

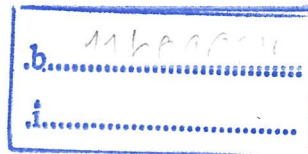
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงเชื้อเลือกผ่านโคโตซานสำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอล



นาย พงษ์ศักดิ์	ศิริศรชัย
นาย สุธี	เตตติวงศ์
นาย สุรภาส	สิทธิสา

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 62076  
วัน,เดือน,ปี 27 ก.ค. 2549



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547


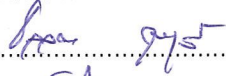
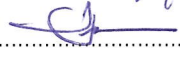
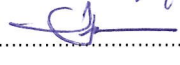
Modification of Chitosan Membrane for Water/Ethanol Separation


Mr. Pongsak	Sirisornchai
Mr. Sutee	Tetiwong
Mr. Surapas	Sitthisa

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement  
the Degree of Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
2004

โครงการพิเศษเรื่อง	การปรับปรุงเชื้อเลือกผ่านโคโตซานสำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอล	
นักศึกษา	นายพงษ์ศักดิ์ ศิริศรชัย	นายสุธี เตตวิงศ์
	นายสุรภาส สิทธิสา	
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2547	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.ดร.ปยุตมา ศรีพันธ์โนน	..... 
กรรมการ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	..... 
กรรมการ ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์	..... 
กรรมการ ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย	..... 

.....  
  
(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)  
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการพิเศษเรื่อง	การปรับปรุงเยื่อเลือกผ่านไคโตซานสำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอล
นักศึกษา	นายพงษ์ศักดิ์ ศิริศรชัย นายสุธี เตติวงศ์ นายสุรภาส สิทธิสา
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2547
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานด้วยการผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ แล้วนำมาเตรียมเป็นเยื่อเลือกผ่านด้วยเทคนิคหล่อแบบสารละลาย (Solution casting) จากนั้นนำเยื่อเลือกผ่านมาพิสูจน์เอกลักษณ์ พบว่าซีโอไลต์โซเดียมเอในเยื่อเลือกผ่านไคโตซานมีโครงสร้างผลึกเหมือนเดิมและมีการกระจายตัวที่ดี นำเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้มาทดสอบการแยกด้วยกระบวนการซึมผ่านไอ (Vapor permeation) ด้วยสารละลายเอทานอล พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สพา (Carrier gas) ในช่วง 40–160 มิลลิลิตรต่อนาที่มีผลทำให้ค่าฟลักซ์ (Flux) และค่าความสามารถในการแยก (Separation factor) สูงขึ้น เนื่องจากความดันย่อยของเพอร์มิเอต (Permeate) มีค่าต่ำลง แล้วเลือกอัตราการไหลของแก๊สพา 80 มิลลิลิตรต่อนาที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ จากการเตรียมเยื่อเลือกผ่านแบบผ่านการอบ (Treated) และไม่ผ่านการอบ (Non treated) พบว่าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก เนื่องจากการบวมตัว (Swelling) ของเยื่อเลือกผ่านเมื่อแช่ในสารละลายเอทานอลเหมือนกัน การเพิ่มปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอในช่วง 0–50 phr พบว่าค่าฟลักซ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดช่องว่างหรือรอยต่อระหว่างวัฏภาคของซีโอไลต์โซเดียมเอกับไคโตซาน แต่ให้ค่าความสามารถในการแยกลดลง ส่วนผลการเปรียบเทียบการใช้ซิลิกาไลต์กับซีโอไลต์โซเดียมเอ พบว่าเยื่อเลือกผ่านที่เติมซิลิกาไลต์มีค่าฟลักซ์ที่ต่ำกว่าแต่มีค่าความสามารถในการแยกสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากซิลิกาไลต์กระจายตัวไม่ดีในเยื่อเลือกผ่าน นอกจากนี้ยังพบว่าซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีขนาดเล็กทำให้ค่าฟลักซ์และค่าความสามารถในการแยกที่สูงกว่า เนื่องจากมีรอยต่อระหว่างวัฏภาคขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้น้ำเกิดอันตรกิริยากับไคโตซานและ ซีโอไลต์โซเดียมเอได้มากขึ้น

Project Title	Modification of Chitosan Membrane for Water/Ethanol Separation	
Student	Mr. Pongsak	Sirisornchai
	Mr. Sutee	Teti Wong
	Mr. Surapas	Sitthisa
Department	Chemistry	
Major	Industrial Chemistry	
Year	2004	
Project advisor	Dr. Chonlada	Rtvirulh
Project co-advisor	Asst.Prof.Dr. Tawan	Sooknoi

## ABSTRACT

This research work involved an improvement in property of chitosan membrane modified with zeolite NaA. The membrane was prepared by solution casting. It was found that zeolite NaA in the composite membrane retained its crystallinity with good distribution. Testing on the vapor permeation of ethanol showed that flux and separation factor were increased by increasing carrier gas flow rate from 40 to 160 ml/min. This is because partial pressure ( $P_1$ ) of the permeate was decreased with an increase in carrier gas flow rate. Thermal treatment of membranes had no effect on separation efficiency due to the fact such membranes can be readily swelled in ethanol solution. Separation factor was decreased while flux was increased with increasing amount of zeolite NaA from 0 to 50 phr. This is resulted from an increased in voids between zeolite NaA and chitosan phase. Chitosan membrane modified with silicalite give smaller flux, as compared to that modified with zeolite NaA. However separation factor of the membrane modified with silicalite was higher than that of the membrane modified with zeolite NaA. This is due to a poor distribution of silicalite in the chitosan membrane. In addition, flux and separation factor were increased by using zeolite NaA with smaller particle size. This is due to an increase in smaller interfacial voids and hence the interaction with water.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษาช่วยแก้ไขปัญหา และเอาใจใส่ดูแลการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด และ ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ที่ได้สละเวลาในการอ่านให้คำแนะนำ และแก้ไขโครงงานพิเศษนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่ให้การช่วยเหลือและแนะนำการใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อนุวัตร แจ่มชัด ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้โคโตนาน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เคารพรักอย่างสูง ที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนการทำงานวิจัยนี้มาตลอด และขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกท่านที่เป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

พงษ์ศักดิ์ ศิริศรชัย

สุธี เตติวงศ์

สุรภาส สิทธิสา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....</b>	<b>3</b>
2.1 เทคโนโลยีการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน.....	3
2.1.1 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน.....	4
2.1.2 โครงสร้างของเยื่อเลือกผ่านสังเคราะห์.....	6
2.1.3 ประเภทของเยื่อเลือกผ่านสังเคราะห์.....	7
2.2 กระบวนการซึมผ่านไอ.....	8
2.2.1 กลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อเลือกผ่าน.....	9
2.2.2 ประสิทธิภาพในการแยก.....	11
2.3 ไคตินและไคโตซาน.....	12
2.3.1 โครงสร้างเคมีของไคตินและไคโตซาน.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2 สมบัติของโคตินและโคโตซาน.....	14
2.3.3 ประโยชน์ของโคตินและโคโตซาน.....	15
2.4 ซีโอดี.....	16
2.5 ซีโอดีโซเดียมเอ.....	18
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>22</b>
3.1 สารเคมี.....	22
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	23
3.3 วิธีการทดลอง.....	25
3.3.1 การเตรียมเยื่อเลือกผ่าน.....	25
3.3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซีโอดีโซเดียมเอและเยื่อเลือกผ่านโคโตซาน.....	27
3.3.2.1 ศึกษาโครงสร้างผลึกของซีโอดีด้วยเครื่อง XRD.....	27
3.3.2.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาของเยื่อเลือกผ่าน.....	27
3.3.2.3 วิเคราะห์หาปริมาณซีโอดีในเยื่อเลือกผ่าน.....	27
3.3.3 ทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อเลือกผ่าน.....	28
3.3.4 ปัจจัยที่ทำการศึกษา.....	29
3.3.5 การคำนวณ.....	29
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....</b>	<b>33</b>
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์.....	33
4.1.1 โครงสร้างผลึกซีโอดีโซเดียมเอ.....	33
4.1.2 โครงสร้างผลึกซีโอดีโซเดียมเอในเยื่อเลือกผ่าน.....	34
4.1.3 สัณฐานวิทยาของเยื่อเลือกผ่าน.....	36
4.1.4 ปริมาณซีโอดีในเยื่อเลือกผ่าน.....	39
4.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สพา.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลของสภาวะการเตรียมเยื่อเลือกผ่าน.....	42
4.4 ผลของปริมาณซีโอไลต์ฯเดี่ยว.....	43
4.5 ผลของชนิดซีโอไลต์.....	45
4.6 ผลของขนาดอนุภาคซีโอไลต์.....	47
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>49</b>
เอกสารอ้างอิง.....	51
ภาคผนวก ก โครมาโทแกรม.....	52
ภาคผนวก ข การคำนวณ.....	62
ภาคผนวก ค TGA เทอร์โมแกรม.....	75

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน.....	4
2.2 การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน.....	5
3.1 สมบัติของโคโตซาน.....	22
3.2 สมบัติของซีโอไลต์โซเดียมเอ.....	23
3.3 องค์ประกอบของเยื่อเลือกผ่านโคโตซานและสภาวะการทดสอบ.....	31
3.4 สัญลักษณ์แทนเยื่อเลือกผ่านและแสดงองค์ประกอบของเยื่อเลือกผ่าน.....	32
4.1 ปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่เติมและที่มีอยู่จริงจากเทคนิค TGA .....	39
4.2 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการแยกของเยื่อเลือกผ่านโคโตซาน ที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอกับซิลิกาไลต์.....	45
4.3 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการแยกของเยื่อเลือกผ่านโคโตซาน ที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอเกรดการค้าและจากการสังเคราะห์.....	47

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการแยกของเทคโนโลยีการแยกตัวด้วยเยื่อเลือกผ่าน.....	3
2.2 โครงสร้างภาคตัดขวางของเยื่อเลือกผ่าน.....	6
2.3 แผนภาพแสดงกระบวนการซึมผ่านไอ.....	9
2.4 แผนภาพแสดงกลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อเลือกผ่าน.....	10
2.5 มุมสัมพันธ์กับการเปียกของวัสดุ.....	11
2.6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	13
2.7 โครงสร้างทางเคมีของไคติน.....	13
2.8 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน.....	13
2.9 โครงสร้างไคโตซานที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาไรลดีไฮด์.....	14
2.10 โครงสร้างทุติยภูมิของซีไอไลต์.....	17
2.11 โครงสร้างตติยภูมิของซีไอไลต์.....	17
2.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีไอไลต์โซเดียมเอ.....	19
2.13 โครงสร้างของซีไอไลต์โซเดียมเอ.....	19
2.14 ลักษณะผลึกของซีไอไลต์โซเดียมเอจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	19
3.1 แผนภาพแสดงชุดทดสอบกระบวนการซึมผ่านไอ.....	28
3.2 แผนภาพแสดงการแยกน้ำจากเอทานอลโดยกระบวนการซึมผ่านไอ.....	29
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีไอไลต์โซเดียมเอจากการสังเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐาน..	33
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีไอไลต์โซเดียมเอเกรดการค้าเทียบกับสารมาตรฐาน.....	34
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีไอไลต์เอเปรียบเทียบกับเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่มี การเติมซีไอไลต์โซเดียมเอ.....	35
4.4 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่เติมซีไอไลต์โซเดียมเอ.....	37

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะภาคตัดขวางของเยื่อเลือกผ่านโคโตซานที่เติมซีโอไลต์โซเดียมเอ.....	38
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สพากับค่าฟลักซ์.....	40
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สพากับค่าความสามารถในการแยก.....	41
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับปริมาณซีโอไลต์ของเยื่อเลือกผ่านโคโตซานที่ผ่านการอบและ ไม่ผ่านการอบ.....	42
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการแยกกับปริมาณซีโอไลต์ของเยื่อเลือกผ่านโคโตซาน ที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบ.....	43
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับปริมาณซีโอไลต์.....	44
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการแยกกับปริมาณซีโอไลต์.....	44
4.12 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของเยื่อเลือกผ่านโคโตซานที่เติม ซิลิกาไลต์.....	46
4.13 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของเยื่อเลือกผ่านโคโตซานที่เติม ซีโอไลต์โซเดียมเอ.....	46
4.14 ภาพ SEM แสดงอนุภาคของซีโอไลต์โซเดียมเกรดการค้าและจากการสังเคราะห์.....	47
4.15 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของภาคตัดขวางของเยื่อเลือกผ่านโคโตซานที่เติมซีโอไลต์ โซเดียมเอจากการสังเคราะห์.....	48

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ดังนั้นเมื่อราคาน้ำมันผันผวนย่อมมีผลต่อปริมาณเงินที่ต้องจ่ายเพิ่มขึ้น จึงมีการมองหาแหล่งพลังงานภายในประเทศที่จะนำมาทดแทนน้ำมันที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ แก๊สโซฮอลล์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานแทนน้ำมัน แก๊สโซฮอลล์มีสมบัติเหมือนน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วออกเทน 95 ทุกประการ โดยแก๊สโซฮอลล์คือ น้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วออกเทน 91 ที่มีการผสมเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5 % ในสัดส่วน 10% โดยปริมาตร การผสมเอทานอลบริสุทธิ์ลงในน้ำมันเบนซินเป็นการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับค่าออกเทน (Octane) ของน้ำมันเบนซิน ซึ่งสามารถใช้ทดแทนสารเติมแต่งที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ Methyl-tertiary-butyl-ether (MTBE) ทำให้เป็นการลดการนำเข้า MTBE เอทานอลได้จากการแปรรูปพืชจำพวก อ้อย ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศ โดยนำพืชเหล่านี้มาหมักจนได้เอทานอล 10 % แล้วนำไปผ่านกระบวนการกลั่น แต่เนื่องจากเอทานอลเป็นของผสมคงจุดเดือด (Azeotrope mixtures) ทำให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์แค่ 96 % จึงยังคงมีปริมาณน้ำเหลืออยู่ ไม่สามารถนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วออกเทน 91 เพื่อผลิตเป็นแก๊สโซฮอลล์ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการแยกน้ำจากเอทานอล โดยส่วนใหญ่จะใช้ Molecular sieve หรือการแยกสารด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation technology)

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการแยกน้ำออกจากเอทานอล ด้วยกระบวนการซึมผ่านไอ (Vapor permeation process) โดยใช้ไคโตซานเป็นเยื่อเลือกผ่าน ไคโตซานเป็นวัสดุที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเปลือกกุ้ง กระจดองปู ซึ่งมีอยู่มากในประเทศ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นเยื่อเลือกผ่านสำหรับแยกน้ำออกจากเอทานอล นอกจากนี้จะได้ปรับปรุงสมบัติของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก โดยการผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite A) ซึ่งมีสมบัติในการดูดน้ำที่ดี

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อเตรียมเยื่อเลือกผ่านโคโตซานสำหรับใช้แยกน้ำออกจากเอทานอล
- 2) เพื่อให้ทราบความสามารถในการแยกน้ำจากเอทานอลของเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้ โดยพิจารณาจากค่าฟลักซ์ (Flux) และค่าความสามารถในการแยก (Separation Factor)

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) เตรียมเยื่อเลือกผ่านโคโตซานที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาโรลดีไฮด์และผสมซีโอไลต์ไซเดียมเอ
- 2) ศึกษาอัตราการไหลของแก๊สพาในช่อง 40-160 มิลลิเมตรต่อนาที ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกของเยื่อเลือกผ่าน
- 3) ศึกษาอัตราส่วนของซีโอไลต์ไซเดียมเอในช่วง 0-50 phr ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก
- 4) ศึกษาชนิดและขนาดอนุภาคของซีโอไลต์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

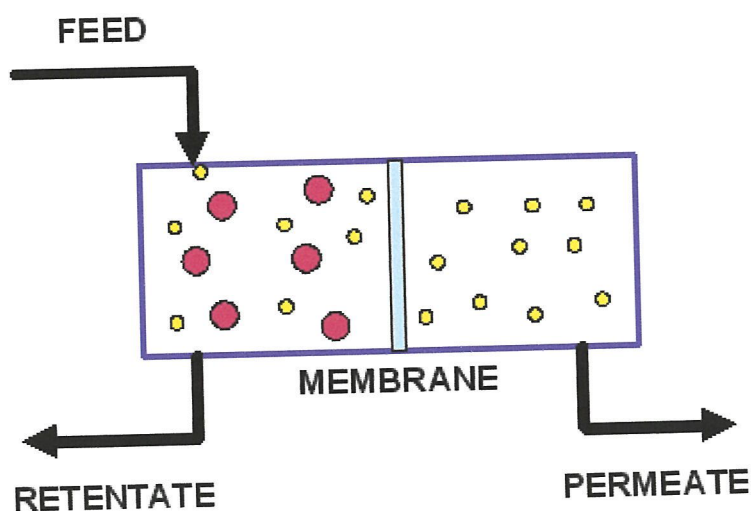
- 1) สามารถปรับปรุงเยื่อเลือกผ่านจากโคโตซานให้มีประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากเอทานอล
- 2) ได้แนวทางการผลิตเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์สูง เพื่อใช้ผสมกับน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วออกเทน 91 เป็นแก๊สโซฮอล์
- 3) เพิ่มคุณค่าและแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ของโคโตซานที่ผลิตจากเปลือกกุ้งกระดองปูที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 การแยกสารด้วยเยื่อเลือกผ่าน [1]

เยื่อเลือกผ่าน เป็นตัวกลางขวางกั้นระหว่างเฟสของไหล 2 เฟส ที่มีสมบัติยอมให้สารบางชนิดผ่านได้ โดยการถ่ายโอนมวลทั้งหมดเกิดขึ้นที่ด้านความหนาของเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งมีขนาดมิติ (Dimension) น้อยกว่าด้านกว้าง-ยาวมากๆ เทคโนโลยีการแยกตัวด้วยเยื่อเลือกผ่านมีหลักการดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีสารป้อน (Feed) เข้าทางด้านหนึ่งของเยื่อเลือกผ่าน ส่วนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านไปได้ เรียกว่า เพอร์มิเอต (Permeate) และส่วนของสารป้อนที่ไม่สามารถผ่านเยื่อเลือกผ่านไปได้ เรียกว่า รีเทนเตต (Retentate) แรงขับ (Driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวล ได้แก่ ความดัน ความเข้มข้น แรงเคลื่อนที่ไฟฟ้า เป็นต้น โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาทำเป็นเยื่อเลือกผ่านอาจเป็นพอลิเมอร์ เซรามิกส์ คาร์บอน ซีโอไลต์ ออกไซด์ต่าง ๆ (เช่น อลูมินา ไททาเนีย หรือเซอร์โคเนีย เป็นต้น) โลหะ (เช่น แพลลาเดียม หรือเงิน เป็นต้น) หรือของเหลว



รูปที่ 2.1 หลักการของเทคโนโลยีการแยกตัวด้วยเยื่อเลือกผ่าน

เยื่อเลือกผ่านที่มีสมรรถนะสูง คือเยื่อเลือกผ่านที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) มีฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านสูง
- 2) มีความแข็งแรงเชิงกล
- 3) ทนต่อสารเคมีและความร้อนภายใต้สภาวะการดำเนินการ
- 4) มีแนวโน้มการสะสมสารที่ผิวเยื่อเลือกผ่านต่ำ
- 5) ราคาไม่แพง

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน ได้แก่ การผลิตน้ำดื่มตั้งจากน้ำจืดผิวดินและน้ำเค็ม การแยกแก๊สเพื่อผลิตแก๊สใช้ในอุตสาหกรรมหรือแยกแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศเพื่อใช้ในกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การกรองอนุภาคของแข็งจากสารแขวนลอย การบำบัดแก๊สทิ้งในอุตสาหกรรม การแยกน้ำออกจากเอทานอล เพื่อผสมกับน้ำมันแก๊สโซลีนเป็นน้ำมันแก๊สโซลล์ การทำไดอะลิซิสในผู้ป่วยโรคไต เป็นต้น

