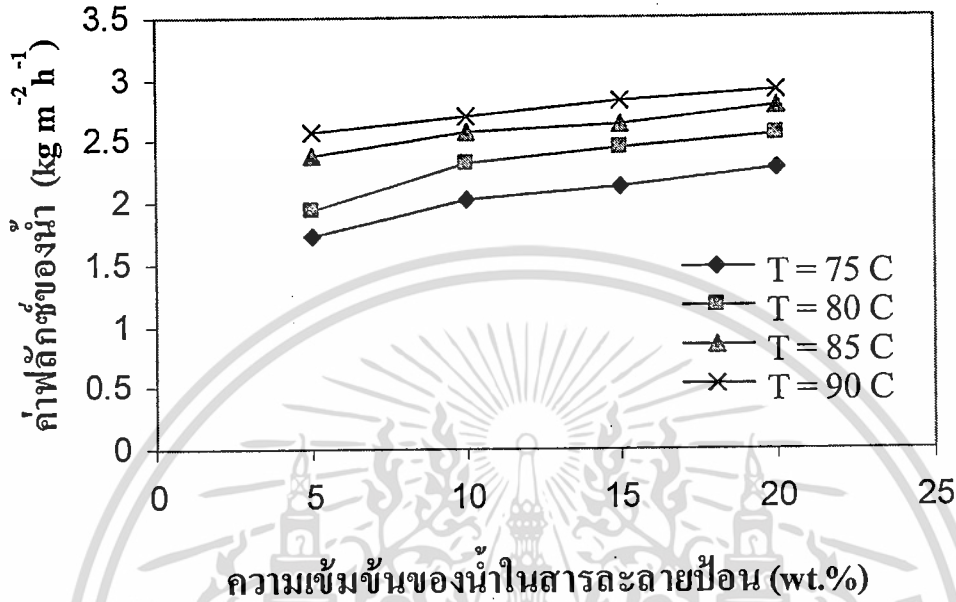
D_i = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร i

C_i = ความเข้มข้นของสาร i

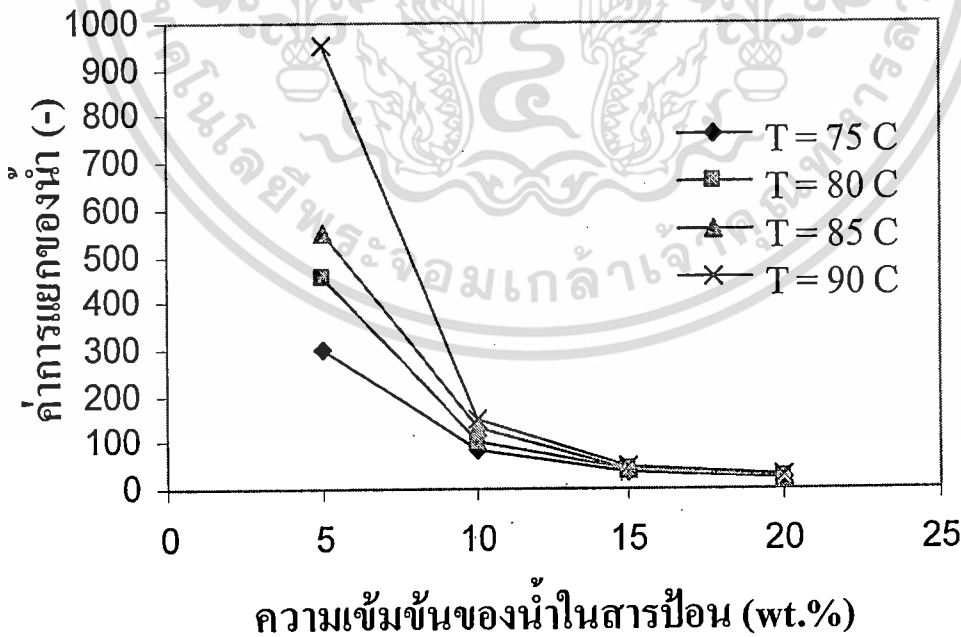
ส่วนค่าการแยกของน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก น้ำ-เอทานอล สามารถเกิด coupling effect ได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้โมเลกุลของน้ำและเอทานอลเกิดการคู่ควบ (Coupling) ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้ช้าลง [45] ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้โมเลกุลของน้ำและเอทานอลเกิดการคู่ควบเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีปริมาณน้ำที่แพร่ผ่านออกมาน้อยลง ส่งผลทำให้ค่าการแยกของน้ำมีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.24 จากผลการทดลองที่ได้พบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองของ Jalal J. Jafar และคณะ[46] ทำการศึกษาการแยกของผสมแอลกอฮอล์กับน้ำ ด้วยกระบวนการเพอร์เวปอเรชันโดยใช้เมมเบรนซีโอไลต์ชนิด 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 $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ และค่าการแยกไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าคงที่ใกล้เคียงเท่ากับ 1 แสดงว่าสารละลายสามารถแพร่ผ่านผิวหนังตัวรองรับอะลูมินาได้เกือบทั้งหมด ทำให้สัดส่วนของน้ำต่อเอทานอลทั้งในเฟอรัมไอเทและรีเทนเททมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ไม่เกิดการแยก แสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26

