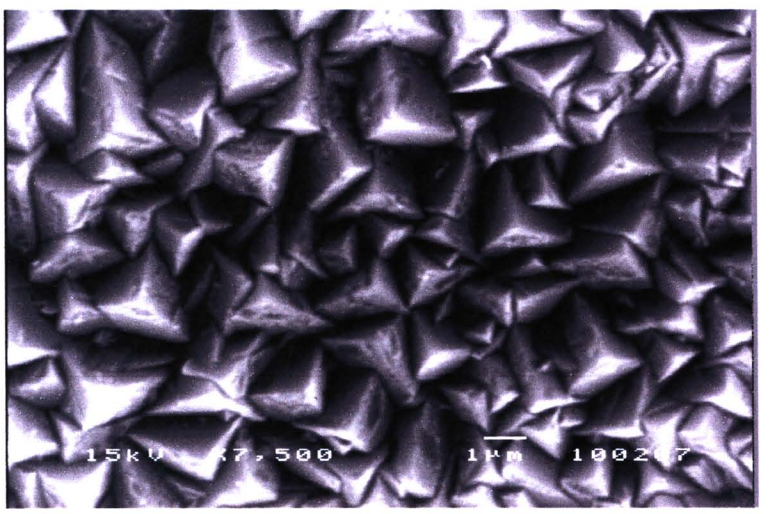
2. เตรียมสารละลายผสม ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์, อะลูมินา และซิลิกา ในอัตราส่วน 3:1:1 โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย
3. วางตัวรองรับอะลูมินาลงในเครื่องปฏิกรณ์ และเทสารละลายผสมลงในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้น นำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส หรือเครื่องปฏิกรณ์ความร้อน (Vacuum oven) เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอบนตัวรองรับอะลูมินา

## ผลการทดลอง อภิปรายและวิจารณ์ผลการวิจัย

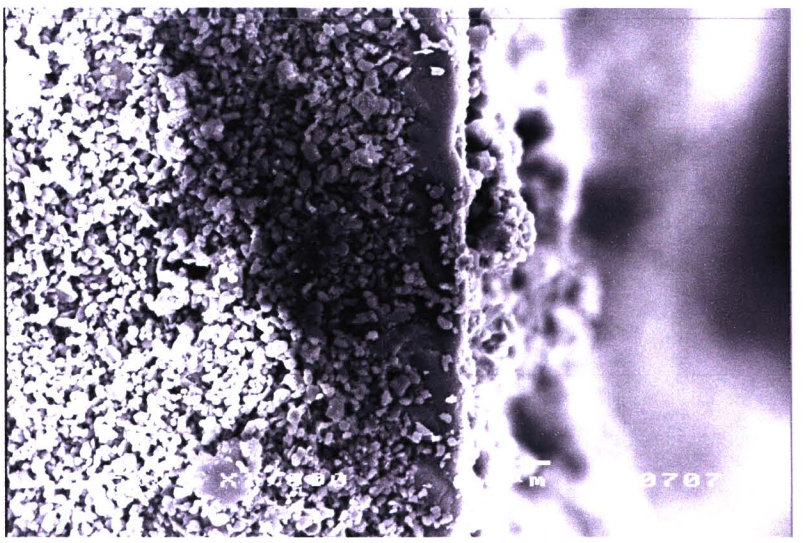
### *การสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ด้วยกระบวนการไมโครเวฟ (Microwave technique)*

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ

จากการนำแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการไมโครเวฟ มาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ปรากฏผล ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นภาพด้านหน้าของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ จะพบว่า โครงสร้างที่พบในรูปนี้คือ โครงสร้างของสารซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ และจากโครงสร้างที่ปรากฏในรูปนี้ ยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะของซีโอไลท์ที่เกิดขึ้นแบบต่อเนื่อง (well inter-growth) ซึ่งกันและกันอีกด้วย นอกจากนี้ ได้แสดงภาคตัดขวางของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ บนตัวรองรับอะลูมินา (รูปที่ 4) จะพบว่าซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ สามารถเกาะบนตัวรองรับอะลูมินาได้เป็นอย่างดี