### 2.1.1 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน

ลักษณะของกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านแต่ละประเภท แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน

กระบวนการ	สารป้อน	เพอร์มิเอต	แรงขับ
ไมโครฟิลเตรชัน	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
อัลตราฟิลเตรชัน	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
นาโนฟิลเตรชัน	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
ออสโมซิสผันกลับ	ของเหลว	ของเหลว	ความดัน
เพอร์แวกเพอเรชัน	ของเหลว	ไอ	ความดันย่อย
เยื่อเลือกผ่าน แลกเปลี่ยนไอออน	ของเหลว $[H^+(H_2O)_n]$	ของเหลว หรือ $H^+(H_2O)_n$	แรงเคลื่อนไฟฟ้า
แยกแก๊สด้วยเยื่อเลือก ผ่าน	ไอ	ไอ	ความดันย่อย

ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าเยื่อเลือกผ่านในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอุลตราฟิลเตรชัน และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน มีขนาดรูพรุนระดับ Macropores (>50 nm) Mesopores (2-50 nm) และ Micropores (<2 nm) ตามลำดับ ตามการแบ่งประเภทของ IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry) อนุภาคหรือโมเลกุลสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูที่มีขนาดใหญ่ที่สุดจะถูกกันออกไปทั้งหมด อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูที่มีขนาดใหญ่ที่สุดแต่ใหญ่กว่ารูที่มีขนาดเล็กที่สุด อนุภาคนี้สามารถผ่านออกไปเพียงบางส่วนตามการกระจายของขนาดรูเยื่อเลือกผ่าน (Pore size distribution) ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูที่เล็กที่สุดจะสามารถผ่านเยื่อเลือกผ่านไปได้ ดังนั้นหลักการของการแยกสารโดยใช้เยื่อเลือกผ่านมีรูพรุนจึงเป็นการคัดขนาดโมเลกุลสารหรืออนุภาคที่ขนาดแตกต่างกัน

เยื่อเลือกผ่านที่ใช้ในกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชัน และกระบวนการแยกแก๊สด้วยเยื่อเลือกผ่าน มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 5 อังสตรอม ซึ่งไม่สามารถเห็นรูพรุนบนเยื่อเลือกผ่านได้ด้วยเทคนิคของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) กล่าวคือจะเห็นเยื่อเลือกผ่านเป็นเนื้อแน่น (Dense membrane) การแยกที่เกิดขึ้นเป็นอีกกลไกหนึ่งที่เรียกว่า “กลไกการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion)” โมเลกุลสารที่มีขนาดเท่ากันสามารถแยกออกจากกันได้เนื่องจากมีสภาพละลายได้ (Solubility) ในเนื้อเยื่อเลือกผ่านและสภาพการแพร่ (Diffusivity) ภายใต้แรงขับเคลื่อนของความดัน ความเข้มข้น หรือความแตกต่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้า เยื่อเลือกผ่านที่ใช้ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับมี 2 ลักษณะคือ เยื่อเลือกผ่านมีรูพรุนขนาด 5–20 อังสตรอม กับเยื่อเลือกผ่านเนื้อแน่น ขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน

ตารางที่ 2.2 การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน

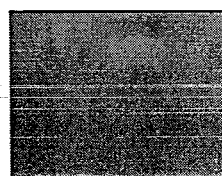
กระบวนการ	ขนาดรู (อังสตรอม)	กลไกการแยก
ไมโครฟิลเตรชัน	500-20,000	การคัดขนาด
อุลตราฟิลเตรชัน	30-1,000	การคัดขนาด
นาโนฟิลเตรชัน	10-50	การคัดขนาด
เพอร์แวกเพอเรชัน	< 5	การละลาย-การแพร่
แยกแก๊สด้วยเยื่อเลือกผ่าน	< 5	การละลาย-การแพร่
ออสโมซิสผันกลับ	5-20	การคัดขนาด
	< 5	การละลาย-การแพร่

## 2.1.2 โครงสร้างของเยื่อเลือกผ่านสังเคราะห์

เยื่อเลือกผ่านสังเคราะห์สามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนี้

- 1) เยื่อเลือกผ่านมีรูพรุน (Porous membrane)
- 2) เยื่อเลือกผ่านเนื้อแน่น (Dense membrane)
- 3) เยื่อเลือกผ่านแบบมีประจุ (Electrically charged membrane) หรือ เยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange membrane)
- 4) เยื่อเลือกผ่านของเหลว (Liquid membrane) เป็นเยื่อเลือกผ่านที่ใช้ Liquid carrier ทำหน้าที่คัดแยกสารหรือองค์ประกอบ

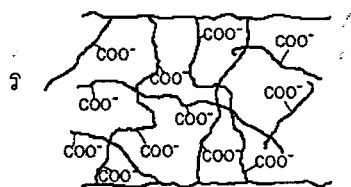
Nonporous dense membrane



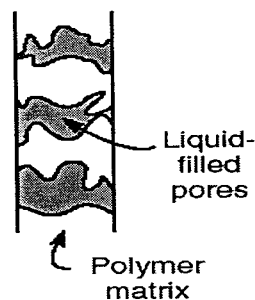
1) เยื่อเลือกผ่านมีรูพรุน

2) เยื่อเลือกผ่านเนื้อแน่น

Electrically charged membrane



Supported liquid membrane



3) เยื่อเลือกผ่านแบบมีประจุ

4) เยื่อเลือกผ่านของเหลว

รูปที่ 2.2 โครงสร้างภาคตัดขวางของเยื่อเลือกผ่าน [2]

### 2.1.3 ประเภทของเยื่อเลือกผ่านสังเคราะห์

1. เยื่อเลือกผ่านอินทรีย์ ส่วนใหญ่สังเคราะห์มาจากพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่นำมาทำเป็นเยื่อเลือกผ่านแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก คือ

- 1) เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ทั้งแบบมีโครงสร้างเป็นสายโซ่เชิงเส้น สายโซ่กิ่ง หรือโครงสร้างเชื่อมโยง
- 2) พอลิเมอร์คล้ายยาง (Rubbery polymers)
- 3) เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ทั้งแบบมีโครงสร้างเป็นสายโซ่เชิงเส้น สายโซ่กิ่ง หรือโครงสร้างเชื่อมโยง

ลักษณะทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ความโค้งงอของสายโซ่ (Chain flexibility) อันตรกิริยาของสายโซ่ (Chain interactions) องค์ประกอบโมเลกุล (Molecular composition) มีผลต่อสมบัติของเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้ในด้านเสถียรภาพทางเคมีและเสถียรภาพทางความร้อน (Chemical and thermal stability) ความแข็งแรงของเยื่อเลือกผ่าน (Membrane strength) ค่าการซึมผ่านได้/เปอร์เซ็นต์การคัดสรรของเยื่อเลือกผ่าน (Membrane permeability/selectivity) และค่าการนำไฟฟ้าของเยื่อเลือกผ่าน (Membrane conductivity) ดังนั้นจึงมีความสำคัญต้องเลือกชนิดของพอลิเมอร์ให้มีสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานหนึ่ง

สมบัติของพอลิเมอร์ที่ต้องคำนึงถึงสำหรับเยื่อเลือกผ่านแบบมีรูพรุน ได้แก่

- 1) ความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ ได้แก่ ความแข็งแรงของฟิล์ม ความสามารถในการโค้งงอของฟิล์ม ความต้านทานต่อการอัดแน่น
- 2) การมีเสถียรภาพต่อปฏิกิริยาเคมี และปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 3) การมีเสถียรภาพต่อความร้อน
- 4) ความชอบน้ำ/ความสามารถเปียกน้ำได้ (Hydrophilicity/wettability)
- 5) ลักษณะการดูดซึม (Absorption characteristics) ซึ่งมีผลต่อการเสถียรภาพของเยื่อเลือกผ่าน (Fouling)
- 6) ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) และช่วงขนาดรูพรุน
- 7) การมีเสถียรภาพต่อตัวทำละลายต่าง ๆ ซึ่งขึ้นกับความเป็นผลึก และพันธะไฮโดรเจน

### ประสิทธิภาพในการแยกของเยื่อเลือกผ่านแบบเนื้อแน่นขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังนี้

- 1) ระยะห่างระหว่างสายโซ่ (Interaction distance) หรือปริมาตรอิสระของพอลิเมอร์ (Polymer free volume) ซึ่งมีผลต่อค่าการซึมผ่านได้ของแก๊ส (Gas permeability)
- 2) อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature;  $T_g$ ) ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดว่าพอลิเมอร์มีลักษณะทางกายภาพแข็งคล้ายแก้ว (Glassy state) หรือมีลักษณะอ่อนนุ่มยืดหยุ่นคล้ายยาง (Rubbery state)
- 3) องศาความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารเกิดขึ้นผ่านส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานนั้น
- 4) อันตรกิริยาของสายโซ่ (Chain interaction) หรือความชอบน้ำ (Hydrophilicity)
- 5) การเชื่อมโยง (Crosslinking)
- 6) การบวม (Swellability)

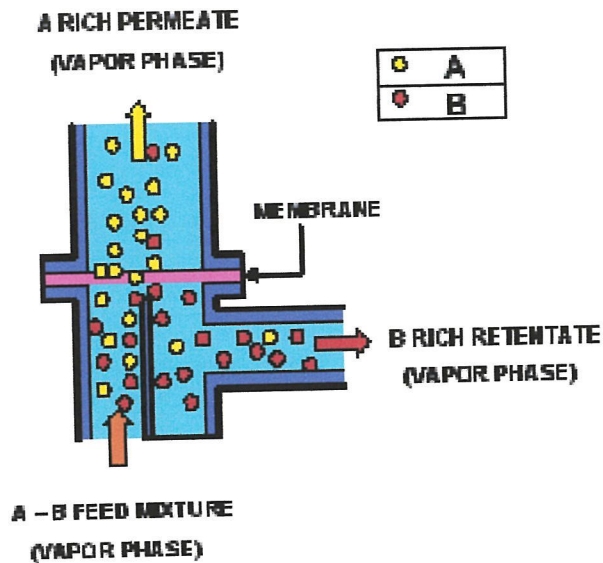
2. เยื่อเลือกผ่านอนินทรีย์ โดยทั่วไปเยื่อเลือกผ่านอนินทรีย์มีราคาแพงกว่าเยื่อเลือกผ่านอินทรีย์ แต่เยื่อเลือกผ่านอนินทรีย์มีข้อดีกว่าในเรื่องการมีเสถียรภาพต่อความร้อน ตัวทำละลาย การมีโครงสร้างรูพรุนที่คงที่แน่นอน และสามารถผ่านเข้ากระบวนการฆ่าเชื้อโรค การประยุกต์ใช้เยื่อเลือกผ่านอนินทรีย์แบบเนื้อแน่นที่สำคัญ คือการแยกแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ และการเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน อย่างไรก็ตามเยื่อเลือกผ่านอนินทรีย์แบบเนื้อแน่นไม่แพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรมเนื่องจากให้ค่าการแพร่ซึมต่ำ ตลาดของเยื่อเลือกผ่านอนินทรีย์จึงเป็นเยื่อเลือกผ่านประเภทมีรูพรุน

เยื่อเลือกผ่านอนินทรีย์แบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก คือเยื่อเลือกผ่านโลหะ (Metal membrane) เยื่อเลือกผ่านเซรามิกส์ (Ceramics membrane) เยื่อเลือกผ่านคาร์บอน (Carbon membrane) และเยื่อเลือกผ่านซีโอไลต์ (Zeolite membrane)

### 2.2 กระบวนการซึมผ่านไอ (Vapor permeation process)

กระบวนการซึมผ่านไอ (Vapor permeation process) เป็นกระบวนการแยกไอผสมที่มีหลายองค์ประกอบผ่านเยื่อเลือกผ่าน (รูปที่ 2.3) ซึ่งจะผ่านเยื่อเลือกผ่านไปได้หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ ไอของของผสมจะป้อนเข้าทางด้านป้อนของเยื่อเลือกผ่าน และส่วนที่ผ่านออกทางด้านขาออกของเยื่อเลือกผ่านในรูปของไอเรียกว่าเพอร์มิเอต (Permeate) โดยมีการควบคุม

ความดันไอ (Vapor pressure) ด้านเพอร์มิเอตให้ต่ำโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) หรือใช้แก๊สเฉื่อยเป็นตัวพาเพอร์มิเอตออกไป

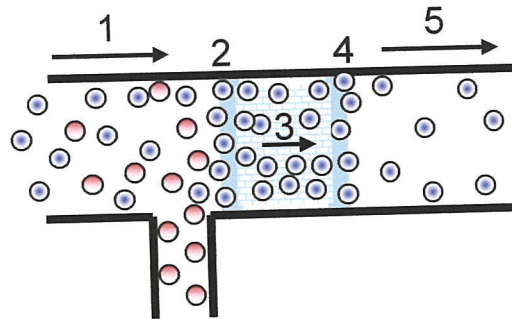


รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงกระบวนการซึมผ่านไอ (Vapor permeation process)

เยื่อเลือกผ่านที่ใช้ในกระบวนการซึมผ่านไอแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือเยื่อเลือกผ่านชอบน้ำ (Hydrophilic) และเยื่อเลือกผ่านที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยส่วนมากเป็นเยื่อเลือกผ่านจากพอลิเมอร์ การประยุกต์ใช้กระบวนการซึมผ่านไ้มากที่สุด คือการกำจัดน้ำออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเยื่อเลือกผ่านชอบน้ำ ตัวอย่างเช่น การกำจัดน้ำออกจากเอทานอล โดยถ้าปริมาณเอทานอลในสารป้อนสูง จะใช้เยื่อเลือกผ่านชอบน้ำ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinylalcohol; PVA) แต่ถ้าปริมาณเอทานอลในสารป้อนต่ำ นิยมใช้เยื่อเลือกผ่านไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethyl siloxane; PDMS) เพื่อดึงเอทานอลออกจากน้ำ

### 2.2.1 กลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อเลือกผ่าน

กลไกการถ่ายโอนมวลของสารในกระบวนการซึมผ่านไอ ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน คือ การแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่ผิวเยื่อเลือกผ่าน การดูดซับที่ผิวเยื่อเลือกผ่าน การแพร่ของโมเลกุลภายในเยื่อเลือกผ่าน การคายซับ การแพร่ของโมเลกุลจากผิวเยื่อเลือกผ่าน (รูปที่ 2.4)



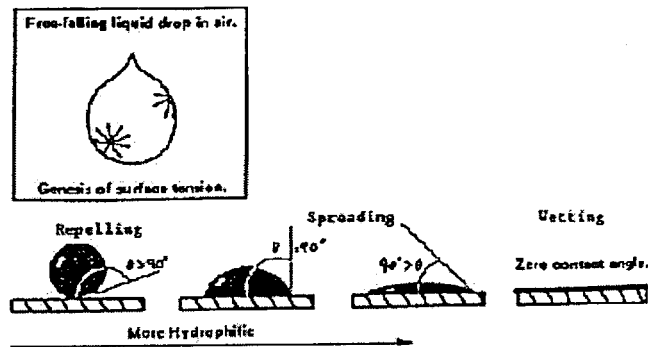
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงกลไกการถ่ายเทมอดผ่านเยื่อเลือกผ่าน

### 1) การแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่ผิวเยื่อเลือกผ่าน

ในกระบวนการซึมผ่านไอ โมเลกุลแต่ละองค์ประกอบจะแพร่เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณผิวหน้าของเยื่อเลือกผ่าน โดยอัตราการแพร่จะขึ้นกับพลังงานจลน์ของโมเลกุล ชั้นนี้โมเลกุลยังไม่เกิดการแยก

### 2) การดูดซับที่ผิวเยื่อเลือกผ่าน

การดูดซับที่ผิวหน้าเยื่อเลือกผ่านเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างสารที่ต้องการแยกกับเยื่อเลือกผ่าน อันตรกิริยาดังกล่าวขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น โมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ระหว่างโมเลกุลของสารป้อนกับผิวหน้าของเยื่อเลือกผ่าน ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจน (H-bonds) ความชอบน้ำและความไม่ชอบน้ำ (Hydrophilicity and Hydrophobicity) โดยเมื่อเยื่อเลือกผ่านสัมผัสกับสาร เยื่อเลือกผ่านที่มีอันตรกิริยาที่ดีกับสารนั้น จะก่อให้เกิดการควบแน่นไอที่ผิวเยื่อเลือกผ่านและมุมสัมผัส (Contact angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของเยื่อเลือกผ่านกับเส้นสัมผัสของเหลว มีค่าอยู่ระหว่าง 0-90 องศา โดยค่ามุมสัมผัสที่ต่ำกว่าแสดงว่าสามารถทำให้เยื่อเลือกผ่านดูดซับได้มากขึ้น เยื่อเลือกผ่านที่ไม่ชอบสารนั้นจะทำให้ค่ามุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา ดังตัวอย่างการเปียกของผิววัสดุกับค่ามุมสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 มุมสัมผัสผิวกกับการเปียกของผิววัสดุ [3]

### 3) การแพร่ของโมเลกุลภายในเยื่อเลือกผ่าน

เมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ผิวหน้าของเยื่อเลือกผ่านแล้วเกิดการแพร่ของโมเลกุลผ่านเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งการแพร่ของโมเลกุลขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างโมเลกุลของสารที่แพร่ โดยสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ หรือมีรูปร่างที่เล็กกว่าจะเกิดการแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านได้ดีกว่า การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารกับเยื่อเลือกผ่าน จะทำให้เยื่อเลือกผ่านเกิดการบวมตัว มีผลทำให้อัตราการแพร่ของสารในเยื่อเลือกผ่านสูงขึ้น

### 4) การคายซับจากผิวเยื่อเลือกผ่าน

เมื่อโมเลกุลของสารเคลื่อนที่มาถึงอีกผิวด้านหนึ่งของเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งสารอาจอยู่ในสถานะของแก๊สหรือของเหลวจะเกิดการเคลื่อนที่ออกจากเยื่อเลือกผ่าน ด้วยการพาของแก๊สหรือการใช้ปั๊มสุญญากาศ ทำให้เกิดการคายซับของสารที่ผิวของเยื่อเลือกผ่าน

### 5) การแพร่ของโมเลกุลจากผิวเยื่อเลือกผ่าน

โมเลกุลของสารจะแพร่ออกจากบริเวณผิวของเยื่อเลือกผ่าน โดยการพาไปของแก๊สพาหรือการใช้ปั๊มสุญญากาศทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลออกจากเยื่อเลือกผ่าน

## 2.2.2 ประสิทธิภาพในการแยก

ค่าที่สำคัญในการบอกประสิทธิภาพของเยื่อเลือกผ่าน มีอยู่ด้วยกัน 2 ค่า คือ ฟลักซ์ (Flux) และค่าความสามารถในการแยก (Separation factor)

### 1) ฟลักซ์ (Flux)

เป็นค่าที่บอกถึงอัตราการไหลผ่านเยื่อเลือกผ่าน ถ้าค่าฟลักซ์มีค่าสูงแสดงว่ามีสารผ่านเยื่อเลือกผ่านจำนวนมาก ฟลักซ์หาได้จากจำนวนโมลของสารที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านต่อเวลาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเยื่อเลือกผ่าน

$$\text{Flux} = \frac{(g/hr)}{(m^2)}$$

## 2) ค่าความสามารถในการแยก (Separation factor)

เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการแยกของเยื่อเลือกผ่านว่าเยื่อเลือกผ่านมีความเฉพาะเจาะจงในการให้สารนั้นผ่านได้มากน้อยเพียงใด

$$\text{Separation factor } (\alpha) = \frac{Y_A/Y_B}{X_A/X_B}$$

$Y_A$  = สัดส่วน โมลของสาร A ที่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน

$Y_B$  = สัดส่วน โมลของสาร B ที่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน

$X_A$  = สัดส่วนโมลของสาร A ที่อยู่ในสารป้อน

$X_B$  = สัดส่วนโมลของสาร B ที่อยู่ในสารป้อน

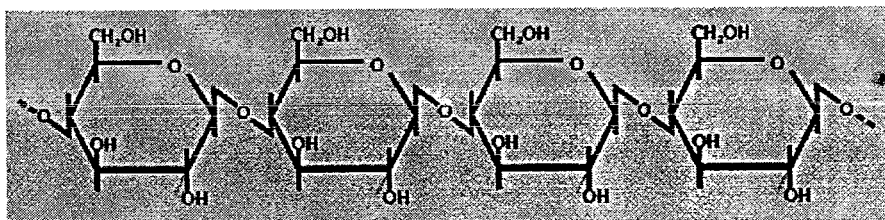
## 2.3 ไคตินและไคโตซาน [4]

ไคติน (Chitin) เป็นพอลิเมอร์ที่ธรรมชาติได้สร้างเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตมากมายในหลายรูปแบบ ไคตินได้รับการค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1811 โดย Odier คำว่าไคติน (Chitin) มาจากคำว่า Chiton ในภาษากรีก ซึ่งมีความหมายว่าเกราะหุ้ม ไคติน (รูปที่ 2.7) เป็นพอลิเมอร์ที่มีมากที่สุดในโลกเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (Cellulose) (รูปที่ 2.6) พอลิเมอร์ทั้งสองนี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างป้องกันและสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้อาจพบในผนังเซลล์ของเห็ดและสาหร่ายบางพันธุ์ เนื่องจากไคตินเป็นสารธรรมชาติจึงพบอยู่ในรูปของสารประกอบที่ปนอยู่กับสารอื่น เช่น เปลือกหุ้มแข็งของแมลงจะประกอบด้วยไคตินในรูปของไคตินโปรตีน (Chitin-protein complex) ขณะที่เปลือกนอกของสัตว์พวกกุ้ง ปู จะพบหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต

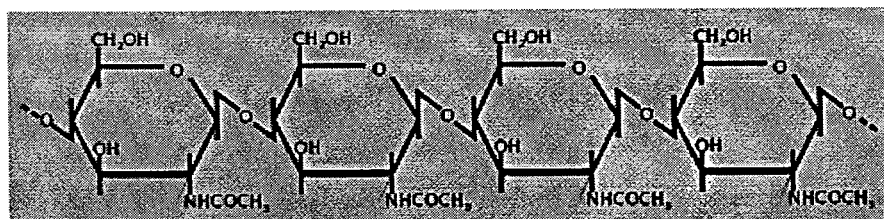
ไคโตซาน (รูปที่ 2.8) เป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ของไคติน ไคโตซานถูกพบครั้งแรกโดยบังเอิญในปี ค.ศ. 1859 โดย Rouget ได้ต้มไคตินในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น

### 2.3.1 โครงสร้างเคมีของไคตินและไคโตซาน

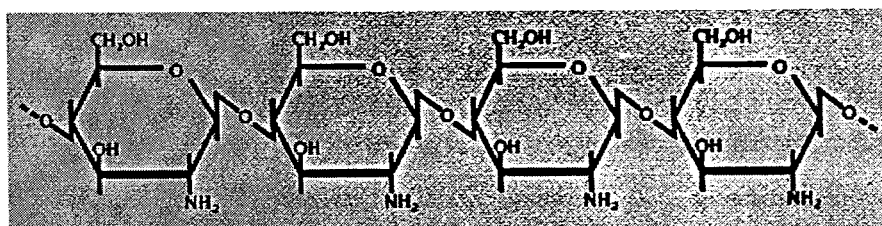
ไคตินเป็นพอลิเมอร์แบบเส้นตรงที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายเซลลูโลส ต่างกันตรงที่หน่วยย่อย (Monomer) ของเซลลูโลสเป็น D-glucose ส่วนหน่วยย่อยของไคติน คือ N-acetyl-D-glucosamine (2-acetamido-2-deoxy-D-glucose) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกลูโคส ชื่อทางเคมีของไคติน คือ Poly  $\beta$ -(1-4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucose ไคโตซาน คือไคตินในรูปที่มีปริมาณหมู่อะซีติลต่ำเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีติล (Deacetylation) ของไคตินด้วยด่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างทางเคมีเปลี่ยนไป โดยหมู่อะซีตามิโด (-NHCOCH<sub>3</sub>) เปลี่ยนเป็นหมู่เอมิโน (-NH<sub>2</sub>) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ดังนั้นไคโตซานคือ พอลิเมอร์ของ D-glucosamine (2-amino-1-deoxy-D-glucose)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [5]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของไคติน [5]



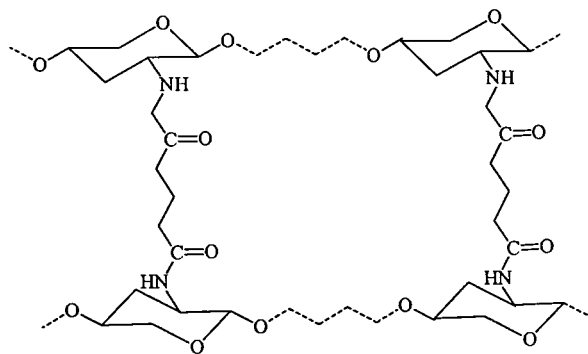
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน [5]

### 2.3.2 สมบัติของไคตินและไคโตซาน

#### 1) สมบัติทางเคมี

ไคติน-ไคโตซานเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ถ้าสัดส่วนของ N-acetyl-D-glucosamine มากกว่า คือมีค่าองศาการดีอะซีทิลเลชัน (Degree of deacetylation; DD) ต่ำ จะแสดงสมบัติเด่นของไคติน แต่ถ้าสัดส่วนของ D-glucosamine มากกว่า คือมีค่า DD สูง จะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน

ไคตินในธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า  $1 \times 10^6$  กรัมต่อโมล ส่วนไคโตซานมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง  $1 \times 10^5$  ถึง  $1 \times 10^6$  กรัมต่อโมล เมื่อไคตินและไคโตซานเกิดการสลายของสายโซ่โมเลกุลโดยกรดหรือด่าง ทำให้สายโซ่โมเลกุลที่สั้นลงเป็นโอลิโกเมอร์หรือโอลิโกแซคคาไรด์ โดยไคตินสามารถต้านทานต่อการเสื่อมสลายโดยกรดได้ดีกว่าไคโตซาน การใช้งานไคโตซานสามารถปรับปรุงได้โดยใช้สารเชื่อมโยง (Crosslinking agents) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนโครงสร้างของไคโตซานสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (รูปที่ 2.9) ที่มีความทนทานต่อกรด ด่าง และสารเคมีอื่นได้ดี สารเชื่อมโยงที่สามารถใช้ได้กับไคโตซาน ได้แก่ กลูตารอลดีไฮด์ (Glutaraldehyde; GA) กลูตาริกไดอัลดีไฮด์ (Glutaric dialdehyde; GDI) อีพิคลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) ไดเอทิลสควาเรต (Diethyl squarate; DES) เอทิลีนไกลคอลไกลิไซด์อีเทอร์ (Ethylene glycol glycidyl ether; EGDE) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างไคโตซานที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารอลดีไฮด์

## 2) สมบัติทางกายภาพ

โคติน-โคโตซานมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวหรือสีเหลืองอ่อน โคตินไม่ละลายในน้ำ กรดเจือจาง ต่างทั้งเจือจางและเข้มข้น แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ แต่สามารถละลายในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก กรดฟอร์มิก ความยากในการละลายเป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่น พันธะเกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันต่างกัน โคโตซานไม่ละลายน้ำ ต่างและตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) แต่สามารถละลายกรดอินทรีย์ทุกชนิด กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิกเป็นกรดที่นิยมใช้ในการละลายโคโตซาน กรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไนตริกเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก กรดเปออร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก สามารถละลายโคโตซานได้เช่นเดียวกันภายใต้การคน โดยทำการละลายที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามในบางครั้งอาจมีตะกอนขาวคล้ายเจลเกิดขึ้น สารละลายโค-โตซานมีความเหนียวใสมีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน ความหนืดของสารละลายโคโตซานขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น องค์การดีอะซิติกเลชัน (DD) น้ำหนักโมเลกุล ความแรงของพันธะไอออนิก (Ionic strength) ความเป็นกรด ต่าง และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลาย พอลิเมอร์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้ และการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายพอลิเมอร์มีผลต่อความหนืด เช่น ความหนืดของโคโตซานในกรดอะซิติกเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมี pH ลดลง ในขณะที่ความหนืดของโคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น

### 2.3.3 ประโยชน์ของโคตินและโคโตซาน

ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าและวิจัย นำโคตินและโคโตซานไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1) วัสดุทางการแพทย์

เนื่องจากโคตินและโคโตซานเป็นสารธรรมชาติ ดังนั้นร่างกายมนุษย์มักจะไม่ทำการต่อต้าน นอกจากนี้โคตินและโคโตซานยังสามารถป้องกันการติดเชื้อ ซึ่งจากข้อดีต่างๆ นี้เอง จึงสามารถนำโคตินและโคโตซานมาใช้งานในส่วน of วัสดุทางการแพทย์ได้อย่างมากมาย เช่น วัสดุตกแต่งแผล ตัวควบคุมการปลดปล่อยยา ผิวหนังเทียม เป็นต้น

#### 2) อาหารและเครื่องดื่ม

โคตินและโคโตซานเป็นอาหารเสริม (Nutritional additives) ที่ไม่ให้พลังงานและไม่มีการดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ดังนั้นจึงมีการนำไปใช้ในอาหารสำหรับการควบคุมน้ำหนัก (Diet food) อีกทั้งโคตินและโคโตซานยังมีสมบัติเป็น barrier จึงมีการนำมาใช้ในเรื่องบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร

ตัวอย่างการนำไคตินและไคโตซานไปใช้ในด้านนี้ คือ food stabilizer สารเติมแต่งในอาหาร อาหารเสริมควบคุมน้ำหนัก การถนอมรักษาอาหาร บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เป็นต้น

### 3) การเกษตร

ไคตินและไคโตซานมีสมบัติพิเศษบางอย่างที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ทางเกษตรกรรม ได้มีการพัฒนาการนำไปใช้ทางเกษตรกรรมอย่างมากมาย เช่น การเคลือบเมล็ดพันธุ์ ส่วนผสมในอาหารสัตว์ ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าไส้เดือน ยาฆ่า/ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา

### 4) เครื่องสำอาง

ไคตินและไคโตซานถูกใช้เป็นสารทำให้ข้น (Thickening agent) และสารเติมแต่ง (Additive) ในผลิตภัณฑ์ประเภท hair care, skin care และ oral care

### 5) การบำบัดน้ำเสีย

ในการบำบัดน้ำเสียอาศัยสมบัติความเป็น polyelectrolyte และความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักของไคโตซานเพื่อใช้ในกระบวนการ recoveries ของโลหะซึ่งสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียในสระว่ายน้ำ ในโรงงานอุตสาหกรรม

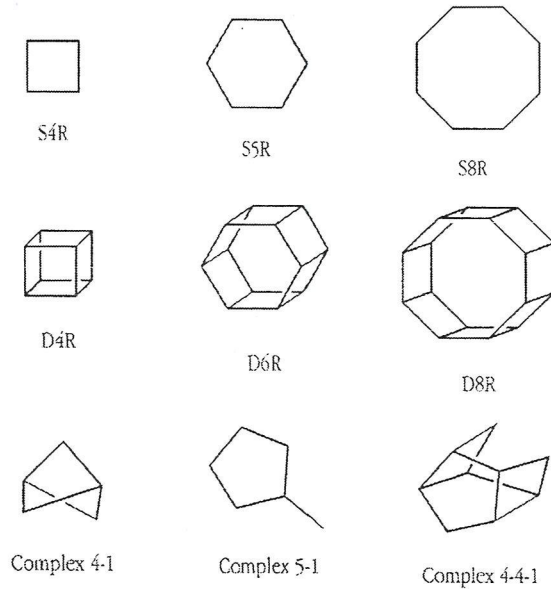
### 6) การแยกสาร

ไคตินและไคโตซานในรูปต่างๆ เช่น เยื่อเลือกผ่าน (Membrane) ผง สารละลาย ถูกนำไปพัฒนาใช้เป็นเยื่อเลือกผ่านในการแยกสารและใช้เป็นวัฏภาคคงที่ (Stationary phase) ในงานวิเคราะห์ทางโครมาโทกราฟี

## 2.4 ซีโอไลต์

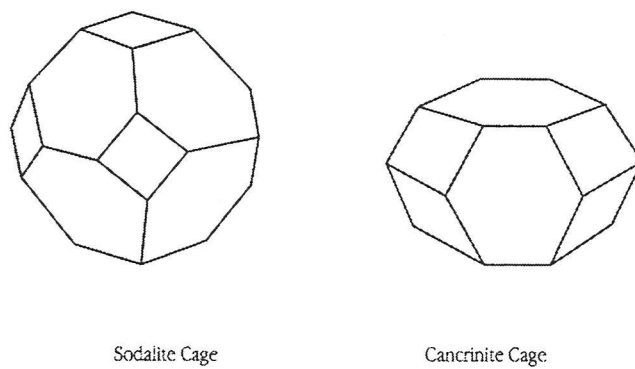
ซีโอไลต์คือผลึกที่ประกอบด้วยสารประกอบจำพวกอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) โครงสร้างประกอบด้วยทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกา  $[\text{SiO}_4]$  และอลูมินา  $[\text{AlO}_4]$  เชื่อมกันด้วยอะตอมออกซิเจนเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนสามมิติขนาดใหญ่ (Three dimensional) โดยมีไอออนประจุบวก (Cation) และโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ตามช่องว่างภายในโครงสร้าง

การจัดเรียงโครงสร้างของซีโอไลต์เริ่มจากโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary unit) ที่มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้าที่มีออกซิเจนสี่ตัวล้อมรอบ โครงสร้างปฐมภูมิประกอบด้วยอะตอม ซิลิกอน อลูมิเนียม และออกซิเจนที่เชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายสามมิติ เกิดการจัดเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Unit; SBUs) ดังรูปที่ 2.10



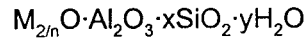
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์

โครงสร้างทุติยภูมิเหล่านี้เชื่อมต่อกันโดยการสร้างพันธะต่อกันระหว่างโครงสร้างทุติยภูมิด้วยกันเอง เรียกโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่ว่าโครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary Building Unit หรือ Polyhedral) โครงสร้างตติยภูมิสามารถเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างผลึกซีโอไลต์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.11 โครงสร้างตติยภูมิของซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังนี้

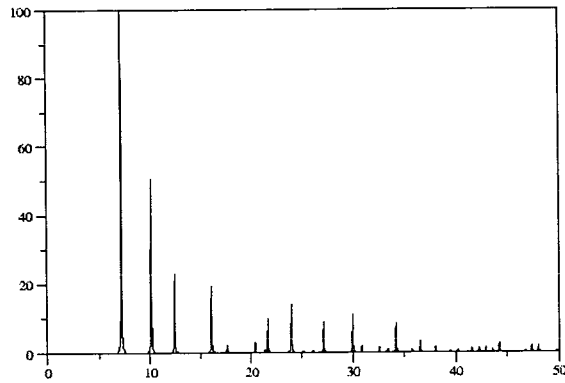


เมื่อ M คือจำนวนไอออนบวกที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดเท่ากับ n ค่า x มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 ค่า y มีค่าอยู่ในช่วง 10-200

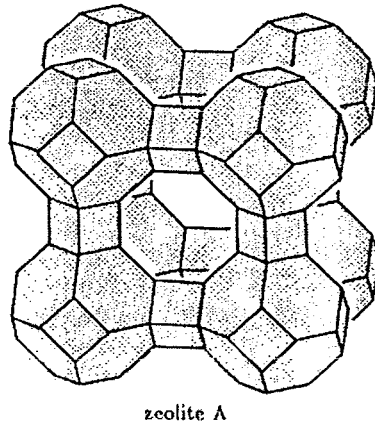
หน่วยย่อยของซิลิกาจะไม่มีประจุ แต่หน่วยย่อยของอลูมินามีประจุลบหนึ่ง ทำให้ประจุสุทธิของโครงสร้างซีโอไลต์มีค่าเป็นลบ โดยมีไอออนบวกของโลหะอัลคาไลที่อยู่ในโครงสร้างทำหน้าที่ดุลประจุสุทธิให้ซีโอไลต์สำหรับทุกตำแหน่งหน่วยอลูมินาในโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดนั้นๆ อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา (Si/Al) และลักษณะโครงสร้างทำให้ซีโอไลต์มีความแตกต่างกัน การนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้งานเช่น เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchanger) ตัวดูดซับ (Adsorption) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ต้องพิจารณาถึงอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา โครงสร้างของซีโอไลต์ และชนิดของไอออนประจุบวก

## 2.5 ซีโอไลต์โซเดียมเอ

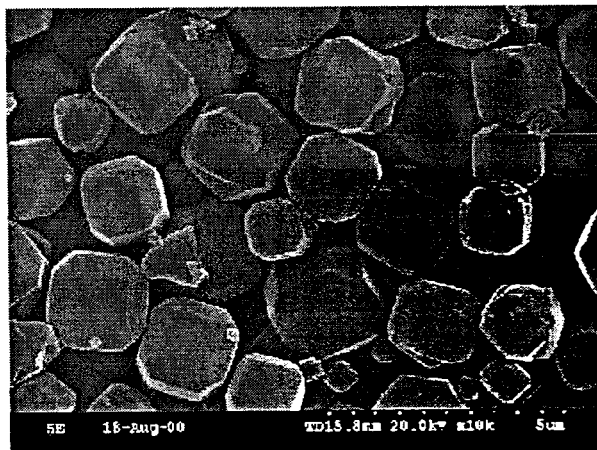
ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) มีสูตรทางเคมี คือ  $Na_{12} [(AlO_2)_{12} (SiO_2)_{12}] \cdot 27H_2O$  โดยมี X-Ray Diffraction pattern ดังแสดงในรูปที่ 2.12 มีโครงสร้างเป็นกรงแบบแอลฟา ( $\alpha$ -cage) ลักษณะเป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ลักษณะผลึกของซีโอไลต์โซเดียมเอ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และซีโอไลต์โซเดียมเอมีสัดส่วนช่องว่างต่อปริมาตรเท่ากับ 0.47 มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนกว้างที่สุดเท่ากับ 4.2 อังสตรอม สลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700 °C มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนและอลูมิเนียมเท่ากับ 1 ทำให้ซีโอไลต์โซเดียมเอมีความเป็นขั้วสูง สามารถดูดซับโมเลกุลต่างๆ ที่มีขั้วสูง เช่น โมเลกุลของน้ำ



รูปที่ 2.12 แสดง X-Ray Diffraction pattern ของซีโอไลต์เอเดี่ยวมเอ [8]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของซีโอไลต์เอเดี่ยวมเอ [7]



รูปที่ 2.14 ลักษณะผลึกของซีโอไลต์เอ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [9]

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านให้ความสนใจในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยเกี่ยวกับการแยกน้ำออกจากเอทานอลโดยใช้พอลิเมอร์เยื่อเลือกผ่านโดยตัวอย่างงานวิจัยมีดังนี้