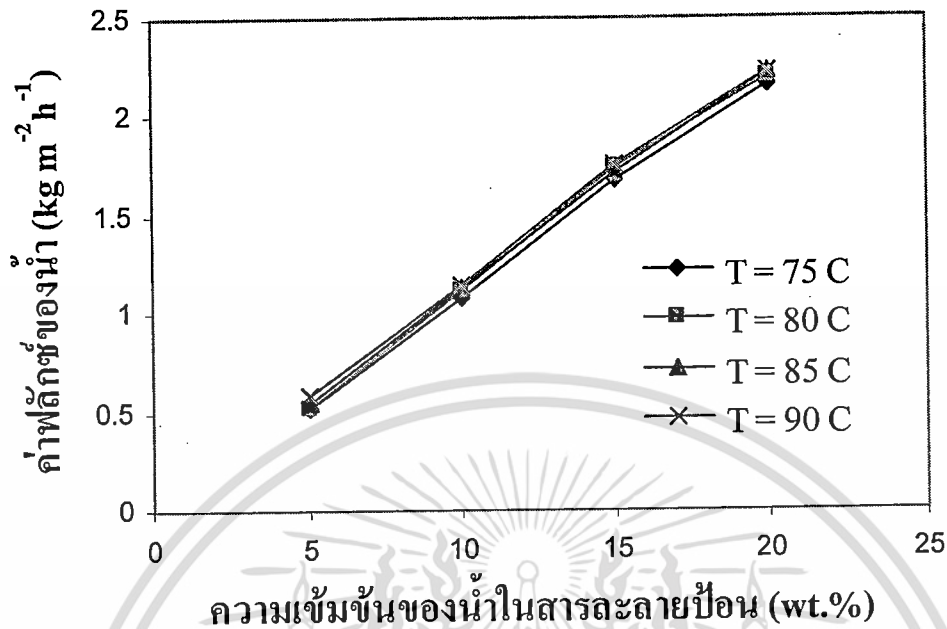


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm

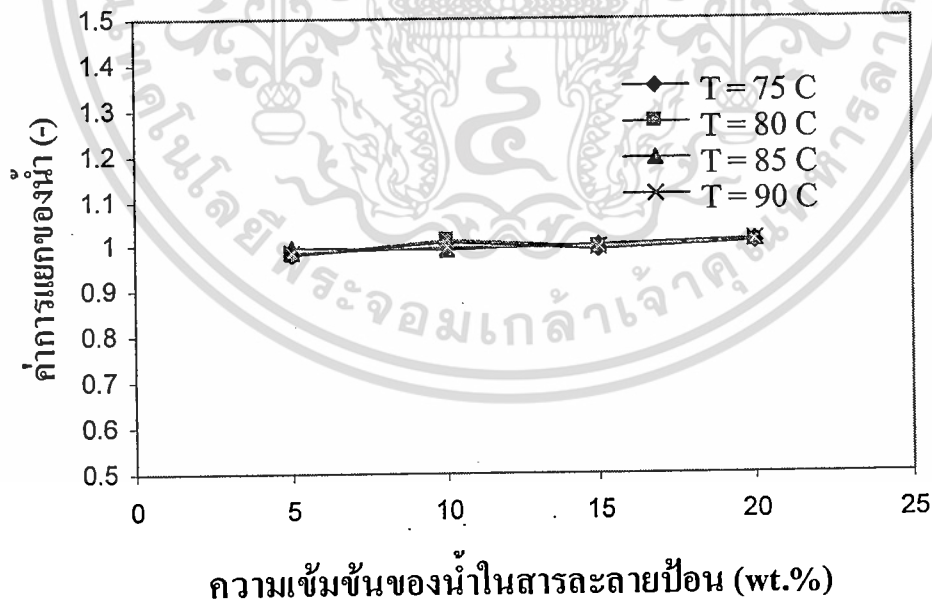


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนที่อุณหภูมิ 75, 80, 85 และ 90 °C ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 91 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