**รูปที่ 3** ภาพ SEM ของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ บนตัวรองรับอะลูมินา (ด้านหน้า)

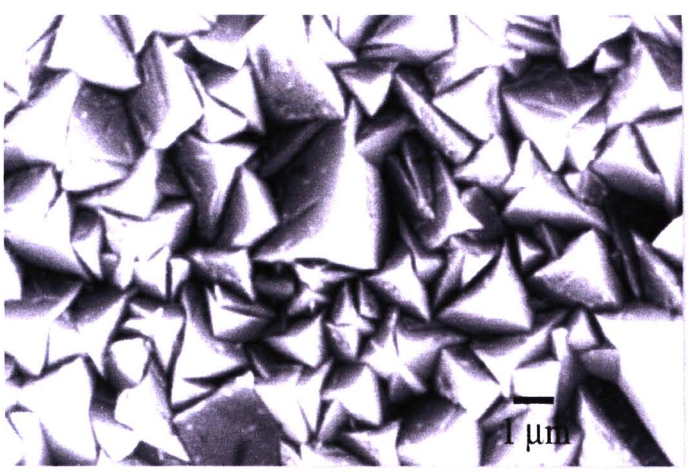


**รูปที่ 4** ภาพ SEM ของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ บนตัวรองรับอะลูมินา (ด้านตัดขวาง)

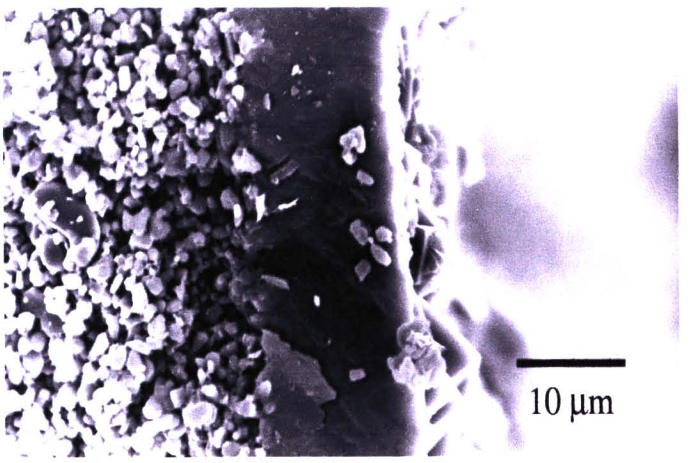
ดังนั้น จากรูปที่ 3 และ 4 สามารถสรุปได้ว่า กลุ่มวิจัยประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ บนตัวรองรับอะลูมินา โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ไมโครเวฟ

***การสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ด้วยกระบวนการการให้ความร้อน (Autoclave technique)***

โครงสร้างทางเคมีของแผ่นเยื่อบางที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการความร้อน โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (รูปที่ 5 และ 6) ปรากฏผลดังนี้




**รูปที่ 5** ภาพ SEM ของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ จากกระบวนการความร้อน (ด้านหน้า)




**รูปที่ 6** ภาพ SEM ของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ จากกระบวนการความร้อน (ด้านตัดขวาง)

ผลจากรูปที่ 5 และ 6 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของสารซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ และการก่อตัวของซีโอไลท์ที่ต่อเนื่องกันบนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งสามารถเกาะติดบนตัวรองรับอะลูมินาได้เป็นอย่างดี ดังนั้น โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ความร้อน การสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ บนตัวรองรับอะลูมินา สามารถกระทำได้เช่นกัน

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น เกี่ยวกับการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ บนตัวรองรับชนิดอะลูมินานั้น จะพบว่า ด้วยการใช้กระบวนการสังเคราะห์ รวมไปจนถึง อัตราส่วนต่างๆและสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ดังที่กลุ่มวิจัยได้นำเสนอมานั้น สามารถใช้ในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอได้จริง ซึ่งประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอนี้นั้น จะสามารถอธิบายในรูปของประสิทธิภาพต่อการใช้แยกน้ำออกจากเอทานอล เพื่อผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.5% โดยประมาตรต่อไป

***ประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางที่สามารถสังเคราะห์ได้***

ประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ที่กลุ่มวิจัยสามารถสังเคราะห์ได้นั้น จะถูกทดสอบด้วยกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง (pervaporation system) สำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอลในขนาดระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ต่อการใช้เป็นแผ่นเยื่อบางในกระบวนการแยกต่อไป

ในการจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางนั้น ตัวแปรที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางได้แก่ Total water flux ($kg/m^2/h$) และ separation factor (ไม่มีหน่วย) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Total water flux } (J, kg/m^2/h) = W / (A*t)$$

โดยที่ W = น้ำหนักของน้ำทั้งหมดที่สามารถผ่านแผ่นเยื่อบางได้ (กิโลกรัม)