Y.M. Lee และคณะ [9] ทำการสังเคราะห์เยื่อเลือกผ่านคอมโพสิตของไคโตซานที่เตรียมโดยการหล่อสารละลายบนเยื่อเลือกผ่านอีเทอร์ซัลโฟน พร้อมทำการเชื่อมโยงด้วยกรดซัลฟิวริก เปรียบเทียบกับเยื่อเลือกผ่านคอมโพสิตพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยนำไปทำการแยกของผสมน้ำกับเอทานอลโดยใช้เทคนิคเพอร์เวปอเรชัน (Pervaporation) ซึ่งการเชื่อมโยงที่ผิวเยื่อเลือกผ่านคอมโพสิตไคโตซานทำให้ค่าความสามารถในการแยก (Selectivity) มีค่าสูง แต่ทำให้ค่าฟลักซ์ของการแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Permeation flux) ต่ำ โดยถ้าทำการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อน ทำให้ค่าฟลักซ์ของการแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Permeation flux) ลดลงและความเข้มข้นของน้ำในส่วนที่แพร่ผ่านลดลงอย่างมากที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนมากกว่า 97 % โดยมวล และผลของสมบัติทางความร้อนเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเยื่อเลือกผ่านคอมโพสิตพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าเยื่อเลือกผ่านคอมโพสิตของไคโตซานมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าเยื่อเลือกผ่านคอมโพสิตพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

X.P. Wang และคณะ [10] ทำการศึกษาการใช้เยื่อเลือกผ่านแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์ โดยโครงสร้างเยื่อเลือกผ่านประกอบด้วยฟิล์มบางๆ ของไคโตซานอยู่ชั้นบนและรองรับด้วยเยื่อที่ทำจากพอลิอะคริโลไนไตรล์ โดยมีการเชื่อมโยงระหว่างระหว่างชั้นทั้งสอง ในการประยุกต์ใช้เยื่อเลือกผ่านคอมโพสิตทำการแยกด้วยเทคนิคเพอร์เวปอเรชัน ต้องมีค่าความสามารถในการแยก (Separation factor) สูงกว่า 8,000 และค่าฟลักซ์ (Flux) ของการซึมผ่านเท่ากับ  $264 \text{ g/m}^2\text{h}$  สำหรับสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้น 90 % โดยมวล ที่อุณหภูมิ  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ในกระบวนการแยกใช้อุณหภูมิที่ต่างกัน จากผลการทดลองได้ค่าความสามารถในการแยกและค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันการทำการเชื่อมโยงทำให้คอมโพสิตเยื่อเลือกผ่านมีความแข็งแรงพอที่จะใช้ในกระบวนการแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์ได้

J.H. Kim และคณะ [11] ทำการศึกษาเยื่อเลือกผ่านผสมที่ประกอบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และไคโตซาน โดยเตรียมจากเทคนิคการหล่อแบบ เยื่อเลือกผ่านผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับไคโตซานมีอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ  $230 \text{ }^{\circ}\text{C}$  สมบัติเชิงกลของเยื่อเลือกผ่านผสมมีค่ามากกว่าเยื่อเลือกผ่านแต่ละชนิด สำหรับการเชื่อมโยงเยื่อเลือกผ่านโดยใช้กลูตาโรลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และเสถียรภาพทางความร้อน

(Thermal stability) ของเยื่อเลือกผ่านผสมเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่อะมิโนในของผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับไคโตซานลดลง ทำให้การบวมตัวของเยื่อเลือกผ่านลดลง

T. Uragami และคณะ [13] ทำการศึกษาการเชื่อมโยงของเยื่อเลือกผ่านควอเทอร์ไนซ์ไคโตซาน (Quaternized Chitosan membrane; q-chito) 2 ชนิด ชนิดแรกเตรียมโดยใช้การหล่อแบบสารละลาย q-chito ที่ประกอบด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde; GA) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดไฮโดรคลอริกบนพอลิอีเทอร์ซัลโฟน (Polyethersulfone) ที่มีรูพรุน ส่วนอีกชนิดหนึ่งเป็นการนำเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมชนิดแรกมาเชื่อมโยงโดยใช้สารละลายกลูตารัลดีไฮด์และใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วนำเยื่อเลือกผ่านทั้งสองชนิดไปใช้ในการแยกน้ำออกจากของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง—ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์ (Permiation flux) ถ้ามีความดันไอเพิ่มขึ้น และค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์จะลดลงถ้าเพิ่มอุณหภูมิภายใต้ความดันไอของสารป้อนคงที่ การลดลงของค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์เป็นผลมาจากความหนาแน่นของโพลีเมอร์ ซึ่งมีส่วนระหว่างความดันของสารป้อนกับความดันทั้งหมด โดยค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์หาได้จากสมการซึ่งได้จากข้อมูลการทดลองที่ทำการเปลี่ยนอุณหภูมิของสารป้อน แล้วทำนายสัดส่วนของความดันไอของสารป้อนกับความดันทั้งหมด ลักษณะการแยกน้ำในของผสมระหว่างน้ำกับเอทานอลเพิ่มขึ้นด้วยการลดความแตกต่างระหว่างความดันสารป้อนกับความดันทั้งหมด

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1) กรดอะซิติก (เกรดวิเคราะห์)	จากบริษัท Fuka chemical
2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (เกรดวิเคราะห์)	จากบริษัท Fuka chemical
3) กลูตารอลดีไฮด์ (เกรดวิเคราะห์)	จากบริษัท Merck Co., Ltd.
4) เอทานอล (เกรดวิเคราะห์)	จากบริษัท Fuka chemical
5) แก๊สฮีเลียม (เกรดHP)	จากบริษัท TIG
6) น้ำกลั่น	
7) ไคโตซาน (เกรดการค้า)	จากบริษัท TC Union Co., Ltd.

ตารางที่ 3.1 สมบัติของไคโตซาน

สมบัติ	ค่าที่ได้
องศาการกำจัดหมู่อะซิดิล (%DD)	91.15 %
เถ้า	0.33 %
โปรตีน	0.21 %
ความชื้น	4.05 %
สี	ขาว

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท TC Union Co., Ltd.

8) ซีโอไลต์โซเดียมเอ	จากบริษัท PQ chemical (Thailand) Co., Ltd.
9) ซิลิกาไลต์	จากห้องปฏิบัติการ

### ตารางที่ 3.2 สมบัติของซีโอดีโซเดียมเอ

สมบัติ	ค่าที่ได้
ลักษณะ	ผงมีการไหลอย่างอิสระ
pH ของ 1 % การกระจายตัว	11.34
ความหนาแน่น	366 กรัมต่อลิตร
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	3.91 ไมครอน

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัท PQ chemical (Thailand) Co., Ltd.

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) บริเวณที่เครื่องแก้ว
- 2) ชุดทดสอบกระบวนการซีมผ่านไอ
- 3) หลุมให้ความร้อน (Heating mantel)
- 4) เทอร์โมมิเตอร์
- 5) ปัมดูดของเหลวชนิดเพอร์ริสแตติก (Peristaltic pump) บริษัท WATSON-MARLOW รุ่น 101 V/R
- 6) เครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (Mass flow meter) บริษัท SIERRA INSTRUMENTS รุ่น MASSTRAK
- 7) เครื่องสั่นโดยใช้คลื่นเสียง (Ultrasonic bath) บริษัท NEY DENTAL รุ่น 14H
- 8) ตู้อบ
- 9) เครื่องชั่ง บริษัท DENVER INSTRUMENT รุ่น TC-254
- 10) ถังมือกันความร้อน
- 11) ไมโครมิเตอร์
  - Column Parapak Q
  - Column oven 140 °C
  - Detector TCD
    - Temperature 200 °C
    - Filament Temperature 230 °C
  - Carrier gas 30 ml/min
  - Run time 7 min

- 12) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)บริษัท LEO รุ่น LEO1455VP
- 13) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC) บริษัท VARION รุ่น VARION 3800
- 14) เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer)  
บริษัท PERKINELMER รุ่น PYRIS 1 TGA
- 15) เครื่อง XRD (X-ray diffractometer) บริษัท BRUKER AG รุ่น D8 ADVANCE

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมเยื่อเลือกผ่าน

##### 1) สังเคราะห์ซีโอไลต์ขนาดอนุภาคเล็ก

- 1.1) ชั่งโซเดียมอะลูมิเนต 5 กรัมใส่ลงในบีกเกอร์ 250 มิลลิลิตร
- 1.2) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้น 18 %wt จำนวน 40 กรัม ปั่นกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 1.3) เติมน้ำปราศจากไอออน 27 กรัม ปั่นกวนสารละลายต่อ
- 1.4) เติมละอองซิลิกาน้ำหนัก 3.3 กรัม โดยใช้ช้อนตักสารค่อย ๆ เติมลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายปั่นกวนอยู่จนหมดภายในเวลา 10 นาที
- 1.5) ถ่ายของผสมในบีกเกอร์ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการรีฟลักซ์ (Reflux) โดยปั่นกวนอยู่เสมอเป็นเวลาประมาณ 45 นาที
- 1.6) เมื่อครบกำหนดเวลานำขวดก้นกลมมาแช่ในน้ำเย็น กรองซีโอไลต์เอที่ได้ผ่านกรวยบุชเนอร์
- 1.7) ล้างซีโอไลต์เอด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยถ่ายซีโอไลต์เอลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 30 มิลลิลิตร กวนของผสมด้วยแท่งแก้วคนแล้วนำไปกรองด้วยกรวยบุชเนอร์
- 1.8) นำของแข็งที่ได้จากการกรองมาเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ แบ่งของผสมใส่หลอดแล้วนำไปใส่เครื่องเหวี่ยงแยกตะกอนที่ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
- 1.9) เทของเหลวใสด้านบนออกแล้วเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ กวนของผสมด้วยแท่งแก้วคน ทำซ้ำข้อ 1.8) 2-3 ครั้งจนค่า pH ของของเหลวที่ผ่านการล้างมีค่าไม่เกิน 9
- 1.10) นำซีโอไลต์โซเดียมเอที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน
- 1.11) นำซีโอไลต์ที่เตรียมได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD และศึกษาพื้นฐานวิทยาด้วย SEM

##### 2) การเตรียมตัวอย่างซีโอไลต์ทางการค้า

- 2.1) นำซีโอไลต์โซเดียมเอที่ได้จากบริษัท PQ chemical (Thailand) Co., Ltd. ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ กวนของผสมด้วยแท่งแก้วคน แบ่งของผสมใส่หลอดทดลองแล้วนำไปใส่เครื่องเหวี่ยงแยกตะกอนที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

2.2) เทของเหลวใสด้านบนออกแล้วเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์กวนของผสมด้วยแท่งแก้วคน ทำซ้ำข้อ 2.1) หลาย ๆ ครั้งจนค่า pH ของของผสมที่ผ่านการล้างมีค่าไม่เกิน 9

2.3) นำซีโอไลต์โซเดียมเอที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน

### 3) การเตรียมสารละลายโคโคซาน

3.1) นำโคโคซานมาละลายในกรดอะซิติก โดยใช้โคโคซาน 2 กรัมละลายในกรดอะซิติกเข้มข้น 2 % (v/v) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.2) นำสารละลายมาปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.3) นำสารละลายมาเติมกลูตาโรลดีไฮด์เข้มข้น 0.05 % (w/w) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร

3.4) นำสารละลายโคโคซานที่ได้มาปรับ pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 % ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนจนกระทั่งมี pH ประมาณ 6.5

3.5) ซังซีโอไลต์ปริมาณ 0-50 phr นำมากระจายตัวในน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นโดยใช้เครื่อง Ultrasonic bath เป็นเวลา 15 นาที

3.6) นำซีโอไลต์ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำกลั่นแล้วมาเทลงในสารละลายโคโคซาน นำไปปั่นกวนโดยใช้แท่งแม่เหล็ก

3.7) นำสารละลายมากำจัดฟองอากาศโดยใช้เครื่อง Ultrasonic bath

### 4) การเตรียมเยื่อเลือกผ่าน

4.1) ใช้ปิเปตดูดสารละลายโคโคซานที่ได้จากการเตรียมในข้อ 3) ปริมาตร 75 มิลลิลิตร ค่อย ๆ ฉีดลงในแม่แบบที่ทำจากกระจกที่รองด้วยแผ่นใส

4.2) นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เยื่อเลือกผ่านโคโคซานอะซิเทต

4.3) นำเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้มาทำให้เป็นกลางโดยแช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 % (w/v) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง

4.4) นำเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้มาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อีกส่วนไม่ต้องนำไปอบ

4.5) นำเยื่อเลือกผ่านโคโคซานที่เตรียมได้มาวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์โดยเลือกเยื่อเลือกผ่านที่อบให้ความหนาอยู่ในช่วง  $30 \pm 2$  ไมโครเมตร ส่วนเยื่อเลือกผ่านที่ไม่อบให้ความหนาอยู่ในช่วง  $60 \pm 5$  ไมโครเมตร

4.6) นำเยื่อเลือกผ่านโคโตะซานที่เตรียมได้ทั้งหมดมาแช่ไว้ในสารละลายเอทานอลเข้มข้น 50 %mol เพื่อที่จะรอนำไปทดสอบต่อไป

### 3.3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเยื่อเลือกผ่าน

#### 3.3.2.1 ศึกษาโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ด้วยเครื่อง XRD

1. สภาพะในการทดสอบใช้แหล่งกำเนิดรังสี  $\text{CuK}\alpha$  (40 kV, 40 mA) ความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม มุม 5-60 องศา Step size  $0.04^\circ/\text{s}$
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์โซเดียมเอที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยทำการเตรียมตัวอย่างแบบเป็นผงใส่ในที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample holder) แล้วทำการเกลี่ยให้พื้นผิวเรียบแล้วนำไปวิเคราะห์
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์โซเดียมเอในเยื่อเลือกผ่าน โดยตัดเยื่อเลือกผ่านขนาด  $4 \text{ cm}^2$  ตัดลงบนที่วางตัวอย่างสำหรับฟิล์มบางแล้วนำไปวิเคราะห์

#### 3.3.2.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาของเยื่อเลือกผ่าน

1. ศึกษาลักษณะพื้นผิว นำเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้ทั้งหมดมาศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตัดตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้มีขนาด  $1 \text{ cm}^2$  นำไปวางบนที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample holder) แล้วเคลือบด้วยโลหะทองคำจากนั้นนำไปวิเคราะห์
2. ศึกษาลักษณะภาคตัดขวาง นำเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้ทั้งหมดมาศึกษาลักษณะภาคตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตัดตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 0.5 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร แล้วนำมาแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 20 นาที ทำการหักแล้วใส่ในเดซิเคเตอร์ นำไปวางบนที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample holder) แล้วเคลือบด้วยโลหะทองคำจากนั้นนำไปวิเคราะห์

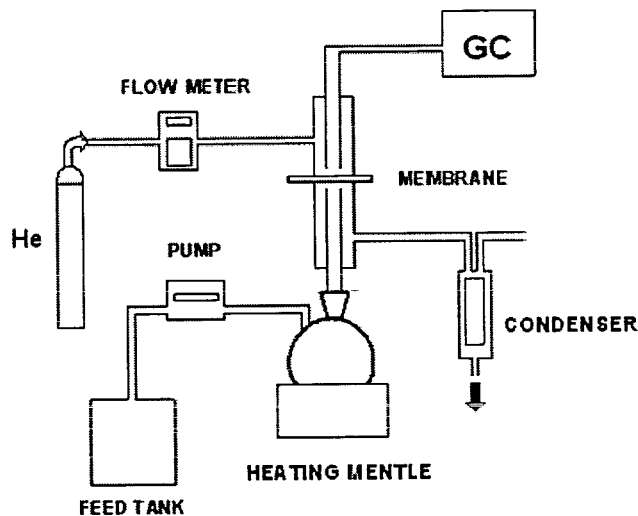
#### 3.3.2.3 วิเคราะห์หาปริมาณซีโอไลต์ในเยื่อเลือกผ่านด้วยเครื่อง TGA

นำเยื่อเลือกผ่านโคโตะซานที่เติมซีโอไลต์โซเดียมเอปริมาณ 0-50 phr มาตัดเป็นชิ้น เล็ก ๆ ใส่ลงในที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample holder) ปริมาณ 10-20 มิลลิกรัม ทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของอากาศแห้ง ใช้อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ 80-700 องศาเซลเซียส

### 3.3.3 ทดสอบประสิทธิภาพการแยกของเยื่อเลือกผ่าน

ทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการซึมผ่านไอดังชุด

ทดสอบในรูปที่ 3.1

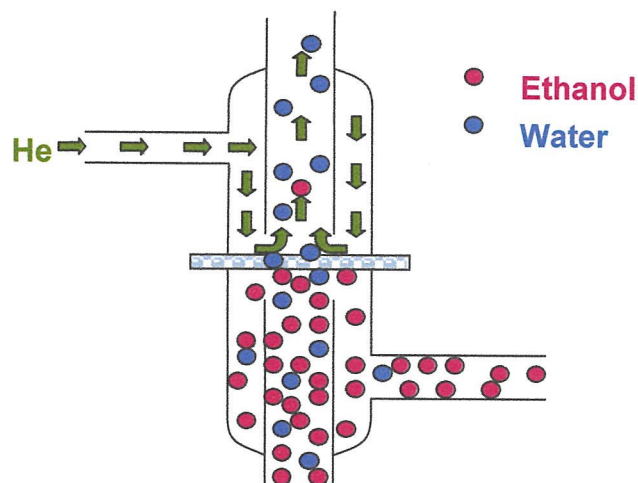


รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงชุดทดสอบกระบวนการซึมผ่านไอ

#### ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) บรรจุเอทานอล 96 % (v/v) ลงในขวดกั้นกลมจำนวน 100 มิลลิลิตร
- 2) นำเยื่อเลือกผ่านขนาด 4 × 4 ตารางเซนติเมตรบรรจุในเซลล์
- 3) ให้ความร้อนโดยใช้หลุมให้ความร้อนที่สเกลเบอร์ 4
- 4) เติมเอทานอล 96% (v/v) ลงในขวดกั้นกลมโดยใช้ปั๊มเพอร์ริสแตติกดูดเอทานอลจากขวดรูปชมพู่
- 5) เปิดวาล์วแก๊สฮีเลียมแล้วเปิดเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊สฮีเลียม
- 6) เมื่อเอทานอลเริ่มเดือดจะเกิดไอของสารผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำเคลื่อนที่ขึ้นมายังเยื่อเลือกผ่าน โดยสารบางส่วนที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านไปได้จะถูกพาเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ส่วนสารที่ไม่สามารถผ่านเยื่อเลือกผ่านได้จะถูกควบแน่นลงสู่ขวดวัดปริมาตรที่รองรับโดยแก๊สพา (รูปที่ 3.2)
- 7) ทำการทดสอบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

8) นำข้อมูลที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีมาทำการคำนวณต่อไป



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการแยกน้ำจากเอทานอลโดยกระบวนการซึมผ่านไอ

### 3.3.4 ปัจจัยที่ทำการศึกษา

- ผลของอัตราการไหลของแก๊สพาในช่วง 40-160 มิลลิลิตรต่อนาที
- สภาวะที่ใช้ในการเตรียมเยื่อเลือกผ่าน โดยศึกษาเยื่อเลือกผ่านที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบ
- ผลของปริมาณซีโอดีเอในปริมาณ 0-50 phr
- ชนิดของซีโอดีเอโดยศึกษาผลของซีโอดีเอเดี่ยวและซิลิกาไลต์จากห้องปฏิบัติการ
- ผลของขนาดอนุภาคซีโอดีเอเดี่ยว