ซีโอไลต์ชนิดเอสามารถสังเคราะห์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ได้แก่ เวลาในการตกผลึก และอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการตกผลึกที่สมบูรณ์ที่สุดคือ 4 ชั่วโมง และอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ให้ความเป็นผลึกที่ดีที่สุดคือ 1.189 อนุภาคของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 685 นาโนเมตร เมื่อนำซีโอไลต์ชนิดเอที่สังเคราะห์ได้เคลือบลงบนผิวตัวรองรับอะลูมินา เมมเบรนพบว่า เมมเบรน ซีโอไลต์ชนิดเอมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 91 ไมโครเมตร เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของเมมเบรนด้วยการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการเพอร์เวปพอร์ชันโดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความหนาของเมมเบรน อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายป้อน 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

เอกสารอ้างอิง

- [1] เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ และสิทธิโชค วัลลภาทิพย์. 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 York : 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. "Permsselective 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 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี.
- [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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 หุ่นสงค์ และสุชาติ วิโรจน์ยืนยง. 2543 “การดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วยซีลิกาเจล, ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY.” วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- [28] King, R.B. 1994. **Encyclopedia of inorganic chemistry**. Chichester : John Wiley, 4365 – 4391
- [29] ภาณุสิทธิ์ ฐระท่า. 2544. “การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดบีต้าจากเถ้าลอยถ่านลิกไนต์.” สาขาวิชา
วิศวกรรมเคมี 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
- [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 \square -Al₂O₃ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [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 จินฉิว และไพบุลย์ อินนาจิตร. 2548. "การแยกเอทานอล-น้ำ โดเนวีซีเพอร์เวปอเรชัน ด้วยเมมเบรนชนิดโพลีเอไมด์และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์." สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลลา.
- [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
- [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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยได้จัดทำเป็นบทความทางวิชาการเรื่อง "การเตรียมซีไอไลต์ชนิดเอนบดัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนเพื่อแยกเอทานอล-น้ำ " ในวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 25 ฉบับที่3 เดือนกันยายน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรน เพื่อแยกเอทานอล-น้ำ

Preparation of A-type zeolite coated alumina membrane for separation of ethanol-water mixture

ปรมินทร์ ขวัญนอน พรสวรรค์ อิศวแสงรัตน์* ดวงกมล ณ ระนอง
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
*email address: kkporns@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ทำการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเพื่อแยกเอทานอล-น้ำ ซีโอไลต์ชนิดเอสังเคราะห์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ซึ่งได้แก่ เวลาในการตกผลึกและอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา จากการทดลองพบว่าเวลาในการตกผลึกที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 ชั่วโมง และอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่เหมาะสมที่สุดคือ 1 อนุภาคของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 685 nm จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้เคลือบลงบนผิวตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนพบว่าเมมเบรนมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 90.98 μm ทดสอบประสิทธิภาพของเมมเบรนด้วยการแยกเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการเพอร์เวปอเรชันที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายป้อนเท่ากับ 80, 90 และ 95 wt.% และอุณหภูมิของสารละลายป้อนเท่ากับ 78, 80 และ 85 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่เตรียมได้มีค่าการแยกเท่ากับ 863 และค่าฟลักซ์ของน้ำเท่ากับ 2.56 $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ เมื่อนำไปใช้แยกสารละลายที่มีความเข้มข้นของน้ำ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

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, respectively. Average size of the crystals was 685 nm. The appropriate amount of the synthesized zeolite coated on alumina support an average thickness was about 90.98 μm . The membranes were tested for the separation ethanol-water mixtures by pervaporation at concentrations in the feed solution of 80, 90 and 95 wt.% and feed temperatures at 78, 80 and 85 °C. The experimental results showed that the obtained A-type zeolite coated alumina membrane had the separation factor of 863 and the water flux was 2.56 $\text{kg/m}^2\text{h}$ when the feed solution of 5 wt% water was separated at 85 °C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การสังเคราะห์ซีโอไลต์เมมเบรนเป็นที่สนใจอย่างแพร่หลาย และมีการนำซีโอไลต์เมมเบรนไปใช้ประโยชน์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติทางโครงสร้างที่ดี คือ มีรูพรุนขนาดเล็ก มีความเสถียรทางความร้อนที่ดี และมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ซีโอไลต์เมมเบรนมีหลายชนิด เช่น MFI, LTA-type, และ FAU-type การเตรียมซีโอไลต์เมมเบรนจะแตกต่างกันไปตามชนิดของตัวรองรับที่ใช้ (Al_2O_3 , TiO_2 หรือ ZrO_2) วิธีการสังเคราะห์มีอยู่หลายวิธี เช่น *insitu hydrothermal synthesis* [1] และ *secondary growth* [2] เป็นต้น ซีโอไลต์เมมเบรนมีความสามารถในการแยกของผสมที่แยกออกจากกันยากด้วยวิธีแบบเดิม เช่น การกลั่น และการแยก