A = พื้นที่ผิวทั้งหมดของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ

t = เวลาที่ใช้ในการแยก (ชั่วโมง)

$$\text{Separation factor } (\alpha) = [X_{H2O}/X_{EtOH}]_{perm} / [X_{H2O}/X_{EtOH}]_{reten}$$

โดยที่ $X_{H2O}$ = ปริมาณของน้ำ (เปอร์เซ็นต์, %)

$X_{EtOH}$ = ปริมาณของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์, %)

perm = ส่วนที่สามารถซึมผ่านแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ไปได้ (permeate)

reten = ส่วนที่ไม่สามารถซึมผ่านแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ไปได้ (retentate)

โดยที่ ตัวแปรทั้งสองนี้ จะแสดงถึงประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางในการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยกระบวนการการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง อีกทั้ง ยังเป็นค่าที่ยอมรับในเชิงวิชาการ สำหรับตัวแปรทั้งสองนี้ ค่า total water flux ควรมีค่าประมาณ 1 kg/$m^2$/h และ ค่าการแยก (separation factor) ควรมีค่ามากกว่า 10,000

ทั้งนี้ ก่อนที่จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบาง ด้วยกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางได้นั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรบางประเภทก่อน เช่น อุณหภูมิที่ใช้ และอัตราการไหลของสารผสมที่ใช้ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางของคณะกลุ่มผู้วิจัยนี้ ได้แก่ อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งจะให้ค่า total water flux ที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆ นอกจากนี้ อุณหภูมิที่ใช้ ยังไม่ควรเกิน 78 องศาเซลเซียส อีกด้วย เนื่องจากจะทำให้ของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำจะเกิดการระเหยไปบางส่วน เนื่องจากจุดเดือดของเอทานอลอยู่ที่ประมาณ 77 องศาเซลเซียส นั่นเอง

ในส่วนของอัตราการไหลของของผสมนั้น (flow rate, ml/min) อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางของคณะกลุ่มผู้วิจัยนั้น ได้แก่ อัตราการไหลที่ประมาณ 900 ml/min ถ้าอัตราการไหลต่ำกว่า 900 ml/min จะให้ค่า total water flux ที่น้อยกว่า 1 kg/$m^2$/h และ ถ้าอัตราการไหลมากกว่า 900 ml/min จะทำให้ได้ค่าการแยก (separation factor) น้อยกว่า 10,000

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิและอัตราการไหลที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางของคณะกลุ่มวิจัยด้วยแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ในขนาดระดับห้องปฏิบัติการ ได้แก่ 70 องศาเซลเซียส และ 900 ml/min ตามลำดับ จากผลการทดสอบการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางในขนาดระดับห้องปฏิบัติการพบว่า แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอที่กลุ่มวิจัยสามารถสังเคราะห์ได้นั้น แสดงประสิทธิภาพที่ดีต่อการแยกน้ำออกจากเอทานอลในกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง ดังสรุปได้ในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ที่สังเคราะห์ได้ ในการแยกน้ำออกจากเอทานอลในกระบวนแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง

| | Total water flux (kg/$m^2$/hr) | Separation factor |
|---|---|---|
| MWMs | ~ 1.38 | > 10,000 |
| ACMs | ~ 0.80 | > 10,000 |

*หมายเหตุ : MWMs หมายถึง แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการไมโครเวฟ*

*ACMs หมายถึง แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการความร้อน*

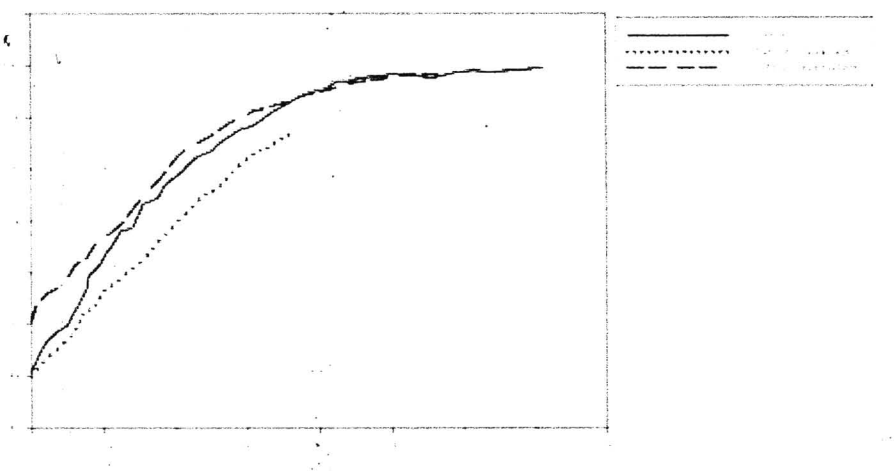
*Total water flux ใช้แสดงถึง ปริมาณของน้ำที่สามารถผ่านแผ่นเยื่อบางได้ ต่อเวลาและขนาดของแผ่นเยื่อบาง*