### 3.3.5 การคำนวณ

คำนวณปริมาณสารที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านและค่าความสามารถในการแยกโดยใช้สูตร

$$\text{Flux}_{\text{water}} = \frac{W_{\text{Water}}}{A \cdot hr}$$

$$\text{Flux}_{\text{Ethanol}} = \frac{W_{\text{Ethanol}}}{A \cdot hr}$$

$$\text{Flux}_{\text{All}} = \text{Flux}_{\text{water}} + \text{Flux}_{\text{Ethanol}}$$

$$\begin{aligned}
 W_{\text{water}} &= \text{น้ำหนักของน้ำในเพอร์มิเอต (g)} \\
 W_{\text{ethanol}} &= \text{น้ำหนักของเอทานอลในเพอร์มิเอต (g)} \\
 A &= \text{พื้นที่หน้าตัดเยื่อเลือกผ่าน}
 \end{aligned}$$

$$\text{Separation factor } (\alpha) = \frac{(Y_{\text{Water}} / Y_{\text{Ethanol}})}{(X_{\text{Water}} / X_{\text{Ethanol}})}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{water}} &= \text{สัดส่วนโมลของน้ำในเพอร์มิเอต} \\
 Y_{\text{ethanol}} &= \text{สัดส่วนโมลของเอทานอลในเพอร์มิเอต} \\
 X_{\text{water}} &= \text{สัดส่วนโมลของน้ำในสารป้อน} \\
 X_{\text{ethanol}} &= \text{สัดส่วนโมลของเอทานอลในสารป้อน}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานและสภาวะการทดสอบ

ลำดับ	เยื่อเลือกผ่าน	ชนิดซีโอไลต์	ปริมาณซีโอไลต์ (phr)	สภาวะ	อัตราการไหลของซีลีียม (ml/min)
1	Chitosan	-	-	อบ	40
2	Chitosan	-	-	อบ	60
3	Chitosan	-	-	อบ	80
4	Chitosan	-	-	อบ	100
5	Chitosan	-	-	อบ	120
6	Chitosan	-	-	อบ	140
7	Chitosan	-	-	อบ	160
8	Chitosan	NaA	5	อบ	80
9	Chitosan	NaA	10	อบ	80
10	Chitosan	NaA	20	อบ	80
11	Chitosan	NaA	30	อบ	80
12	Chitosan	-	-	ไม่อบ	80
13	Chitosan	NaA	5	ไม่อบ	80
14	Chitosan	NaA	10	ไม่อบ	80
15	Chitosan	NaA	20	ไม่อบ	80
16	Chitosan	NaA	30	ไม่อบ	80
17	Chitosan	NaA	40	ไม่อบ	80
18	Chitosan	NaA	50	ไม่อบ	80
19	Chitosan	NaA (Syn)*	10	ไม่อบ	80
20	Chitosan	Silicalite	10	ไม่อบ	80

หมายเหตุ \* ซีโอไลต์โซเดียมเอทที่สังเคราะห์ขึ้นเอง

ในการทดลองนี้เพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจและการรายงานผลจึงขอใช้สัญลักษณ์แทนเยื่อเลือกผ่านแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สัญลักษณ์แทนเยื่อเลือกผ่านและแสดงองค์ประกอบของเยื่อเลือกผ่าน

สัญลักษณ์	ปริมาณไคโตซาน (phr)	ปริมาณซีโอไลต์ (phr)	ชนิดซีโอไลต์
CG	100	-	-
CGZ 5	100	5	NaA
CGZ 10	100	10	NaA
CGZ 20	100	20	NaA
CGZ 30	100	30	NaA
CGZ 40	100	40	NaA
CGZ 50	100	50	NaA
CGZ 10s	100	10	NaA(syn)*
CGS 10	100	10	Silicalite

หมายเหตุ \* ซีโอไลต์ชนิดนี้เองที่สังเคราะห์ขึ้นเอง

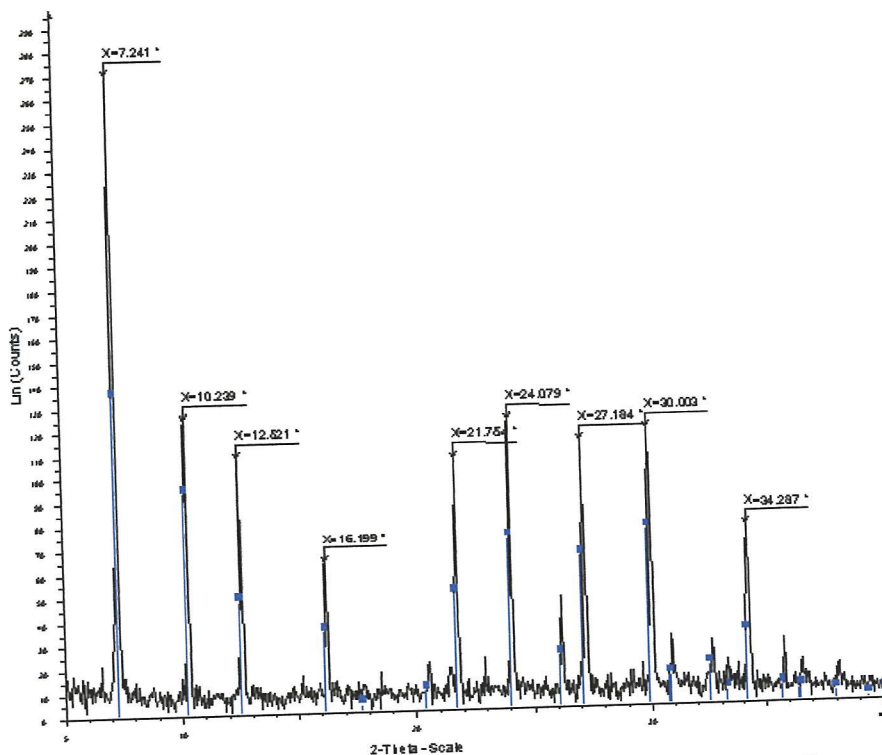
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

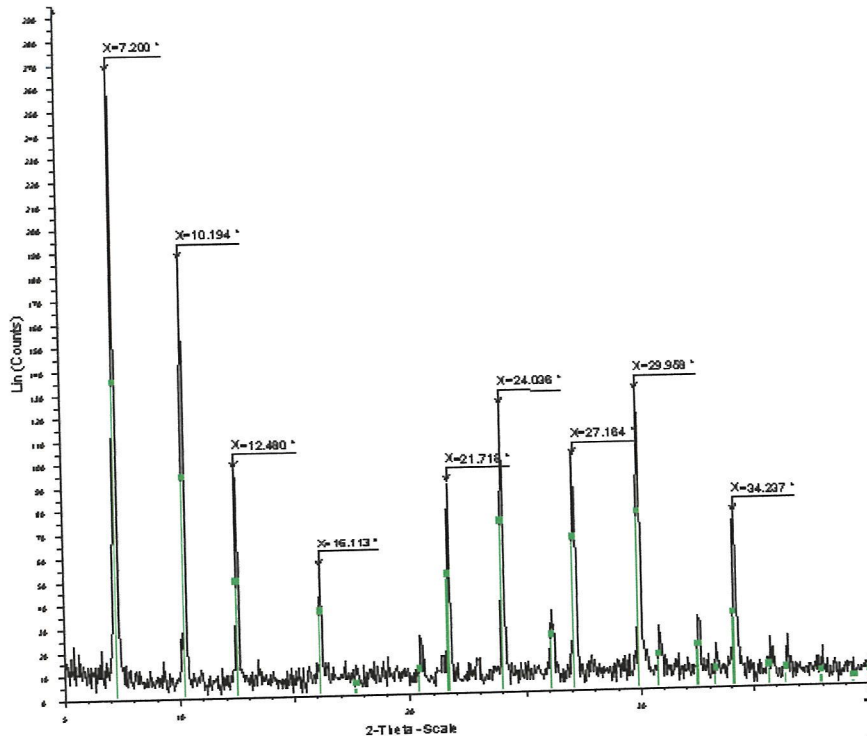
#### 4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซีโอไลต์โซเดียมเอและเยื่อเลือกผ่าน

##### 4.1.1 โครงสร้างผลึกซีโอไลต์โซเดียมเอ

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น (รูปที่ 4.1) พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ มีตำแหน่งของพีกที่เห็นได้ชัดที่ค่า  $2\theta$  ประมาณ  $10^\circ$   $13^\circ$   $16^\circ$   $22^\circ$   $24^\circ$   $27^\circ$   $30^\circ$  และ  $34^\circ$  ซึ่งมีตำแหน่งของพีกตรงกับสารมาตรฐาน Sodium Aluminum Silicate Hydrate Zeolite A จึงสรุปได้ว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นซีโอไลต์โซเดียมเอ



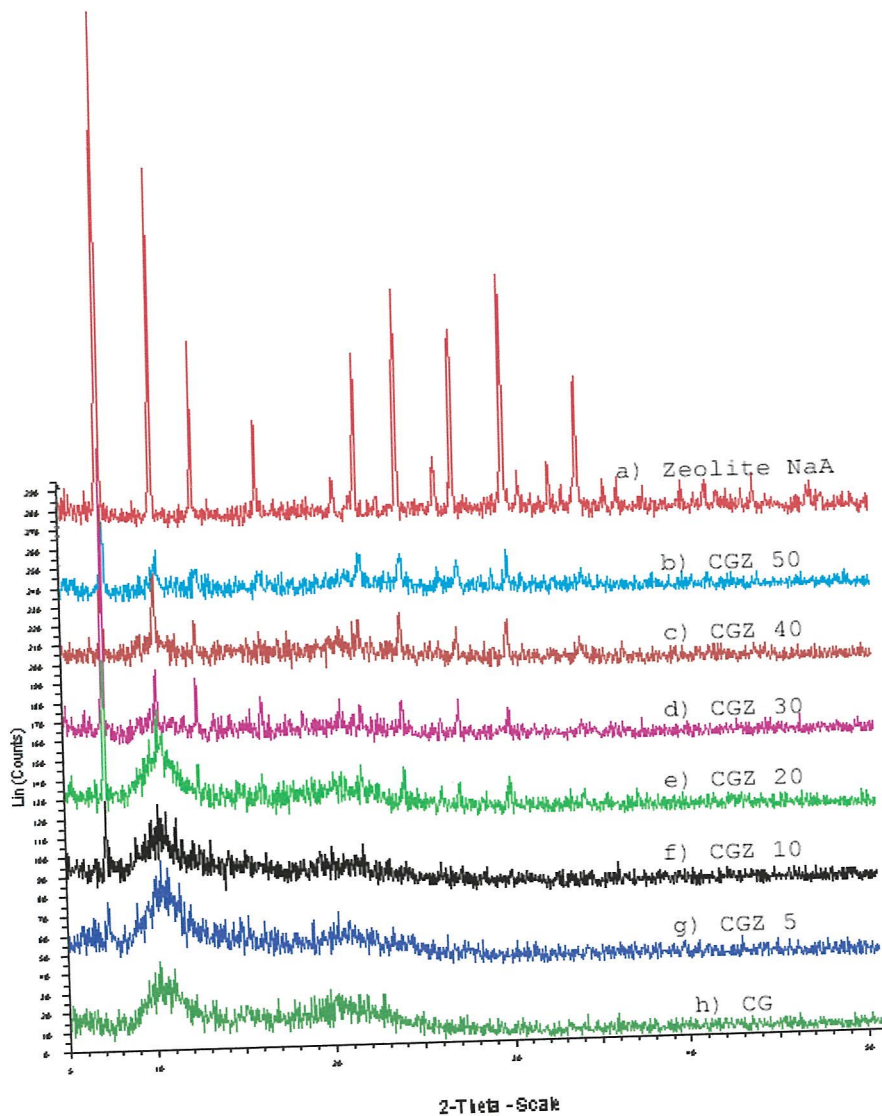
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์โซเดียมเอจากการสังเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐาน



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีโพลีไธโซเดียมเอเกรดการค้ำเทียบ  
กับสารมาตรฐาน

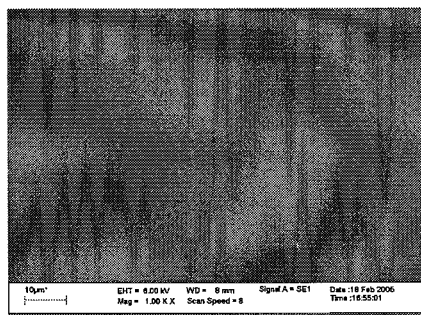
#### 4.1.2 โครงสร้างผลึกซีโพลีไธโซเดียมเอในเยื่อเลือกผ่าน

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีโพลีไธโซเดียมเอในเยื่อเลือกผ่าน เปรียบเทียบกับซีโพลีไธโซเดียมเอ (รูปที่ 4.3) พบว่าพีกมีตำแหน่งของพีกที่ค่า  $2\theta$  ประมาณ  $10^\circ$   $13^\circ$   $16^\circ$   $22^\circ$   $24^\circ$   $27^\circ$   $30^\circ$  และ  $34^\circ$  ซึ่งตรงกับตำแหน่งพีกของซีโพลีไธโซเดียมเอ แสดงให้เห็นว่าซีโพลีไธโซเดียมเอในเยื่อเลือกผ่านโคโตซานยังมีโครงสร้างผลึกที่เหมือนเดิม โดยความสูงของพีกที่ค่า  $2\theta$  ดังกล่าวจะสูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณซีโพลีไธโซเดียมเอในเยื่อเลือกผ่านโคโตซานมากขึ้น

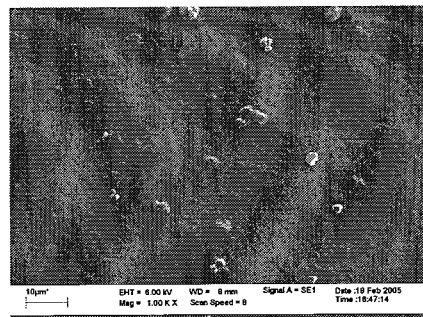


รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ a) ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) เกรดการค้า เปรียบเทียบกับเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่มีการเติมซีโอไลต์โซเดียมเอ b) 50 phr c) 40 phr d) 30 phr e) 20 phr f) 10 phr g) 5 phr h) 0 phr

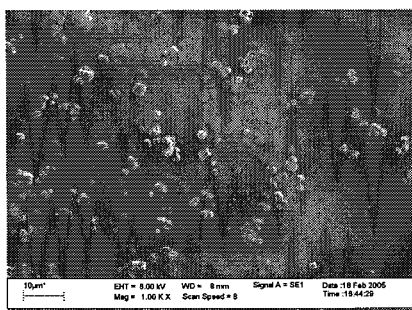




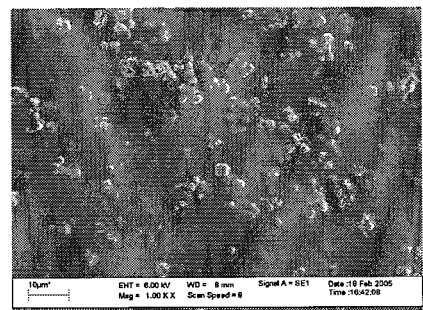
a) CG



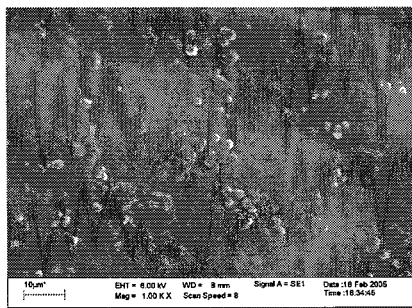
b) CGZ 5



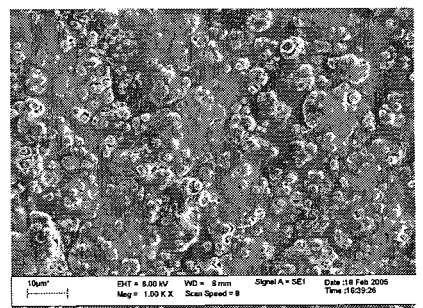
c) CGZ 10



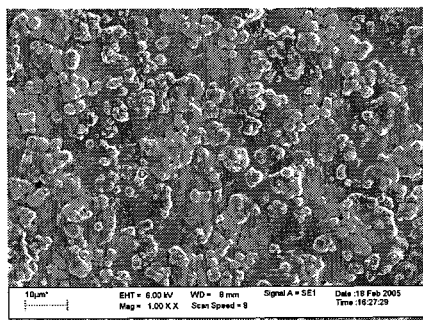
d) CGZ 20



e) CGZ 30

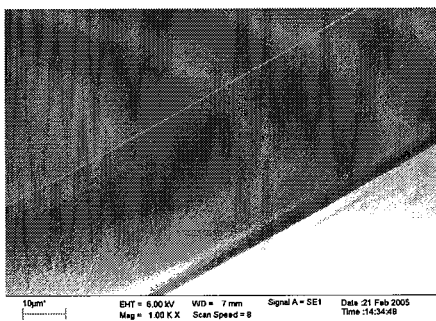


f) CGZ 40

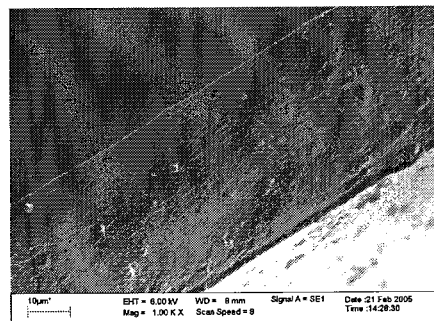


g) CGZ 50

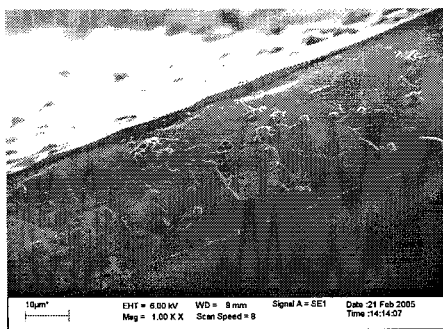
รูปที่ 4.4 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นผิว (Surface) ของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่เติม ซีโอไลต์โซเดียมเอ a) 0 phr b) 5 phr c) 10phr d) 20 phr e) 30 phr f) 40 phr g) 50 phr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



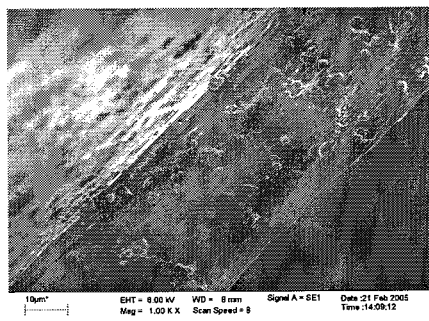
a) CG



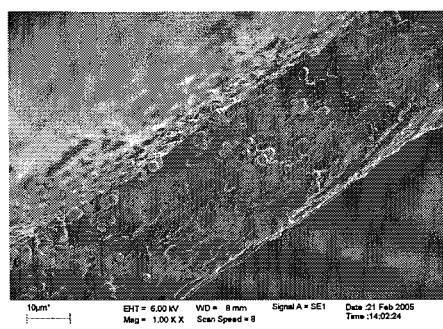
b) CGZ 5



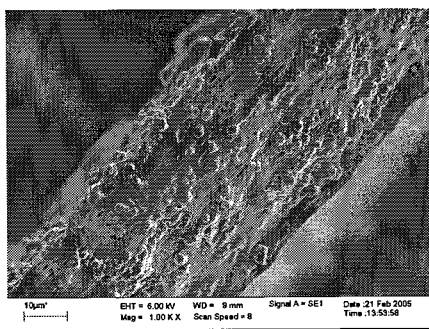
c) CGZ 10



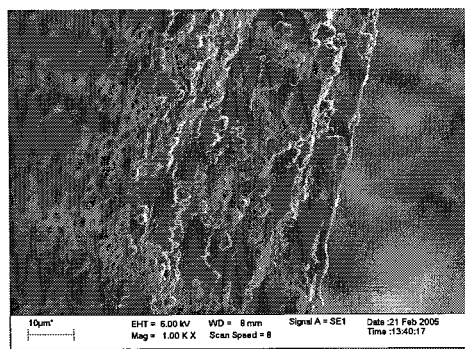
d) CGZ 20



e) CGZ 30



f) CGZ 40



g) CGZ 50

รูปที่ 4.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะภาคตัดขวาง (Cross section) ของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่มีการเติมซีโอโลดซีไคเดิมมเอ a) 0 phr b) 5 phr c) 10 phr d) 20 phr e) 30 phr f) 40 phr g) 50 phr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