กระบวนการเพอร์แวกพอเรชันเป็นกระบวนการแยกสารละลายผ่านเมมเบรน โดยสารที่แพร่ผ่านเมมเบรนจะอยู่ในสภาพของไอ ซึ่งเกิดขึ้นได้เพราะความดันขาออกมีค่าต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวของสารที่แพร่ผ่านเมมเบรน การแยกเกิดขึ้นได้เนื่องจากองค์ประกอบต่างชนิดกันในสารละลายมีความสามารถในการละลายและการแพร่ผ่านเมมเบรนไม่เท่ากันหรือกล่าวได้ว่ามีผลต่างของศักย์ภาพเคมีเป็นแรงขับเคลื่อนเนื่องจากกระบวนการนี้มีความได้เปรียบทั้งในแง่เศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมกล่าวคือประหยัดพลังงาน สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักและ ไม่ต้องใช้สารเคมี จึงไม่มีปัญหาการปนเปื้อนและไม่มีปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม[3]

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมซีโอไลต์ชนิดเอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนเพื่อแยกเอทานอล-น้ำ พร้อมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการเตรียม ซึ่งได้แก่ เวลาที่ใช้ในการตกผลึกและอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา และศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ โดยกระบวนการเพอร์แวกพอเรชัน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาใช้เนื้อหาเชิงวิชาการนี้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

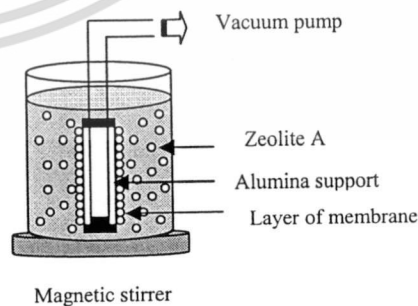
2. การทดลอง

2.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอ

ซีโอไลต์เอเตรียมจากวิธีของ Thompson และ Franklin [4] สารละลายมีประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.723 กรัม (Merck, Germany) โซเดียมอะลูมิเนต 8.258 กรัม (Wako, Japan) โซเดียมเมตาซิลิเกต 15.48 กรัม (Aldrich, US) น้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร สังเคราะห์ในขวดโพลีโพรพิลีน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากนั้นนำซีโอไลต์ชนิดเอเคลือบลงบนตัวรองรับอะลูมินาแบบท่อ (ผลิตโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, MTEC) ที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 11 มิลลิเมตร ยาว 4 เซนติเมตร มีพื้นที่ผิว 2.073×10^{-4} ตารางเมตร ความเป็นรูพรุนของตัวรองรับมีค่าประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมีค่าประมาณ 0.4 ไมโครเมตร

ผสมซีโอไลต์เอ 0.05 กรัม กับน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร ปั่นควนให้เข้ากันแล้วจุ่มตัวรองรับอะลูมินาที่ต่ออยู่กับชุดปั๊มสุญญากาศลงในบีกเกอร์สารละลาย โดยใช้ความดันแตกต่างเท่ากับ 0.5×10^2 kPa เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 1 นำเมมเบรนที่ได้บรรจุลงใน Autoclave อัดความดัน 3 บาร์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำเมมเบรนที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 546 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง



รูปที่ 1 ชุดเคลือบซีโอไลต์ชนิดเอลงบนผิวตัวรองรับ อะลูมินา

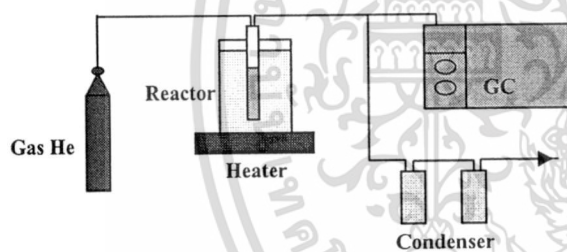
ลักษณะของอนุภาคและพื้นผิวของเมมเบรน

ซีโอไลต์ชนิดเอที่สังเคราะห์ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยกล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) และชนิดและโครงสร้างผลึกของเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของแสงด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

2.2 การแยกเอทานอล-น้ำ

รูปที่ 2 แสดงแผนภูมิของเครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง สารละลายเอทานอล-น้ำจะถูกป้อนเข้าสู่รีแอกเตอร์ และถูกทำให้กลายเป็นไอโดยการให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อน ไอของสารละลายที่แพร่ผ่านเมมเบรน (เพอร์มิเอท) จะถูกพาให้เคลื่อนที่ออกจากรีแอกเตอร์ด้วยแก๊สฮีเลียมไปยังชุดควบแน่นที่อุณหภูมิควบแน่น 0 °C สารละลายเพอร์มิเอทและสารละลายป้อน (รีเทนเทท) จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักและวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำและเอทานอลด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph series 600: Gow Mac) ที่มีตัวตรวจวัดชนิดการนำความร้อน (TCD)