*Separation factor ใช้แสดงถึง ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่สามารถผลิตได้จากกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง ตลอดจน ความบริสุทธิ์ของน้ำที่ผ่านแผ่นเยื่อบาง*

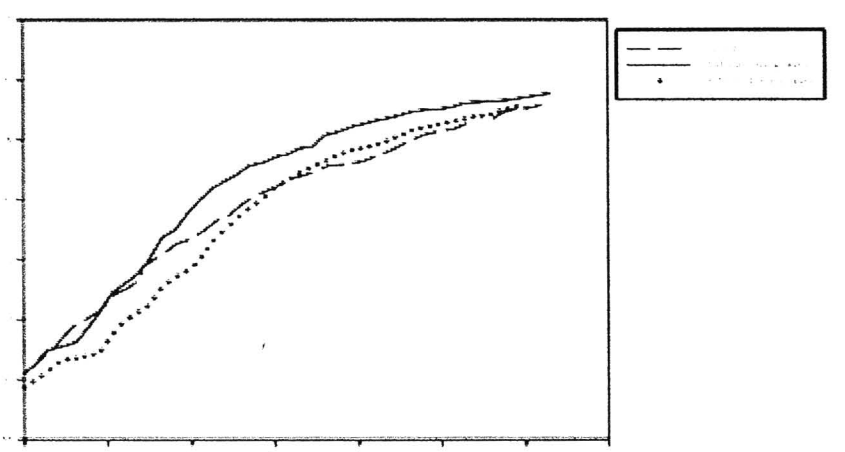
จะเห็นว่า สามารถนำแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการไมโครเวฟและกระบวนการความร้อน มาใช้ในกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง เพื่อแยกน้ำออกจากเอทานอลได้ ถึงแม้แผ่นเยื่อบางที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการความร้อน ให้ค่า Total water flux ของระบบ ต่ำกว่า 1 kg/m$^2$/h แต่ทั้งสองให้ค่าการแยก (separation factor) ที่มากกว่า 10,000

***การผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.5% โดยปริมาตร***

ในการจะผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.5% โดยปริมาตรนั้น กลุ่มวิจัย ได้ทำการทดลองโดยใช้แผ่นเยื่อบางที่สังเคราะห์ได้กับกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาถึง ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่สามารถทำได้ด้วยกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางโดยการใช้แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอนี้ โดยความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่สามรถผลิตได้ แสดงในรูปที่ 7 และ 8



**รูปที่ 7** ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอที่สังเคราะห์จากกระบวนการไมโครเวฟ ต่อเวลา



**รูปที่ 8** ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่สามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอที่สังเคราะห์จากกระบวนการความร้อน ต่อเวลา

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ผลจากรูปที่ 7 และ 8 จะพบว่า เมื่อนำแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ มาใช้ในกระบวนการแยกเพื่อแยกน้ำออกจากเอทานอล ความเข้มข้นของเอทานอล (% โดยปริมาตร) จะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการแยกเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ความเข้มข้นสูงสุดของเอทานอล ที่สามารถผลิตได้โดยการใช้แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ในกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง จะมีค่าใกล้เคียง หรือมากกว่า 99.5 %โดยปริมาตร

ดังนั้น เราสามารถสรุปได้จากจากผลการทดลองการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางในกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางขนาดระดับห้องปฏิบัติการว่า แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอที่กลุ่มวิจัยสามารถสังเคราะห์ขึ้นมาได้นั้น ทั้งแบบกระบวนการไมโครเวฟและกระบวนการความร้อน สามารถนำมาใช้เป็นแผ่นเยื่อบางในระบบการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางได้เป็นอย่างดี โดยให้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99.5% โดยปริมาตรอีกด้วย

***ประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ : เสถียรภาพในการใช้งานแผ่นเยื่อบาง ในระบบการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง***

จากผลการทดลองระบบการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางในขนาดระดับห้องปฏิบัติการ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 และ 8 จะพบว่า ประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ หลังจากผ่านการใช้งานในระบบการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางเป็นระยะเวลาประมาณ 3 เดือน ยังคงแสดงประสิทธิภาพที่คงเดิม ทั้งในด้านของค่าการแยก (separation factor) และ total water flux นั่นแสดงให้เห็นว่า แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ที่ทางกลุ่มวิจัยสามารถสังเคราะห์ได้นั้น มีประสิทธิภาพที่ดี ทั้งในแง่ของประสิทธิภาพและความเสถียรภาพของแผ่นเยื่อบางในระบบการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง นอกจากนี้ แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ที่ทางกลุ่มวิจัยสังเคราะห์ได้นั้น หากไม่ทำการถอดออกจากเครื่องปฏิกรณ์ แผ่นเยื่อบางนั้นจะสามารถใช้งานได้ยาวนาน แต่อาจต้องมีการทำความสะอาดแผ่นเยื่อบางที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยทำการผ่านน้ำบริสุทธิ์เข้าเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อล้างทำความสะอาดด้านนอกของแผ่นเยื่อบางเป็นครั้งคราว ซึ่งหากไม่ทำการถอดแผ่นเยื่อบางออกจากเครื่องปฏิกรณ์ จะพบว่า แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ขนาดระดับห้องปฏิบัติการที่กลุ่มวิจัยสังเคราะห์ได้นั้น สามารถใช้งานได้อย่างยาวนาน (จากการทดลองใช้งานได้เป็นระยะเวลาเกือบ 1 ปี ซึ่งหลังจากนั้นก ลุ่มผู้วิจัย ต้องทำการถอดแผ่นเยื่อบางออก เพื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องมืออื่นๆต่อไป)

***การศึกษา ออกแบบ และจัดสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ขนาดใหญ่ตลอดจน อุปกรณ์ในการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางขนาดใหญ่***

คณะผู้ทำงานวิจัย ได้ดำเนินการจัดทำอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอขนาดใหญ่ และชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางขนาดใหญ่ โดยแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอนี้ จะมีขนาดความยาวที่ 30 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 เซนติเมตร ทั้งนี้ อุปกรณ์ต่างๆที่จัดทำขึ้น แสดงดังรูปที่ 9

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 21 ส.ค. 2551
เลขทะเบียน 242999
เลขเรียกหนังสือ

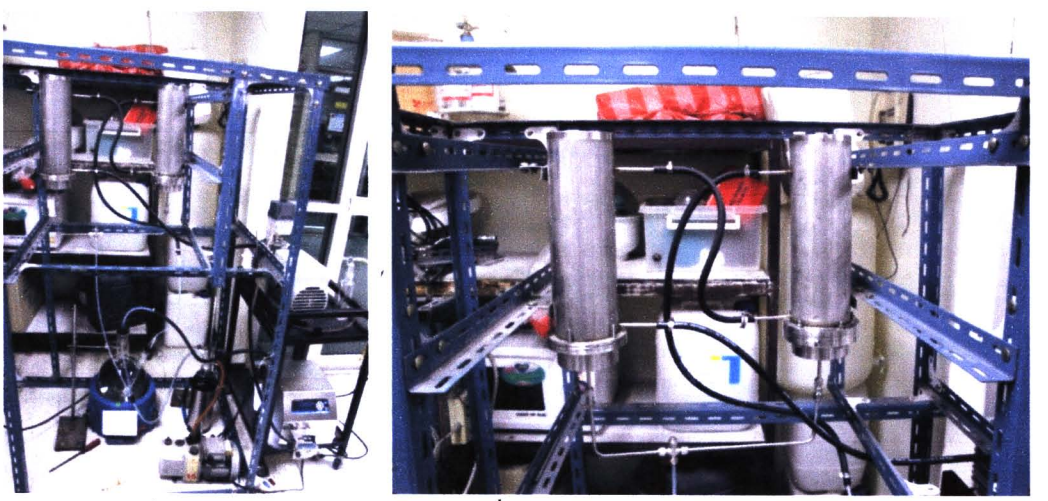
ก

ข

**รูปที่ 9** ก. อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอขนาดใหญ่ และ ข. ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางขนาดใหญ่

สำหรับแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ในระดับขนาดใหญ่นั้น ความยาวของแผ่นเยื่อบางที่สามารถสังเคราะห์ได้นั้น จะอยู่ที่ 30 เซนติเมตร ซึ่งอุปกรณ์ที่จัดสร้างขึ้นมานั้น จะสามารถสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ขนาดใหญ่ ได้พร้อมกันครั้งละ 2 แท่ง ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางนั้น จะใช้แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ขนาดใหญ่จำนวน 5 แท่ง ต่อ 1 ชิ้นของอุปกรณ์การแยก

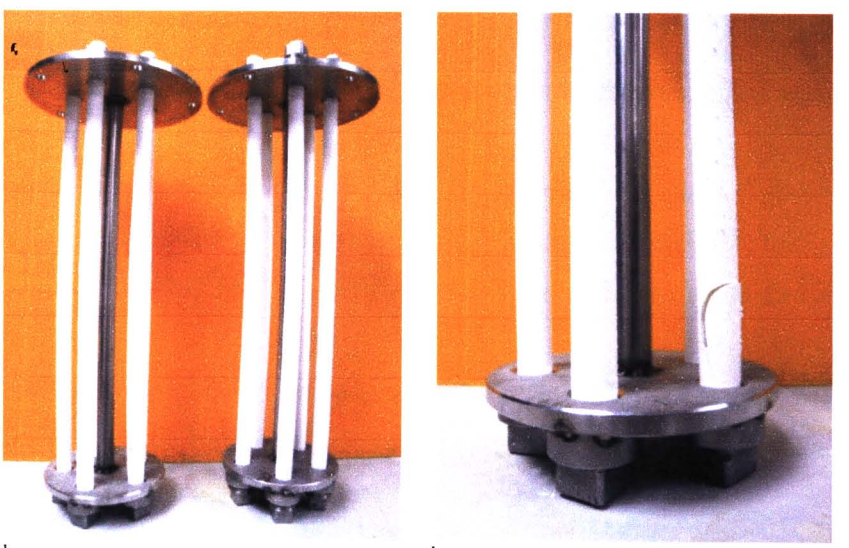
สำหรับในส่วนของการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ในขนาดใหญ่ระดับ 30 เซนติเมตรนั้น คณะผู้จัดทำ ได้ทดลองโดยการใช้สภาวะเดียวกันกับการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ โดยกระบวนการการให้ความร้อนด้วยเตาอบ (Autocalve technique) ด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 9ก และในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอขนาดใหญ่ (รูปที่ 9ข) นั้น จะทำการทดสอบประสิทธิภาพ ด้วยกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง (pervaporation system) สำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอล โดยใช้อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 10



**รูปที่ 10** ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางขนาดใหญ่ (large scale pervaporation system)

***ประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอขนาดใหญ่ สำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอล***

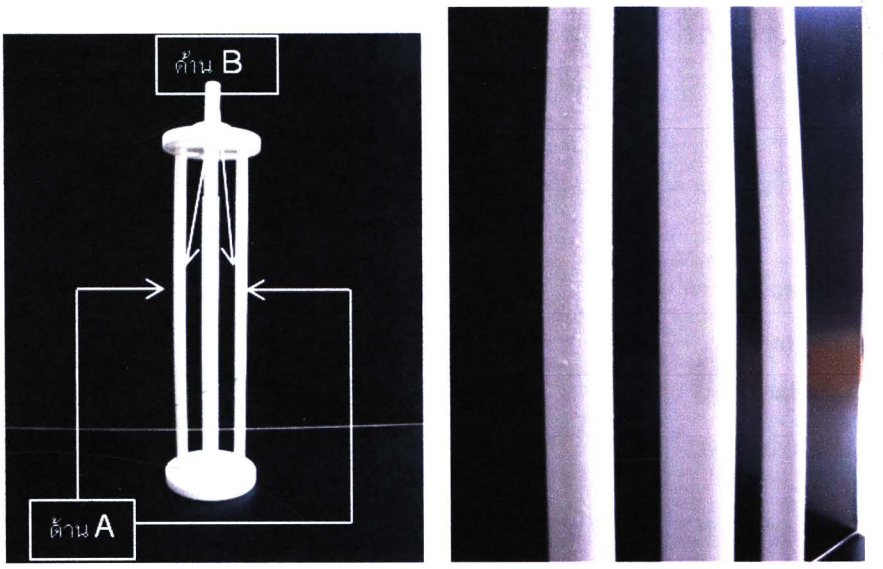
จากการทดสอบการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยอุปกรณ์การแยกขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 10 นั้น พบว่า การทดสอบการแยกด้วยอุปกรณ์ขนาดใหญ่ไม่ประสพผลสำเร็จ เพราะแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอขนาดใหญ่ ที่บรรจุอยู่ภายในชุดอุปกรณ์การแยกขนาดใหญ่นั้น เกิดความเสียหายในขั้นตอนการบรรจุแผ่นเยื่อบาง อันเนื่องมาจาก ตัวรองรับที่ทำมาจากสารอะลูมินา ที่ได้รับมาจากศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) นั้น มีความหนาที่ลดลงจาก 3 มิลลิเมตร เหลือเพียง 1 มิลลิเมตร ทำให้ความแข็งแรงของตัวรองรับที่ได้น้อยลง (เมื่อเทียบกับ ตัวรองรับที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ในขนาดระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งตัวรองรับที่ใช้นั้น มีความหนา 2-3 มิลลิเมตร) ส่งผลให้แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอบนตัวรองรับในชุดอุปกรณ์ แผ่นเยื่อบางมีรอยแตกหักในขั้นตอนการบรรจุดังรูปที่ 11 จึงทำให้ไม่สามารถทดสอบประสิทธิภาพขั้นต่อไป