#### 4.1.4 ปริมาณซีโอไลต์ในเยื่อเลือกผ่าน

ขั้นตอนการเตรียมเยื่อเลือกผ่านมีการผสมซีโอไลต์โซเดียมเอลงในสารละลายไคโตซาน โดยสามารถวิเคราะห์หาปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงในเยื่อเลือกผ่านไคโตซานได้โดยใช้ เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน TGA ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1

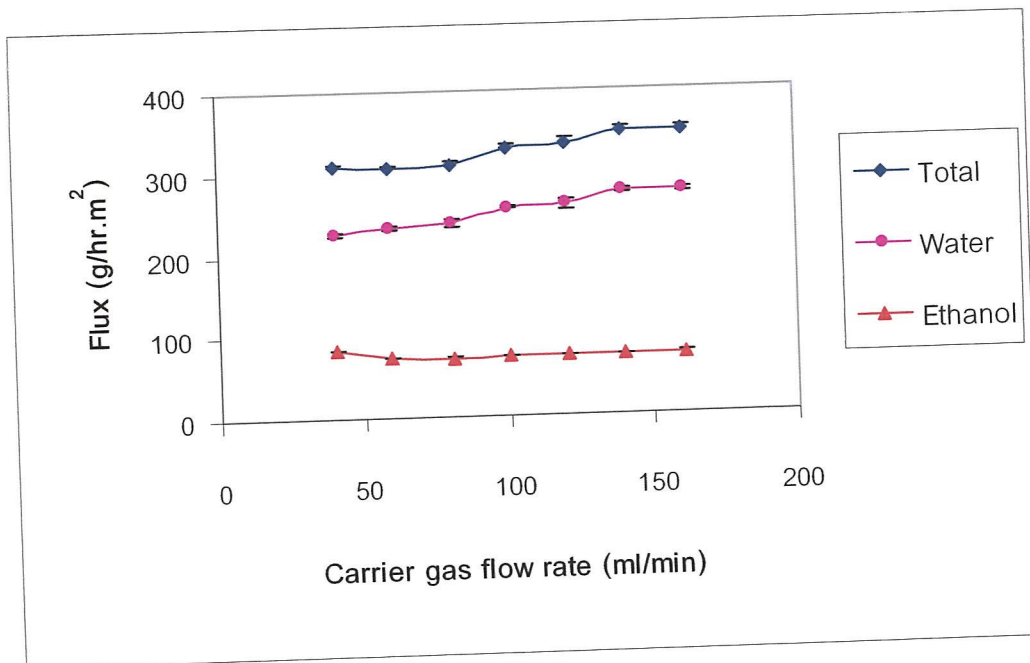
ตารางที่ 4.1 ปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่เติมและที่มีอยู่จริงจากเทคนิค TGA

เยื่อเลือกผ่าน	ซีโอไลต์ที่เติม		ซีโอไลต์จาก เทคนิค TGA (%wt)
	phr	%wt	
CG	-	-	-
CGZ 5	5	4.76	*2.54
CGZ 10	10	9.09	5.79
CGZ 20	20	16.67	11.43
CGZ 30	30	23.08	17.37
CGZ 40	40	28.57	21.05
CGZ 50	50	33.33	25.79

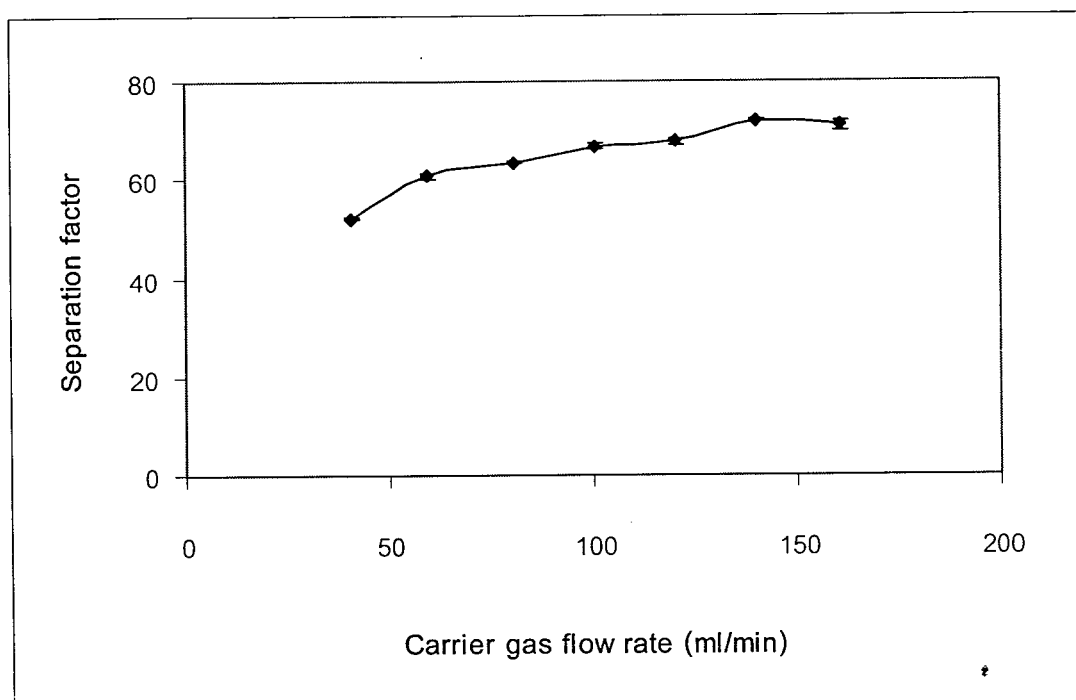
จากการทดลองพบว่าปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีอยู่จริงในเยื่อเลือกผ่านมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากซีโอไลต์โซเดียมเอมีน้ำอยู่ในรูพรุนประมาณ 20-30 % ของน้ำหนักซีโอไลต์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ทำให้น้ำในรูพรุนระเหยออกไป ดังนั้นน้ำหนักที่วิเคราะห์ได้จึงน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้

#### 4.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สพา (Carrier gas)

เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สพา มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกของเยื่อเลือกผ่าน จึงมีการศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สพาเพื่อที่จะหาสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบ โดยใช้เยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่ไม่ได้ผสมซีโอไลต์ (CG) (ความหนา  $30 \pm 2$  ไมโครเมตร) จากการทดลองหาค่าความสามารถในการแยก (Separation factor) ค่าฟลักซ์ของน้ำ เอทานอล และฟลักซ์ของสารโดยรวมเทียบกับอัตราการไหลของแก๊สพา สามารถแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สพา กับค่าฟลักซ์



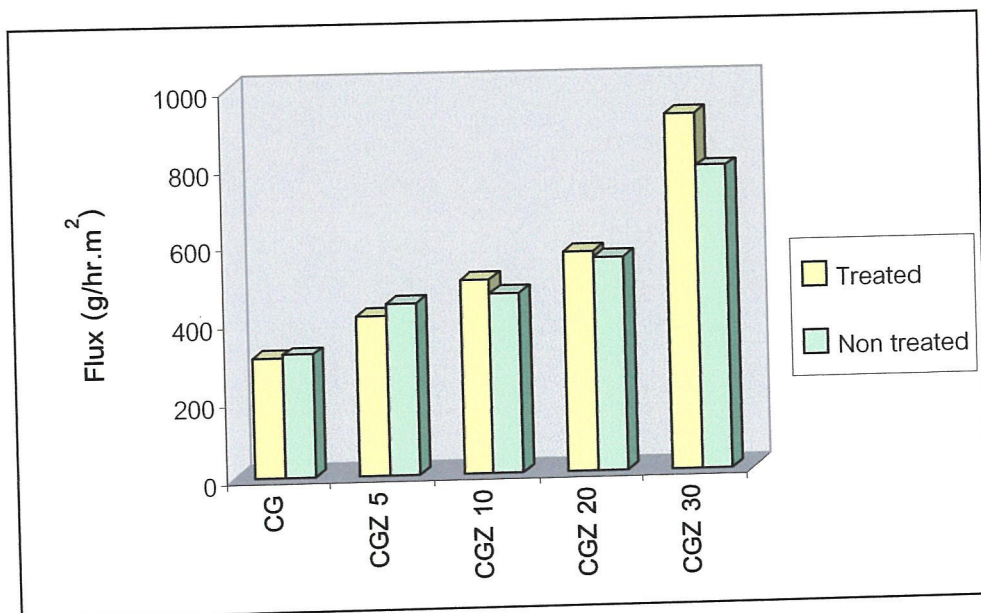
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สฮีเลียมกับค่าความสามารถในการแยก

จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สพาในช่วง 40-160 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าค่าฟลักซ์มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สพาทำให้ความดันย่อย (Partial pressure) ของเพอร์มิเอต (Permeate) มีค่าต่ำลงจึงเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ทำให้สารเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านออกมาได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สพาทำให้ค่าความสามารถในการแยกของเยื่อเลือกผ่านมีค่าสูงขึ้นด้วย เพราะค่าฟลักซ์ของน้ำสูงขึ้น ในขณะที่ค่าฟลักซ์ของเอทานอลไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

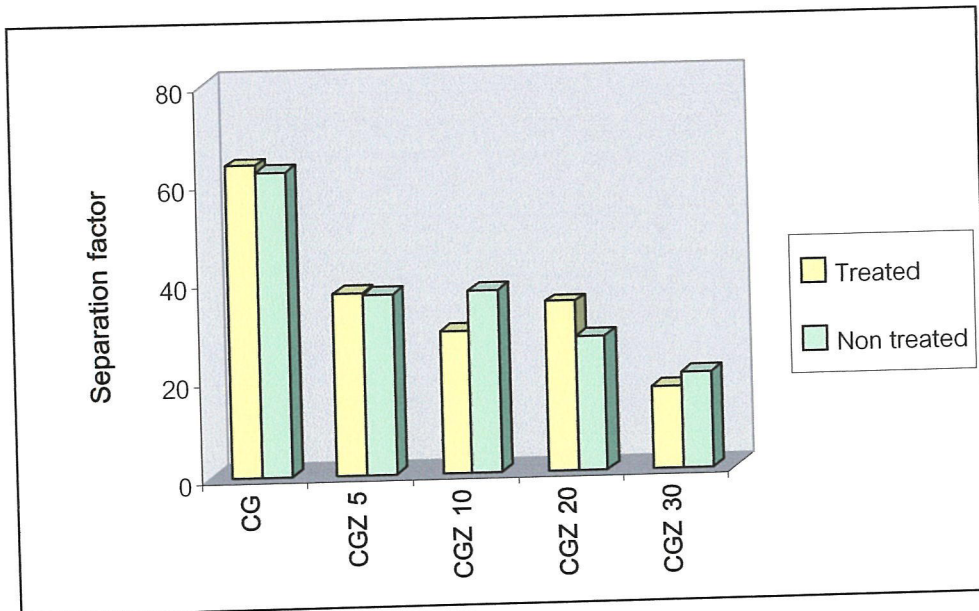
ในการทดลองนี้พบว่าถ้าใช้อัตราการไหลของแก๊สพาต่ำกว่า 40 มิลลิลิตรต่อนาที จะเกิดการควบแน่นของสารที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านออกมา (Permeate) ทำให้ผลของการวิเคราะห์ผิดพลาด ดังนั้นในการศึกษาถึงปัจจัยอื่นๆ จึงต้องเลือกอัตราการไหลของแก๊สพาคงที่ที่ค่าหนึ่งค่าใดก็ได้ ในช่วง 40-160 ml/min ซึ่งในการทดลองนี้ได้เลือกใช้อัตราการไหลของแก๊สพาที่ 80 มิลลิลิตรต่อ นาที

### 4.3 ผลของสภาวะการเตรียมเยื่อเลือกผ่าน

หลังจากการเชื่อมโยงและทำให้เยื่อเลือกผ่านเป็นกลางแล้ว เยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้จะถูกนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น ทำให้โมเลกุลของโคโคซานบางส่วนที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำจึงเกิดการบวมตัว (Swelling) แต่เมื่ออบเยื่อเลือกผ่านแล้วโคโคซานจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ขึ้นมาแทน ซึ่งอาจทำให้การบวมตัวด้วยน้ำของเยื่อเลือกผ่านลดลงและมีผลต่อการแยกได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของการอบเยื่อเลือกผ่านที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก โดยเยื่อเลือกผ่านที่นำมาทดสอบเป็นเยื่อเลือกผ่านโคโคซานที่มีการเติมซีโอไลต์ซีเดียม-เอ ปริมาณ 0-30 phr



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับปริมาณซีโอไลต์ของเยื่อเลือกผ่านโคโคซานที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบ (อัตราการไหลแก๊สพา 80 ml/min)

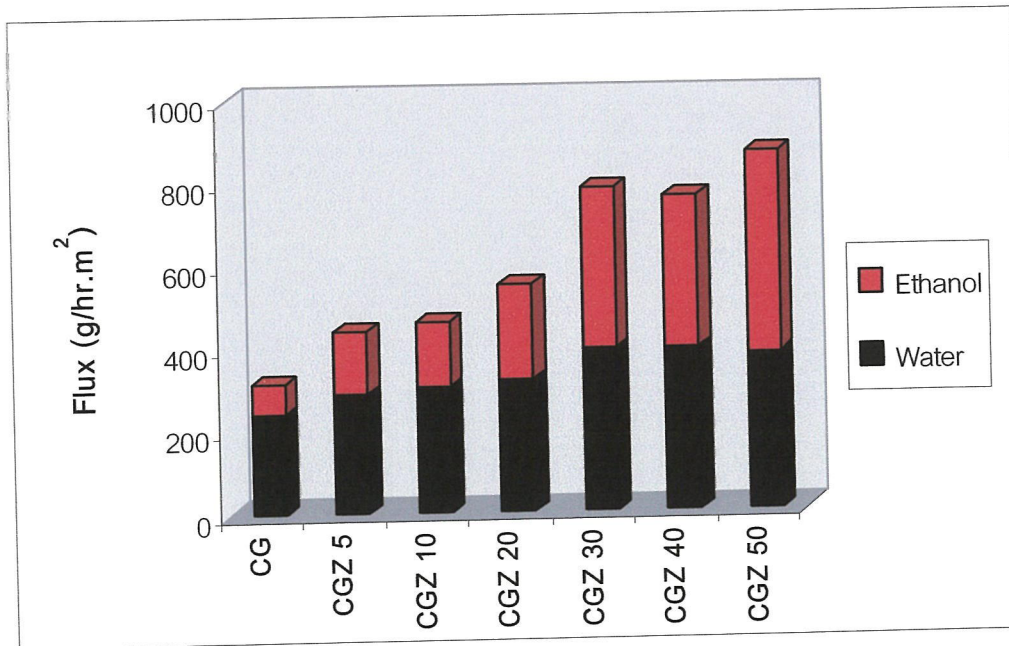


**รูปที่ 4.9** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการแยกกับปริมาณซีไอไลต์ของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบ (อัตราการไหลแก๊สพา 80 ml/min)

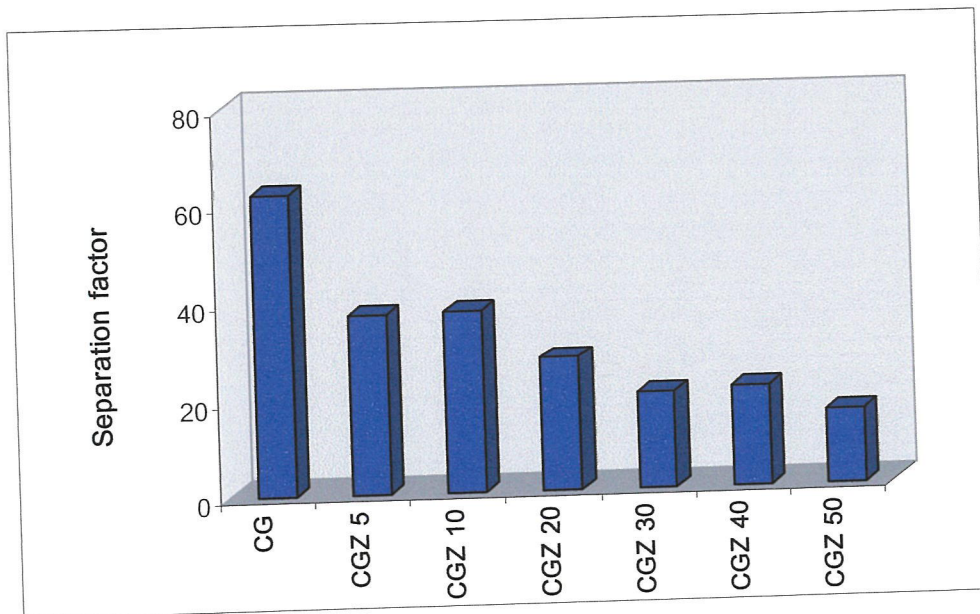
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าค่าฟลักซ์และค่าความสามารถในการแยกของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการอบเยื่อเลือกผ่านไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก เนื่องจากเยื่อเลือกผ่านที่ผ่านการอบสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนแบบผันกลับ (Reversible) กับโมเลกุลของน้ำเมื่อแช่อยู่ในสารละลายเอทานอลทำให้เกิดการบวมตัวได้เหมือนกับเยื่อเลือกผ่านที่ไม่ผ่านการอบ

#### 4.4 ผลของปริมาณซีไอไลต์โซเดียมเอ

จากการศึกษาผลของปริมาณซีไอไลต์โซเดียมเอที่เติมลงในเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยกของเยื่อเลือกผ่าน โดยวัดจากค่าฟลักซ์และค่าความสามารถในการแยก ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์กับปริมาณซีโอดี (อัตราการไหลแก๊สพา 80 ml/min)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการแยกกับปริมาณซีโอดี (อัตราการไหลแก๊สพา 80 ml/min)

จากผลการทดลองพบว่า เยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่ไม่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ (CG) มีค่าฟลักซ์ที่ต่ำ เนื่องจากเยื่อเลือกผ่านไคโตซานเป็นเยื่อเลือกผ่านเนื้อแน่น (Dense membrane) ทำให้มีปริมาณสารที่สามารถผ่านเยื่อเลือกผ่านได้น้อย แต่เมื่อผสมซีโอไลต์โซเดียมเอลงไป พบว่าค่าฟลักซ์มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อเติมซีโอไลต์โซเดียมเอจะทำให้เยื่อเลือกผ่านไคโตซานเป็นเยื่อเลือกผ่านแบบมีรูพรุน (Porous membrane) มากขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าฟลักซ์ของเอทานอลสูงกว่าค่าฟลักซ์ของน้ำ เพราะเกิดช่องว่างระหว่างวัฏภาคของซีโอไลต์โซเดียมเอกับเยื่อเลือกผ่านไคโตซาน เอทานอลสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างโดยไม่เกิดกลไกการแยก มีผลทำให้ค่าความสามารถในการแยกลดลง จากการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการแยกของเยื่อเลือกผ่านนอกจากไคโตซานและซีโอไลต์โซเดียมเอแล้ว รูพรุนหรือช่องว่างระหว่างวัฏภาคที่เกิดขึ้นยังมีผลต่อการแยกของเยื่อเลือกผ่านอีกด้วย