รูปที่ 2 ชุดแยกเอทานอล-น้ำ

คำนวณหาค่าฟลักซ์ ตามสมการที่ 1

$$J = \frac{W}{A \cdot t} \quad (1)$$

และคำนวณหาค่าการแยกตามสมการที่ 2

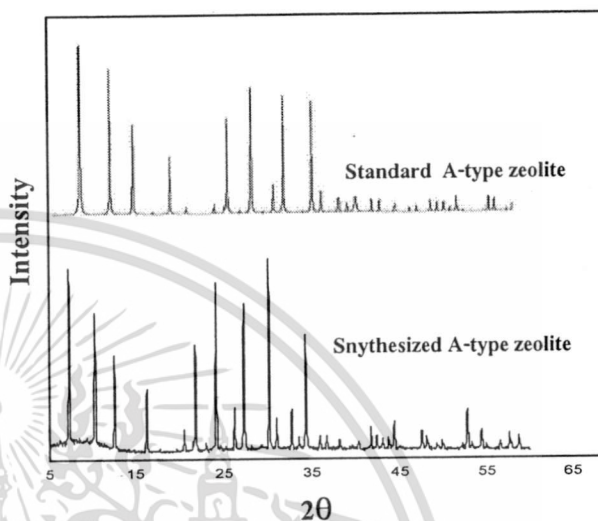
$$\alpha_{water/ethanol} = \frac{[y_{water} / y_{ethanol}]_p}{[x_{water} / x_{ethanol}]_f} \quad (2)$$

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

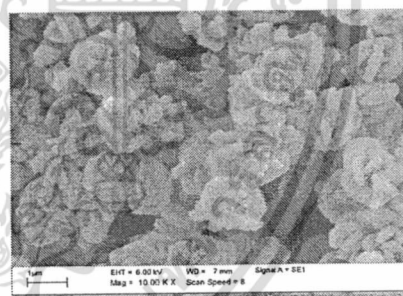
3.1 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดเอ

วิเคราะห์ความเป็นผลึกของซีโอไลต์เอที่เตรียมได้ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า ซีโอไลต์ที่เตรียมเอ็กสแอมป์เป็นเอ็กสแอมป์ที่สังเคราะห์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เกิดพีคที่ตำแหน่ง 2θ เมื่อเทียบกับค่าตำแหน่งมาตรฐานของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ พบว่าพีคที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับค่าตำแหน่งมาตรฐานของความเป็นผลึกซีโอไลต์ชนิดเอ แสดงว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้เป็นซีโอไลต์ชนิดเอ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 XRD ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ ภายใต้สภาวะ อุณหภูมิคงที่ 100 °C เวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 1

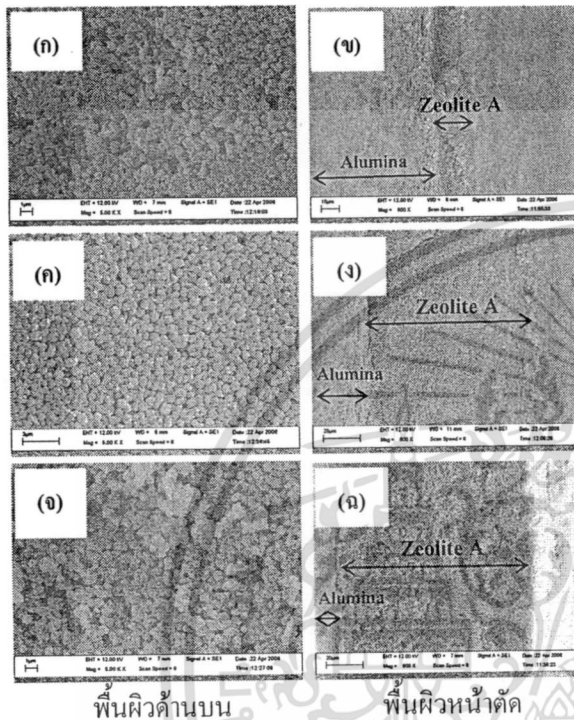


รูปที่ 4 ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอ ที่สังเคราะห์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ 100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 1

วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของซีโอไลต์เอด้วยเครื่อง SEM พบว่าอนุภาคมีลักษณะกลมคล้ายลูกตะกร้อ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 685 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4