**รูปที่ 11** แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอขนาดใหญ่ ที่สังเคราะห์บนตัวรองรับอะลูมินา (Alumina support)

หลังจากที่กลุ่มผู้ทำการวิจัยได้ทำการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางขึ้นมาใหม่นั้น และได้นำมาทำการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ขนาดใหญ่ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยระบบการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางที่สร้างขึ้นมานั้น พบว่า ประสิทธิภาพของแผ่นเยื่อบางที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่นั้น อยู่ในระดับ ปานกลาง-พอใช้ โดยที่มีค่าการแยกอยู่ที่ประมาณ 6,000 (ความบริสุทธิ์ของน้ำที่แยกออกมาได้ อยู่ที่ประมาณ 98% โดยปริมาตร ในขณะที่อีก 2% ที่ปนออกมาด้วย คือเอทานอล)

ซึ่งจากผลการทดสอบประสิทธิภาพในครั้งนี้ ค่าการแยกที่พบอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ขนาดใหญ่นั้น คณะผู้จัดทำได้ทำการสังเคราะห์ครั้งละ 2 แท่ง ซึ่งจากการศึกษาและสังเกตพบว่า การเกิดผลึกโซเดียม-เอซีโอไลท์ บนตัวรองรับอะลูมินาแบบแท่งนั้น จะเกิดได้ดีมากในบริเวณผิวของตัวรองรับด้านที่ไม่ติดแท่งยึด ขณะที่ผลึกซีโอไลท์จะเกิดได้น้อยกว่า ณ บริเวณผิวของตัวรองรับด้านที่ติดกับแท่งยึด ดังรูปที่ 12




**รูปที่ 12** แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอขนาดใหญ่ ที่สังเคราะห์บนตัวรองรับอะลูมินา (Alumina support)

จากรูปที่ 12 จะเห็นว่า ด้าน A ของตัวรองรับอะลูมินา จะพบผลึกโซเดียม-เอซีโอไลท์เกาะอยู่มากกว่าด้าน B ของตัวรองรับ เนื่องมาจากแท่งยึดบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์นั้น บดบังการเกิดผลึกซีโอไลท์ที่ควรจะเกิดบนตัวรองรับอะลูมินา ทำให้ผลึกซีโอไลท์เกิดบนตัวรองรับได้น้อยลง ซึ่งจากการสังเกตพบว่า มีผลึกซีโอไลท์บนแท่งยึดจำนวณมาก

ดังนั้น จากผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุปสรรคการเกิดผลึกซีโอไลท์ของแท่งยึด ทำให้แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ แสดงผลในการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางอยู่ในระดับปานกลางคือ มีค่าการแยกอยู่ที่ประมาณ 6,000 นั่นเอง

***ประสิทธิภาพของกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง (pervaporation system) ในการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% โดยปริมาตร เทียบกับ กระบวนการอื่นๆ ในด้านเศรษฐกิจ (techno-economic study)***

สำหรับแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ขนาดใหญ่ (แผ่นเยื่อบางชนิดแท่ง เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 เซนติเมตร ความยาว 34 เซนติเมตร) ที่กลุ่มผู้วิจัยทำการสังเคราะห์ขึ้นมาได้นั้น จะมีต้นทุนในการผลิตต่อแผ่นเยื่อบาง 1 แท่งอยู่ที่ประมาณอยู่ที่ประมาณ 1,000 บาท โดยแบ่งเป็น ค่าตัวรองรับอะลูมินา 500 บาท และค่าสารเคมีประมาณ 500 บาท ซึ่งในประเทศไทยนั้น แผ่นเยื่อบางสำหรับกระบวนการผลิตเอทานอลนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ดังนั้น คณะกลุ่มผู้วิจัย จึงมีความคิดเห็นว่า หากสามารถทำการผลิตแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอที่มีประสิทธิภาพสูงสำเร็จ และทำการผลิตเชิงพาณิชย์ได้ เทคโนโลยีการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง รวมไปจนถึงเทคโนโลยีการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบาง น่าจะเป็นที่แพร่หลายมากขึ้นภายในประเทศและเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นมาใช้เองภายในประเทศอีกด้วย

นอกจากนี้ คณะผู้ทำการวิจัยได้ศึกษา เปรียบเทียบการใช้กระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง สำหรับผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% โดยปริมาตร โดยทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตเอทานอลด้วยการใช้การกลั่นอะซีโอโทรป ดังตารางที่ 3 พบว่า กระบวนการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ในงานวิจัยนี้นั้น มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง

99.5% โดยปริมาตร โดยที่กระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบางนั้น ใช้พลังงานน้อยกว่า กระบวนการกลั่นอะซีโอโทรป ประมาณ 50% และยังสามารถผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% ได้

**ตารางที่ 3** ตารางแสดงถึงพลังงานที่ใช้ และค่าใช้จ่ายที่ใช้ ในการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการต่างๆ

| กระบวนการ | พลังงานที่ต้องการในแต่ละหน่วย *(MJ)* | | | พลังงานทั้งหมดที่ใช้ *(MJ/kg EtOH)* | ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่สามารถผลิตได้ *(% โดยปริมาตร)* | ค่าใช้จ่าย *(บาท/กก. EtOH)* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | หอกลั่นธรรมดา | หอกลั่นแบบอะซีโอโทรป | กระบวนการแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง | | | |
| การกลั่นลำดับส่วน | 16.14 | - | - | 16.14 | 94 | 7.14 |
| การกลั่นอะซีโอโทรป | 16.14 | 20.16 | - | 36.40 | 99 | 15.62 |
| การแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง | 16.14 | - | 1.14 | 17.28 | 99.49 | 7.50 |

จากผลการทดลองทั้งหมดนี้ พบว่า สารซีโอไลท์โซเดียม-เอ และแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยกรรมวิธีในกลุ่มของผู้วิจัย และสามารถนำแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ มาใช้ในกระบวนการแยกน้ำออกจากเอทานอล ด้วยระบบเพอร์แวปอเรชัน (Pervaporation) โดยให้ประสิทธิภาพในการแยกที่ดีมาก และให้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.5% โดยปริมาตร

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### *สรุปผลการทดลอง*

1. สารซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ (NaA zeolite) ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ (NaA zeolite membrane) สามารถสังเคราะห์และผลิตได้ ด้วยกระบวนการการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟ ซึ่ง สารซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้นั้นมีขนาดและอนุภาคที่สม่ำเสมอกัน เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็น สารตั้งต้นในการสังเคราะห์แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอต่อไปเป็นอย่างดี
2. แผ่นเยื่อบางชนิดโซเดียม-เอ ในขนาดระดับห้องปฏิบัติการ สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ โดยการใช้แท่งอะลูมินาเป็นตัวรองรับ และผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave technique) และการให้ความร้อนด้วยเตาอบ (Autoclave technique) ซึ่งแผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ที่สังเคราะห์ได้นั้น มีสมบัติทางกายภาพที่สมบูรณ์ ไม่มีจุดบกพร่องบนแผ่นเยื่อบาง
3. แผ่นเยื่อบางซีโอไลท์ชนิดโซเดียม-เอ ในขนาดระดับห้องปฏิบัติการที่สังเคราะห์ได้จากทั้งกระบวนการไมโครเวฟ และกระบวนการความร้อน แสดงประสิทธิภาพที่ดี สำหรับการใช้เป็นแผ่นเยื่อบางใน