#### 4.5 ผลของชนิดซีโอไลต์

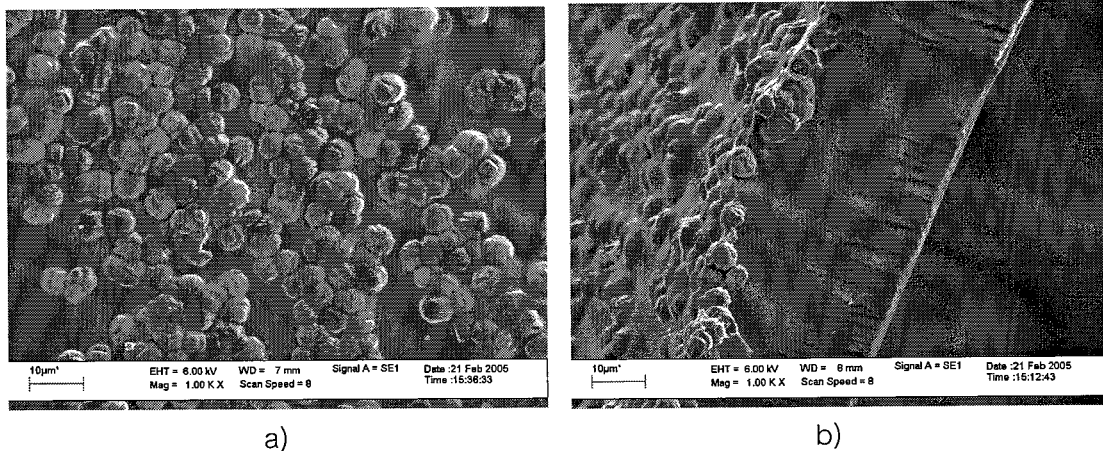
การศึกษาผลของชนิดซีโอไลต์โดยใช้ซีโอไลต์ 2 ชนิดคือ ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) ที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และซิลิกาไลต์ (Silicalite) ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยเติมลงในเยื่อเลือกผ่านปริมาณ 10 phr แล้วนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการแยกดังผลในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการแยกของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอกับซิลิกาไลต์

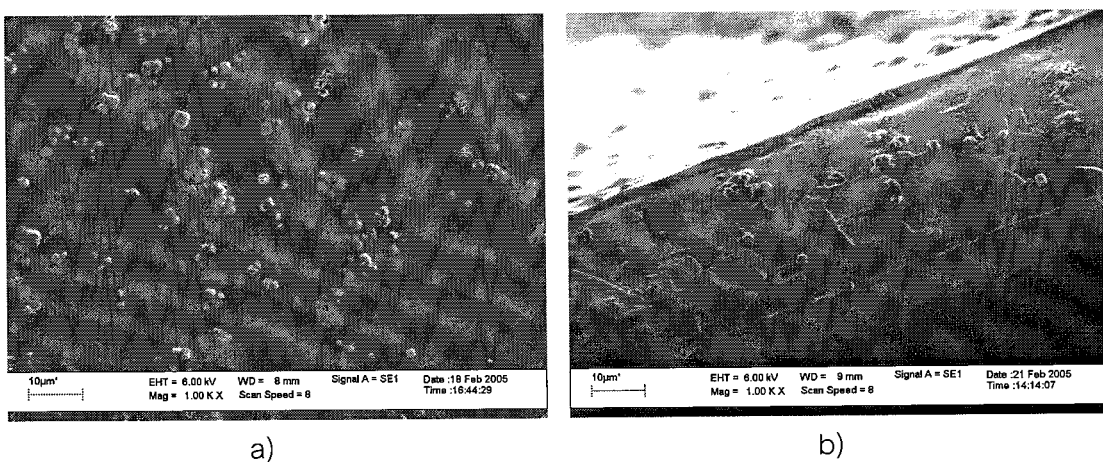
เยื่อเลือกผ่าน	ซีโอไลต์	$\alpha_{\text{น้ำ/เอทานอล}}$	ฟลักซ์ (g/hr.m <sup>2</sup> )		
			น้ำ	เอทานอล	รวม
CGZ 10	โซเดียมเอ	37.2	305.2	157.4	462.6
CGS 10	ซิลิกาไลต์	39.1	247.6	121.4	369.0

จากผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์น้ำและเอทานอลของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่เติมซีโอไลต์โซเดียมเอมีค่าสูงกว่าเยื่อเลือกผ่านที่เติมซิลิกาไลต์ โดยค่าฟลักซ์ของน้ำสูงขึ้นเนื่องจากซีโอไลต์โซเดียมเอมีความสามารถดูดซับน้ำได้ดี แต่ค่าฟลักซ์ของเอทานอลสูงขึ้นเนื่องจากมีรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างวัฏภาคเกิดขึ้น ส่วนค่าความสามารถในการแยกของเยื่อเลือกผ่านไคโตซาน

ที่เติมซิลิกาไลต์มีค่าสูงกว่าเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่เติมซีโอไลต์โซเดียมเอเล็กน้อย เนื่องจากซิลิกาไลต์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงเกิดการรวมกลุ่ม ไม่กระจายตัวในเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ดังรูปที่ 4.12 ทำให้เกิดรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างซิลิกาไลต์กับไคโตซานได้น้อย การแพร่จึงเกิดผ่านชั้นไคโตซานเป็นหลัก ดังนั้นผลการเติมซิลิกาไลต์ต่อการแยกจึงไม่สามารถประเมินได้



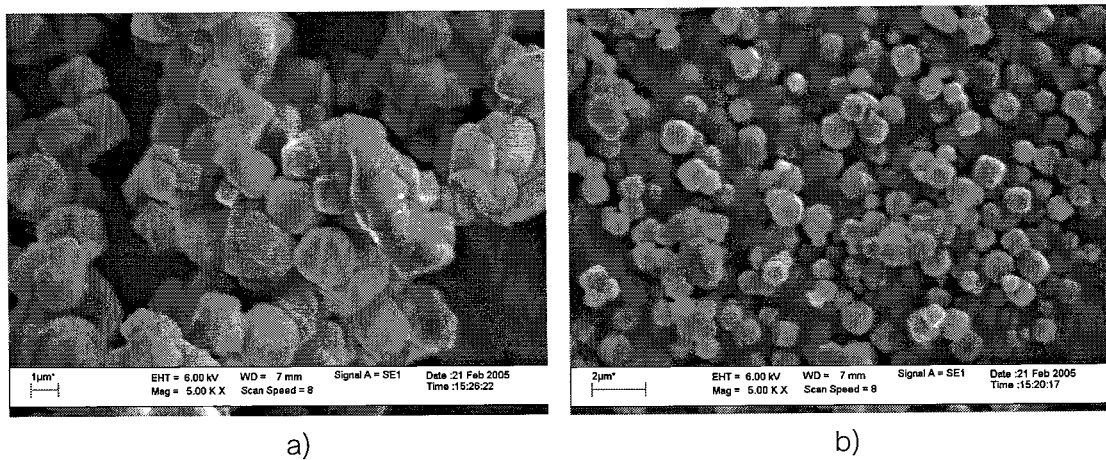
รูปที่ 4.12 ภาพ SEM แสดงลักษณะ a) พื้นผิวและ b) ภาคตัดขวางของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่เติมซิลิกาไลต์



รูปที่ 4.13 ภาพ SEM แสดงลักษณะ a) พื้นผิวและ b) ภาคตัดขวางของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่เติมซีโอไลต์โซเดียมเอ

#### 4.6 ผลของขนาดอนุภาคซีโอไลต์

จากการศึกษาพบว่าการแพร่เกิดขึ้นผ่านช่องว่างระหว่างภูมิภาคของซีโอไลต์กับเยื่อเลือกผ่านไคโตซาน ซึ่งขนาดของอนุภาคมีผลต่อขนาดช่องว่างระหว่างภูมิภาคที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีขนาดอนุภาคเล็ก แล้วนำมาผสมในเยื่อเลือกผ่านไคโตซานเพื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลต์โซเดียมเอเกรดการค้าที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3

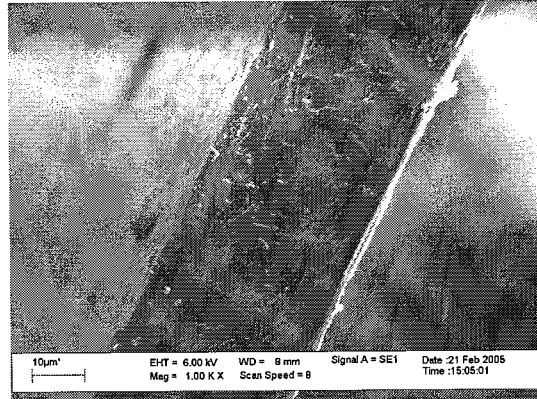
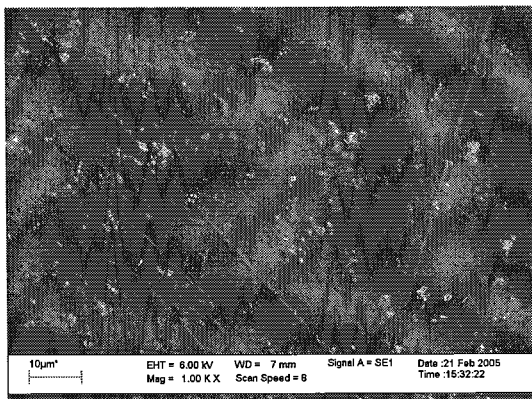


รูปที่ 4.14 ภาพ SEM แสดงอนุภาคของซีโอไลต์โซเดียมเอ a) เกรดการค้า b) จากการสังเคราะห์

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการแยกของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่ผสมซีโอไลต์โซเดียมเอเกรดการค้าและจากการสังเคราะห์

เยื่อเลือกผ่าน	$\alpha_{\text{น้ำ/เอทานอล}}$	ฟลักซ์ (g/hr.m <sup>2</sup> )		
		น้ำ	เอทานอล	รวม
CGZ 10	37.2	305.2	157.4	462.6
CGZ 10s	47.1	427.2	174.2	601.5

จากผลการทดลองพบว่าเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่ผสมซีโอโลต์โซเดียมเอขนาดเล็กมีค่าฟลักซ์และค่าความสามารถในการแยกที่สูงกว่าเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่ผสมซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีขนาดเล็ก มีการกระจายตัวที่ดี เกิดช่องว่างระหว่างภูมิภาคซีโอโลต์กับไคโตซานขนาดเล็กจำนวนมากจึงทำให้มีค่าฟลักซ์สูง และทำให้น้ำเกิดอันตรกิริยากับไคโตซานและซีโอโลต์โซเดียมเอได้มากกว่าช่องว่างระหว่างภูมิภาคที่มีขนาดใหญ่ น้ำจึงแพร่ผ่านช่องว่างระหว่างภูมิภาคได้สูงขึ้น ทำให้ค่าความสามารถในการแยกของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่เติมซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีขนาดเล็กมีค่าสูงกว่าเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่เติมซีโอโลต์โซเดียมเอที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.15 ภาพ SEM แสดงลักษณะ a) พื้นผิวและ b) ภาคตัดขวางของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานที่เติมซีโอโลต์โซเดียมเอจากการสังเคราะห์

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติโคโตซานเพื่อใช้ในการแยกน้ำจากเอทานอลด้วยการเติมซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite NaA) โดยทำการเตรียมเยื่อเลือกผ่านโคโตซานผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ พิสูจน์เอกลักษณ์ของเยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้ ศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สพาและสภาวะในการเตรียมเยื่อเลือกผ่านที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบ ศึกษาผลของปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีผลต่อเยื่อเลือกผ่านและศึกษาผลของชนิดและขนาดอนุภาคของซีโอไลต์ จากการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

เยื่อเลือกผ่านโคโตซานที่ไม่เติมซีโอไลต์มีพื้นผิวและภาคตัดขวางที่เรียบ เมื่อเติมซีโอไลต์พื้นผิวและภาคตัดขวางมีความขรุขระมากขึ้นเนื่องจากซีโอไลต์โซเดียมเอมีการกระจายตัวในเยื่อเลือกผ่านโคโตซานได้ดีเพราะมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่เหมือนกัน ส่วนซิลิกาไลต์มีการกระจายตัวในเยื่อเลือกผ่านโคโตซานไม่ดีเนื่องจากซิลิกาไลต์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) การศึกษาโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์โซเดียมเอในเยื่อเลือกผ่าน พบว่าซีโอไลต์โซเดียมเอในเยื่อเลือกผ่านมีโครงสร้างเหมือนเดิม และปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอที่อยู่ในเยื่อเลือกผ่านมีปริมาณใกล้เคียงกับที่เติมลงไป

จากผลของอัตราการไหลของแก๊สพา (Carrier gas) พบว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สพาสูงขึ้นทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความดันย่อย (Partial pressure) ของเพอร์มิเอต (Permeate) มีค่าต่ำลง ดังนั้นจึงมีปริมาณสารเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านออกมาได้เพิ่มขึ้น ส่วนความสามารถในการแยกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีสัดส่วนของน้ำในเพอร์มิเอตสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สพา จากการศึกษาสภาวะในการเตรียมเยื่อเลือกผ่าน พบว่าเยื่อเลือกผ่านที่ผ่านการอบและไม่ผ่านการอบมีประสิทธิภาพการแยกไม่ต่างกันเนื่องจากมีการบวมตัว (Swelling) ของเยื่อเลือกผ่านเมื่ออยู่ในสารละลายเอทานอลได้เช่นกัน ผลของปริมาณการเติมซีโอไลต์โซเดียมเอในช่วง 0-50 phr พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอ ทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำและเอทานอลสูงขึ้น โดยค่าฟลักซ์ของน้ำสูงขึ้นเนื่องจากซีโอไลต์โซเดียมเอสามารถดูดซับน้ำได้ดี ค่าฟลักซ์ของเอทานอลสูงขึ้นเนื่องจากเกิดรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างวัฏภาคจำนวนมากทำให้การเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ของเอทานอลมีค่าสูงกว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำ ทำให้ค่าความสามารถในการแยกมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์โซเดียมเอ ผลการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ซีโอไลต์โซเดียมเอกับซิลิกาไลต์ พบว่าค่าความสามารถในการแยกของเยื่อเลือกผ่านที่เติมซิลิกาไลต์มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย

เนื่องจากซิลิกาไลต์มีการกระจายตัวที่ไม่ดี ทำให้การแยกเกิดขึ้นในเยื่อเลือกผ่านเนื้อแน่น (Dense membrane) แต่เยื่อเลือกผ่านที่เติมซีโอไลต์โซเดียมเอให้ค่าฟลักซ์ที่สูงกว่า เนื่องจากซีโอไลต์โซเดียมเอมีการกระจายตัวที่ดีทำให้มีช่องว่างระหว่างวฏภาคมาก นอกจากนั้นซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีประสิทธิภาพการแยกที่สูงกว่าเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีการกระจายตัวที่ดี มีช่องว่างระหว่างวฏภาคขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้น้ำเกิดอันตรกิริยากับโคโคซานและซีโอไลต์โซเดียมเอได้มากขึ้น น้ำจึงแพร่ผ่านช่องว่างได้ดีขึ้น ค่าความสามารถในการแยกจึงสูงขึ้น

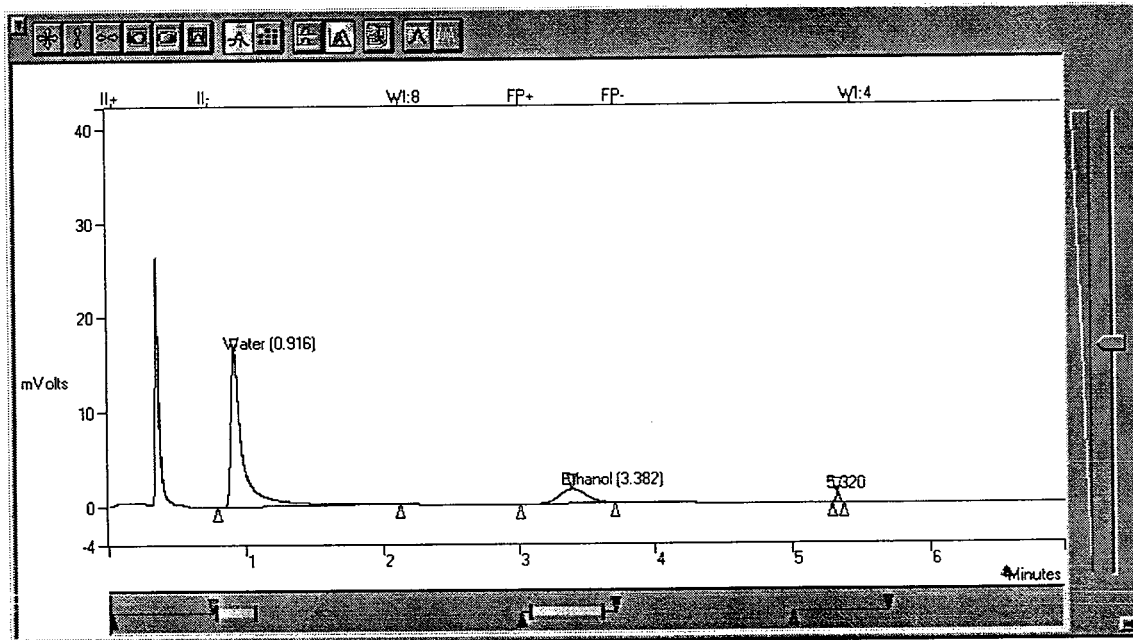
### ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาพบว่า ซีโอไลต์โซเดียมเอที่มีขนาดเล็กทำให้ประสิทธิภาพในการแยกของเยื่อเลือกผ่านสูงขึ้น ดังนั้นควรสังเคราะห์ซีโอไลต์โซเดียมเอขนาดอนุภาคระดับนาโนแล้วนำไปผสมในเยื่อเลือกผ่านโคโคซานเพื่อทดสอบการแยกต่อไป
2. เยื่อเลือกผ่านที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีความแข็งแรงระดับหนึ่ง แต่ไม่มีความแข็งแรงสำหรับระบบที่มีความแตกต่างของความดันสูง เช่น ระบบเพอร์แวกเพอเรชัน จึงควรเตรียมเยื่อเลือกผ่านโคโคซานบนตัวรองรับ (Support)

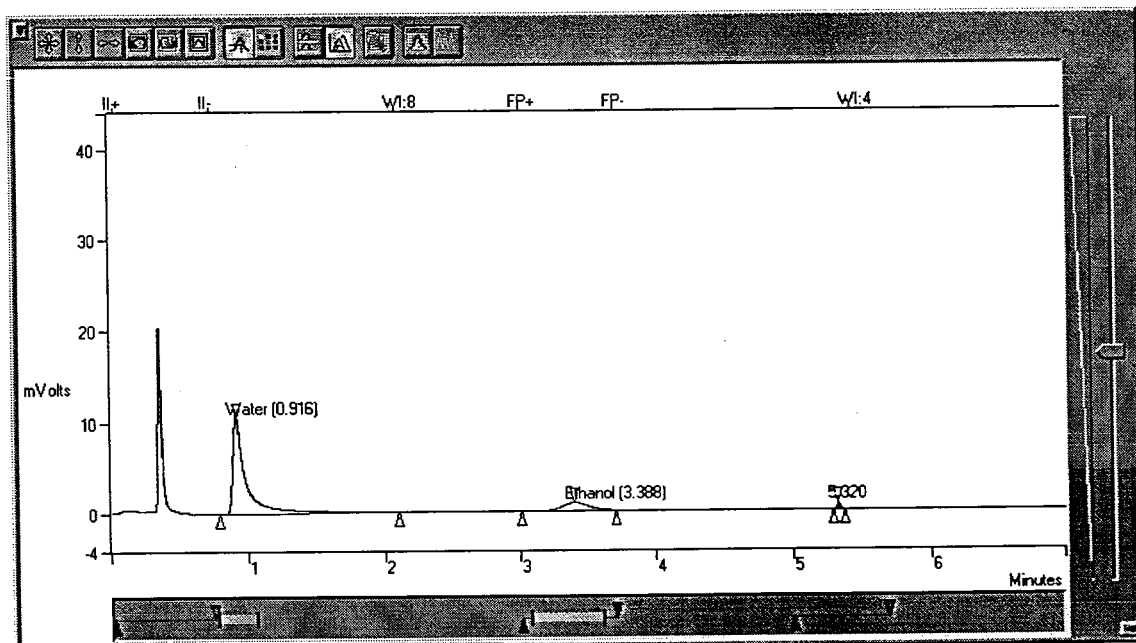
## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชันทอง สุนทรภา. 2547. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. หน้า 2-19. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] R.W. Baker. *Membrane Technology and Applications*. PP. 1-14. John Wiley & sons, Ltd.
- [3] [http://www.gewater.com/library/tp/1159\\_produced\\_Water.jsp](http://www.gewater.com/library/tp/1159_produced_Water.jsp)
- [4] ภาวดี เมธะคานนท์ อศิรา เฟื่องฟูชาติ และก่องเกียรติ คงสุวรรณ. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไคติน-ไคโตซาน**. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ หน้า 1-7.
- [5] <http://ww.kitosato-u.ac.jp/l31/chitin/chitin.html>
- [6] <http://www.chemistry.ohio-state.edu/structures.htm>
- [7] <http://zeolites.ethz.ch/cgi-bin/collection1.py>
- [8] <http://sogang.ac.kr/~zeolite/egall2.htm>
- [9] Y.M. Lee, S.Y. Num and D. J. Woo. 1997. Pervaporation of Ionically Surface Crosslinked Chitosan Composite Membranes for Water-Alcohol Mixtures. *Journal of Membrane Science*. vol. 133: 103-110.
- [10] X.P. Wang, Z.Q. Shen, F.Y. Zhang and Y.F. Zhang. 1996. A Novel Composite Chitosan Membrane for the Separation of Alcohol-Water Mixtures. *Journal of Membrane Science*. vol. 119: 191-198.
- [11] J.H. Kim, J.Y. Kim, Y.M. Lee and K.Y. Kim. 1992. Properties and Swelling Characteristics of Cross-linked Poly(vinyl alcohol)/ Chitosan Blend Membrane. *Journal of Applied Polymer Science*. vol. 45: 1711-1717.
- [12] T. Uragami, Y. Tanaka and S. Nishida. 2002. Permeation and Separation Under High Temperature and High Pressure for Ethanol/Water Vapors Through Cross-linked Quaternized Chitosan Composite Membranes. *Desalination*. vol. 147: 449-454.