รูปที่ 5 วิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของตัวรองรับอะลูมินาที่ถูกเคลือบด้วยซีโอไลต์ชนิดเอด้วย SEM พบว่า ตัวรองรับอะลูมินาที่ถูกเคลือบด้วยซีโอไลต์ชนิดเอ ปริมาณ 96 กรัม/ตารางเมตร ผิวด้านบนของตัวรองรับอะลูมินาถูกเคลือบด้วยซีโอไลต์ชนิดเออย่างหนาแน่นและสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยให้ตัวรองรับอะลูมินามีความแข็งแรงและทนทานต่อการกัดกร่อน

รองรับอะลูมินาถูกเคลือบด้วยอนุภาคของซีโอไลต์เอไม่
สม่ำเสมอ และเกิดเป็นช่องว่างบริเวณผิวที่เคลือบ ดังรูป 5
(ก) รูป 5(ข) แสดงภาพพื้นผิวหน้าตัดบริเวณรอยต่อ
ระหว่างอะลูมินาและซีโอไลต์ชนิดเอพบว่ามีความหนา
เฉลี่ยประมาณ 21.32 ไมโครเมตร แสดงในรูปที่ 5(ก), 5(ข)



รูปที่ 5 ภาพถ่ายจาก SEM ของซีโอไลต์ชนิดเอที่เคลือบบนตัว
รองรับอะลูมินา ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า
(ก),(ข) เคลือบด้วยซีโอไลต์เอปริมาณ 96 กรัม/ตารางเมตร
(ค),(ง) เคลือบด้วยซีโอไลต์เอปริมาณ 241 กรัม/ตารางเมตร
(จ),(ฉ) เคลือบด้วยซีโอไลต์เอปริมาณ 482 กรัม/ตารางเมตร

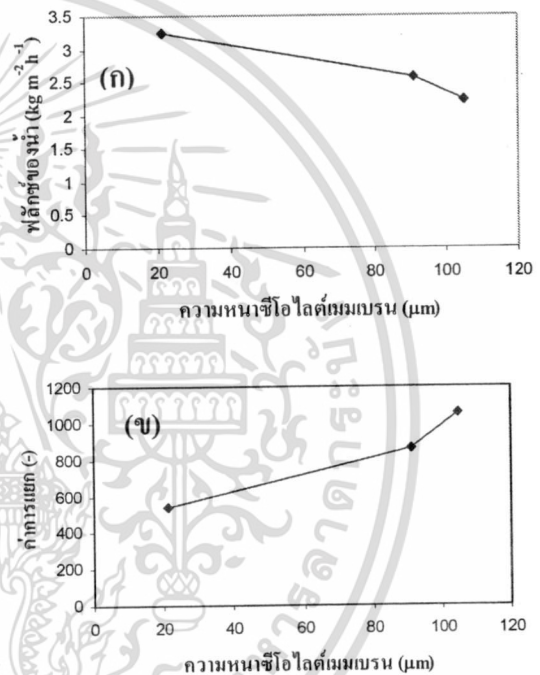
เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์เป็น 241 กรัม/ตาราง
เมตร พบว่าผิวด้านบนของตัวรองรับอะลูมินาถูกเคลือบ
ด้วยอนุภาค ซีโอไลต์อย่างหนาแน่นและอนุภาคมีการ
กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยมีความหนาเฉลี่ยประมาณ
90.98 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 5(ค), 5(ง) แต่เมื่อเพิ่ม
ปริมาณ ซีโอไลต์ให้มากขึ้นเป็น 482 กรัม/ตารางเมตร
พบว่าอนุภาคซีโอไลต์ที่เคลือบบนผิวตัวรองรับอะลูมินา
จับตัวเป็นกลุ่มก้อน และก่อตัวเป็นผลึกขนาดใหญ่ ทำให้
พื้นผิวของตัวรองรับที่ถูกเคลือบไม่สม่ำเสมอ มีความ
หนาเฉลี่ยประมาณ 104.85 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่
5(จ), 5(ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ผลการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำ

3.2.1 ผลของความหนาของเมมเบรนซีโอไลต์ชนิดเอ

จากรูปที่ 6 พบว่า ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของน้ำจะ
มีค่าลดลงเมื่อความหนาของซีโอไลต์เมมเบรน (δ) มีค่า
มากขึ้น ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์จะแปรผกผันกับ δ
เมื่อ δ มากขึ้นจะทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าลดลงตามไปด้วย
ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนมีความหนามากขึ้น ระยะเวลา
ในการแพร่ผ่านของสารก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลทำ
ให้สารแพร่ผ่านออกมาน้อยลง ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำ
ลดลง แสดงดังรูป 6(ก)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำ(ก)และค่าการแยก
ของน้ำ(ข)กับความหนาของเมมเบรน ที่ความเข้มข้นของน้ำใน
สารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

ส่วนค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลจะมีค่า
เพิ่มขึ้นเมื่อ δ มากขึ้น เมื่อ δ มากขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการ
คัดแยกโมเลกุลของน้ำกับเอทานอลก็มากขึ้นตามไปด้วย
ทำให้สามารถคัดแยกโมเลกุลของน้ำออกจากโมเลกุล
ของเอทานอลได้มากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการแยกของน้ำมี
ค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูป 6(ข)

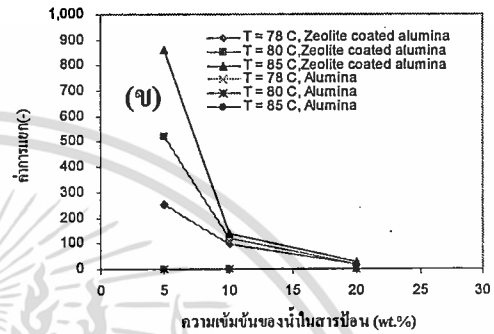
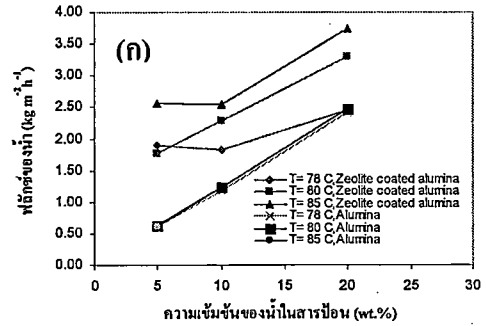
3.2.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายป้อน

จากรูปที่ 7 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของน้ำใน
สารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของ

สารละลายในด้านเพอร์มิเอทและด้านรีเทนเททมีค่าต่างกันมากขึ้น ค่า concentration gradient มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ driving force เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า ฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงดังสมการที่ 3 [5] ส่วนค่าฟลักซ์ของน้ำที่แยกด้วยตัวรองรับอะลูมินา (ยังไม่เคลือบด้วยซีโอไลต์เอ) พบว่ามีค่าน้อยกว่าค่า ฟลักซ์ที่แยกด้วยซีโอไลต์เมมเบรนชนิดเอ แสดงดังรูป 7(ก)

$$J_i = -D_i \frac{dC_i}{d\delta} \quad (3)$$

ส่วนค่าการแยกของน้ำต่อเอทานอลจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำ-เอทานอล สามารถเกิด coupling effect ได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้โมเลกุลของน้ำและเอทานอลเกิดการคู่ควบ (Coupling) ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่มากขึ้น ส่งผลทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้ช้าลง [3] ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้โมเลกุลของน้ำและเอทานอลเกิดการคู่ควบเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีปริมาณน้ำที่แพร่ผ่านออกมาน้อยลง ส่งผลทำให้ค่าการแยกของน้ำมีค่าลดลง และเมื่อทดสอบการแยกเอทานอล-น้ำ ผ่านตัวรองรับอะลูมินาที่ยังไม่เคลือบด้วยซีโอไลต์เอพบว่าค่าการแยกของน้ำมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยมีค่าใกล้เคียงเท่ากับ 1 แสดงว่าสารละลายสามารถแพร่ผ่านผิวตัวรองรับอะลูมินาได้เกือบทั้งหมดทำให้สัดส่วนของน้ำต่อเอทานอลทั้งในเพอร์มิเอทและรีเทนเททมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ไม่เกิดการแยก แสดงดังรูป 7(ข) จากผลการทดลองที่ได้พบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองของ Jalal J. Jafar และคณะ [6] ทำการศึกษาการแยกของผสมแอลกอฮอล์กับน้ำด้วยกระบวนการเพอร์แวกซ์พอร์ชันโดยใช้เมมเบรนซีโอไลต์ชนิด A พบว่าค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $0.1 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ เป็น $0.3 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าการแยกของน้ำมีค่าลดลงจาก 10,000 เป็น 2,000 ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.025 wt.% ถึง 10 wt.% และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



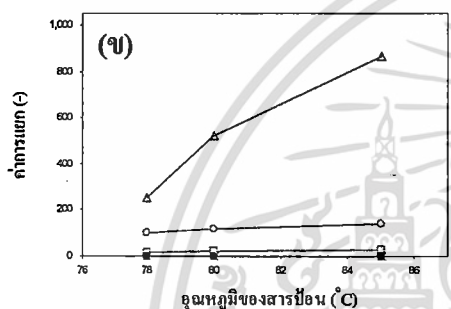
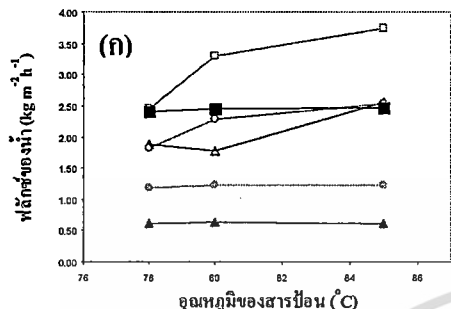
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน ที่อุณหภูมิ 78, 80 และ 85 องศาเซลเซียส ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา $90.98 \mu\text{m}$ และผ่านตัวรองรับอะลูมินา

3.2.3 ผลของอุณหภูมิของสารละลายป้อน

จากรูปที่ 8 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันโอสมิอ์มากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving force) ด้านสารป้อนมากขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านเมมเบรนได้มากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อทดสอบการแยกเอทานอล-น้ำ ผ่านตัวรองรับอะลูมินา พบว่า ค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและเริ่มคงที่ที่ค่าหนึ่ง ส่วนค่าการแยกของน้ำมีค่าคงที่ใกล้เคียงเท่ากับ 1 แสดงว่าไม่เกิดการแยก แสดงดังรูป 8(ก) และ 8(ข) ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่ามีค่าสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Kiminori Sato และคณะ [7] ศึกษาการเตรียมซีโอไลต์ชนิด A ที่มีค่าฟลักซ์สูงและทดสอบการแยกเอทานอล-น้ำ พบว่าค่าฟลักซ์และค่าการแยกของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $0.8 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ เป็น $4.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการแยกของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10^3 เป็น 10^4 ที่ความเข้มข้นของเอทานอล(90 wt.%)และน้ำ(10 wt.%)ในสารละลายป้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็น 75 องศาเซลเซียส



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าการแยกของน้ำกับอุณหภูมิของสารละลายป้อน ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5, 10 และ 20 wt.% ผ่านเมมเบรนที่มีความหนา 90.98 μm และผ่านตัวรองรับอะลูมินา ;

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| Zeolite coated alumina | Alumina |
| ▲ 5 wt.% water in feed | ▲ 5 wt.% water in feed |
| ○ 10 wt.% water in feed | ● 10 wt.% water in feed |
| ■ 20 wt.% water in feed | ■ 20 wt.% water in feed |

4.สรุปผลการทดลอง

ซีโอไลต์ชนิดเอเตรียมจากสภาวะการตกผลึกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง ได้อนุภาคนาโนเฉลี่ยประมาณ 685 นาโนเมตร เคลือบซีโอไลต์เอลงบนตัวรองรับอะลูมินาโดยใช้ซีโอไลต์เอปริมาณ 0.05 กรัม ได้เมมเบรนที่มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 90.98 μm เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของเมมเบรนด้วยการแยกเอทานอล-น้ำ พบว่าเมมเบรนมีค่าการแยกสูงที่สุดเท่ากับ 863 และมีค่าฟลักซ์ของน้ำเท่ากับ $2.56 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายป้อน 5 wt.% ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2551 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. คำอธิบายสัญลักษณ์

- J คือ ค่าฟลักซ์ ($\text{kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)
- W คือ น้ำหนักของเพอริเอท (kg)
- A คือ พื้นที่ผิวหน้าของเมมเบรน (m^2)
- t คือ เวลาที่ใช้ทำการทดลอง (h)

$\alpha_{\text{water/ethanol}}$ คือ ค่าการแยก(Separation factor) ของของผสมเอทานอล-น้ำ

- y_i คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของสาร i ในเพอริเอท
- x_i คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของสาร i ในสารละลายป้อน
- D_i คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร i
- C_i คือ ความเข้มข้นของสาร i
- δ คือ ความหนาของเมมเบรน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y.Yan, M.E.Davis, G.R.Gavalas, Preparation of zeolite ZSM-5 membranes by in-situ crystallization on porous α - Al_2O_3 . Ind. Eng. Chem. Res. 34 (1995) 165.
- [2] R.Lai, G.R.Gavalas, Electrophoretic technique for hydrothermal synthesis of NaA zeolite membranes on porous α - Al_2O_3 supports, Ind.Eng. Chem.Res. 37 (1998) 4275.
- [3] ชันทอง สุนทรภา, เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน, พิมพ์ที่โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [4] R.W.Thompson, M.J.Huber, Surface seeding in ZSM-5 membrane preparation, J.Cryst.Gr. 56 (1982) 71.
- [5] Richard G.Griskey, Transport Phenomena and Unit Operations, John Wiley & Sons, Inc., 2002
- [6] Jalal J. Jafar, Peter M. Budd, Separation of alcohol/water mixtures by pervaporation through zeolite A membranes, Micro. Mater. 12 (1997) 305.
- [7] K. Sato, T. Nakane, A high reproducible fabrication method for industrial production of high flux NaA zeolite membrane, J. Membr.Sci.301(2007)151.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้