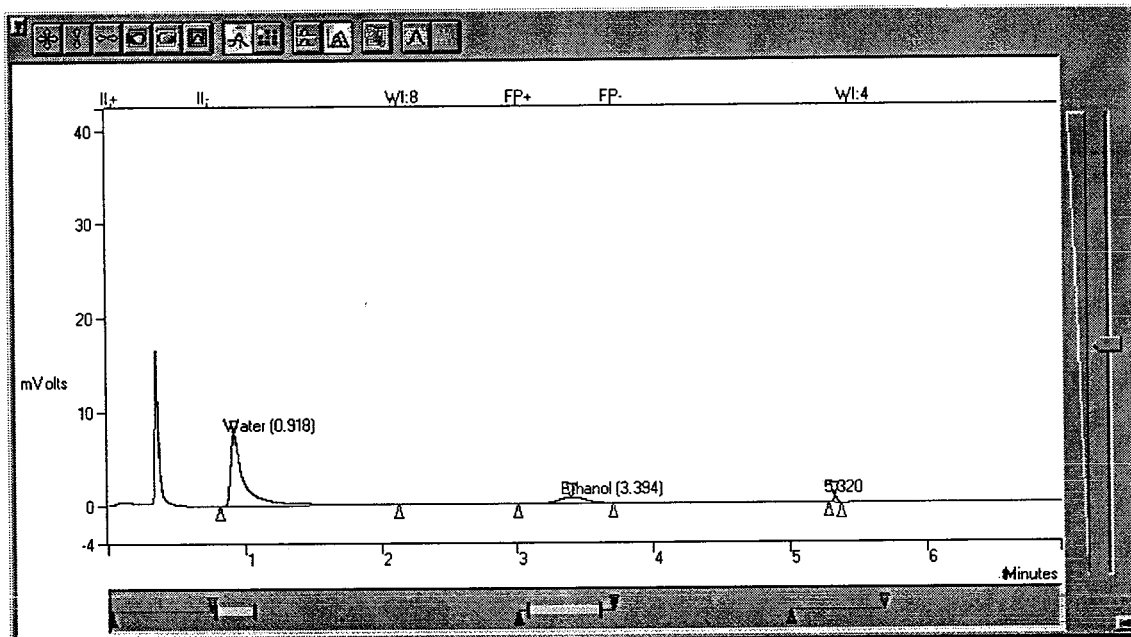
ภาคผนวก ก  
โครมาโทแกรม



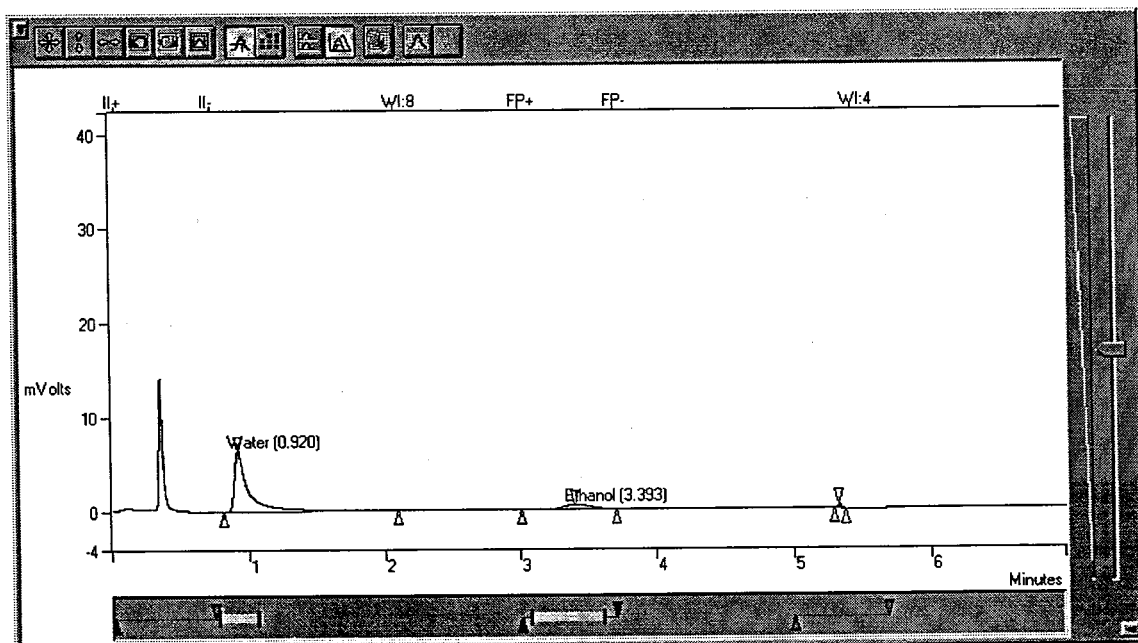
รูปที่ ก.1 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่อัตราการไหลแก๊สพา 40 ml/min



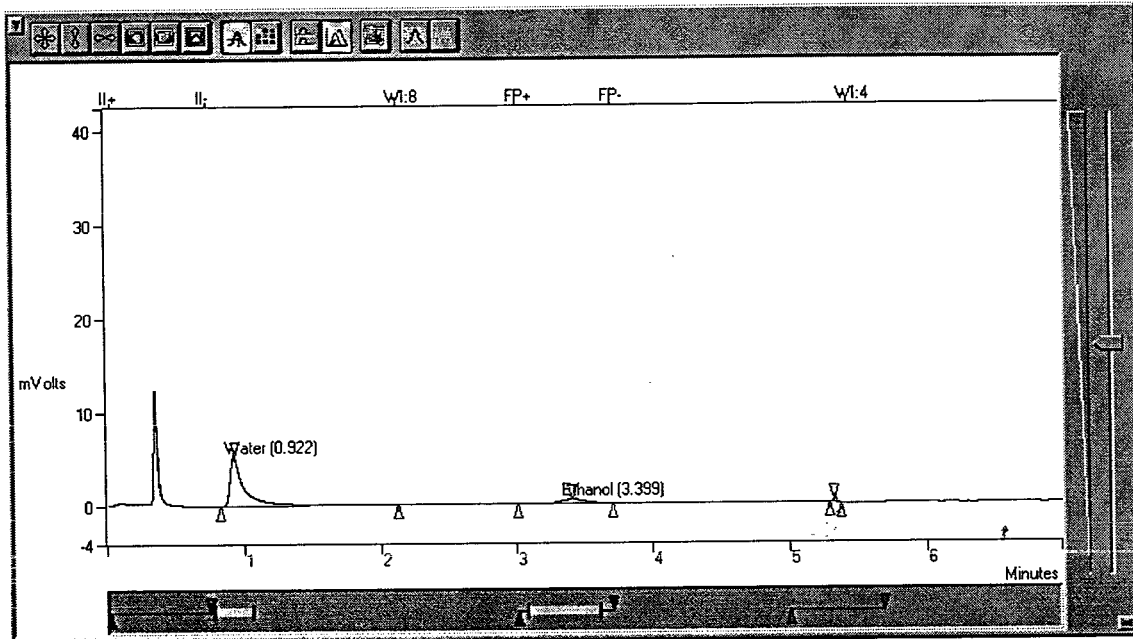
รูปที่ ก.2 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่อัตราการไหลแก๊สพา 60 ml/min



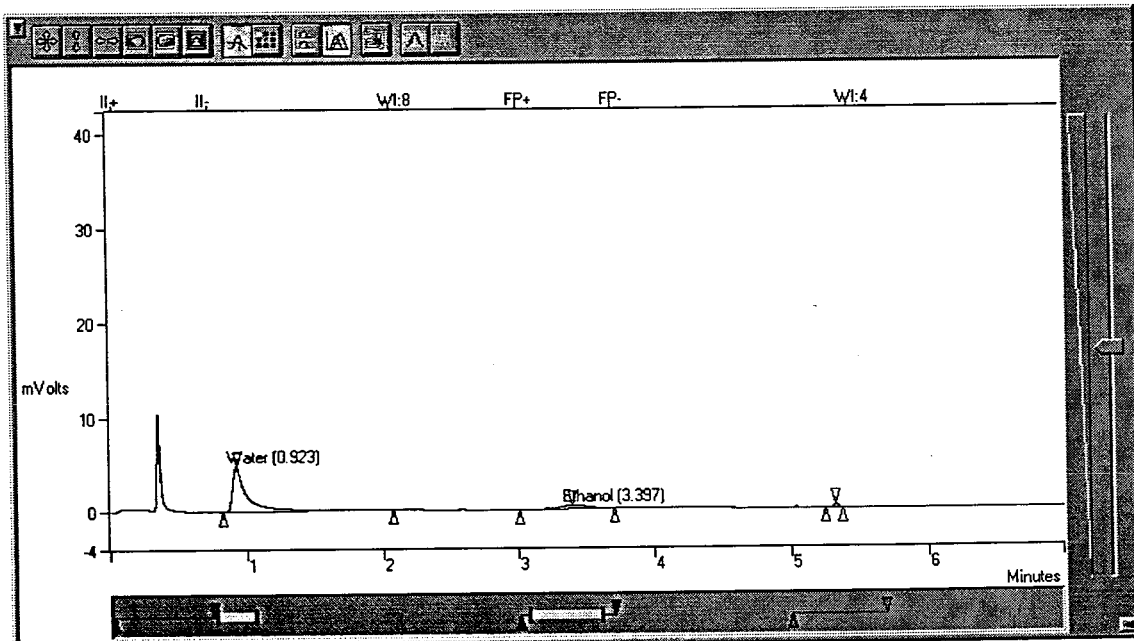
รูปที่ ก.3 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตะซานที่อัตราการไหลแก๊สพา 80 ml/min



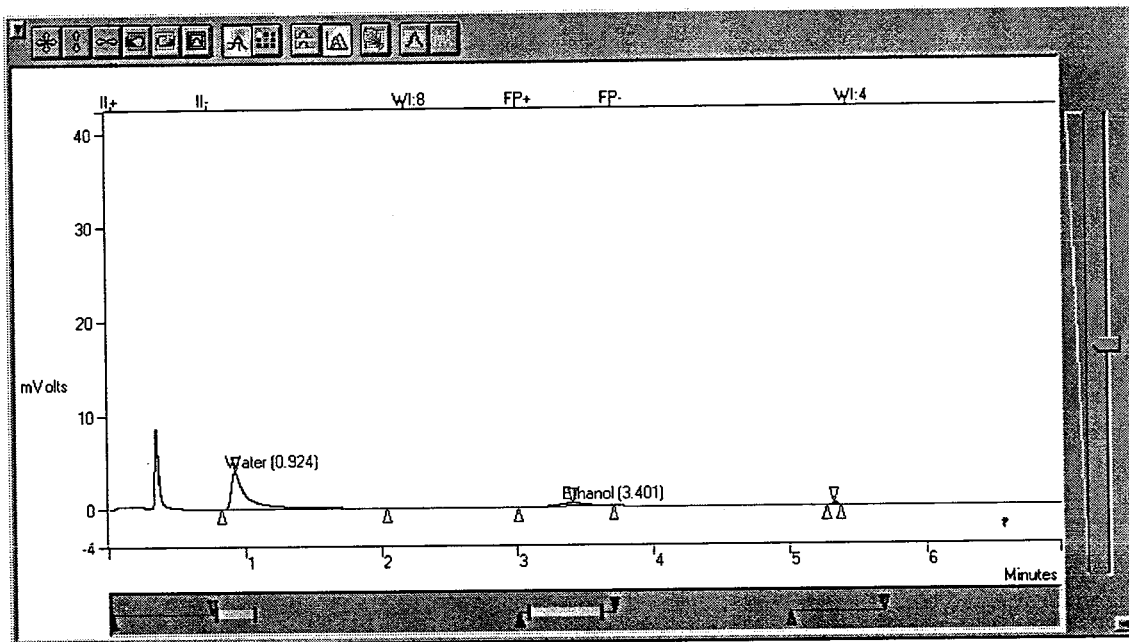
รูปที่ ก.4 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตะซานที่อัตราการไหลแก๊สพา 100 ml/min



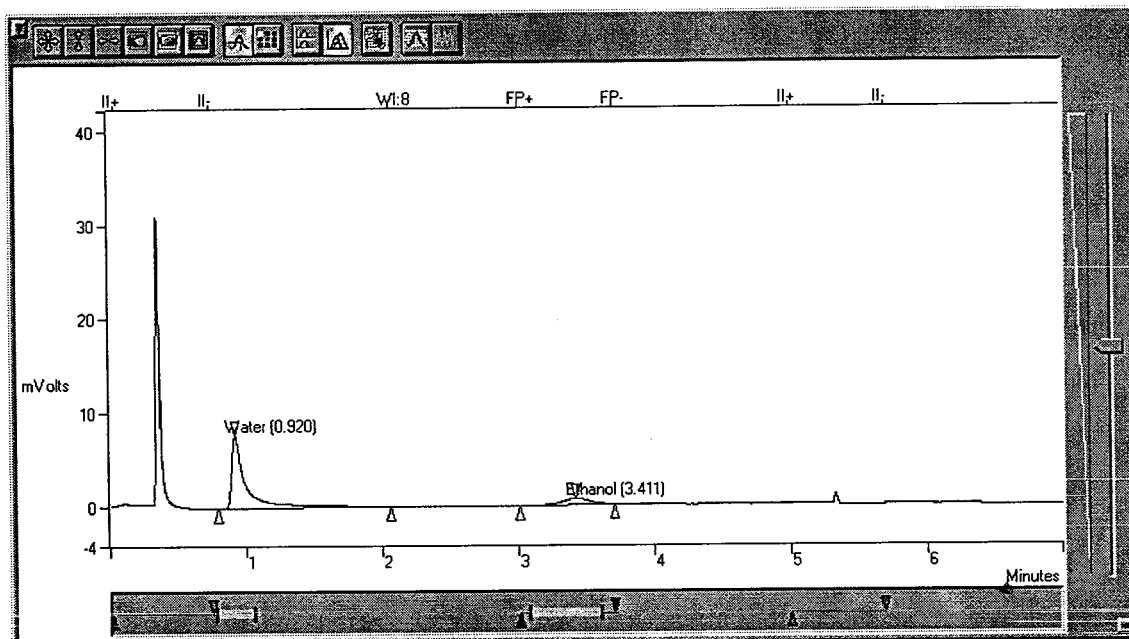
รูปที่ ก.5 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่อัตราการไหลแก๊สพา 120 ml/min



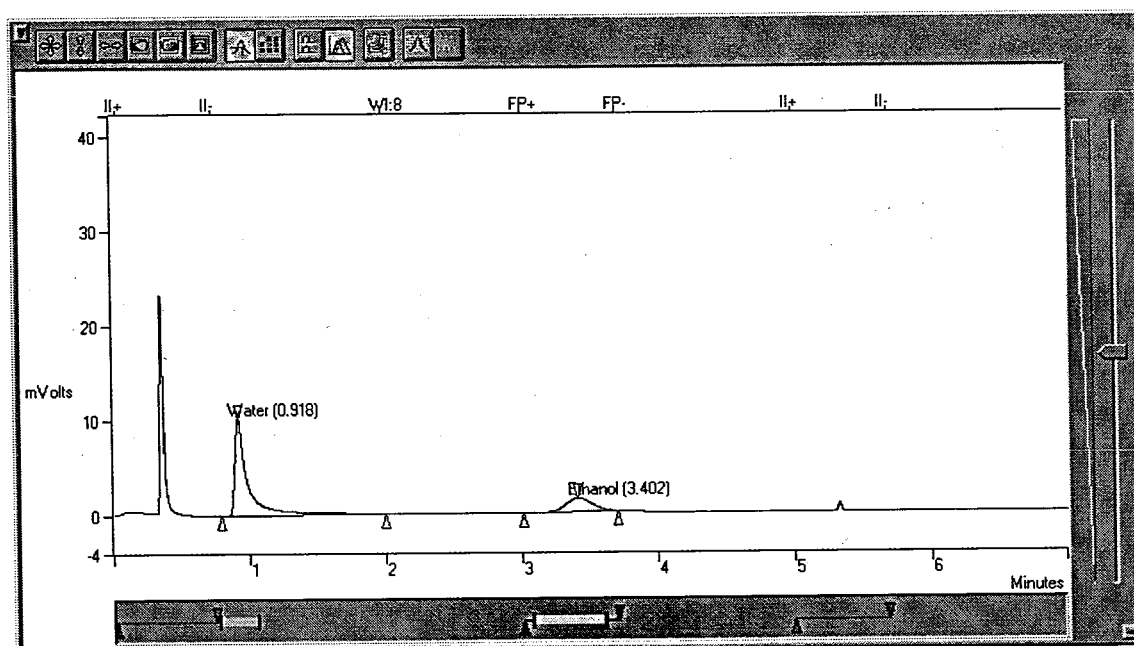
รูปที่ ก.6 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่อัตราการไหลแก๊สพา 140 ml/min



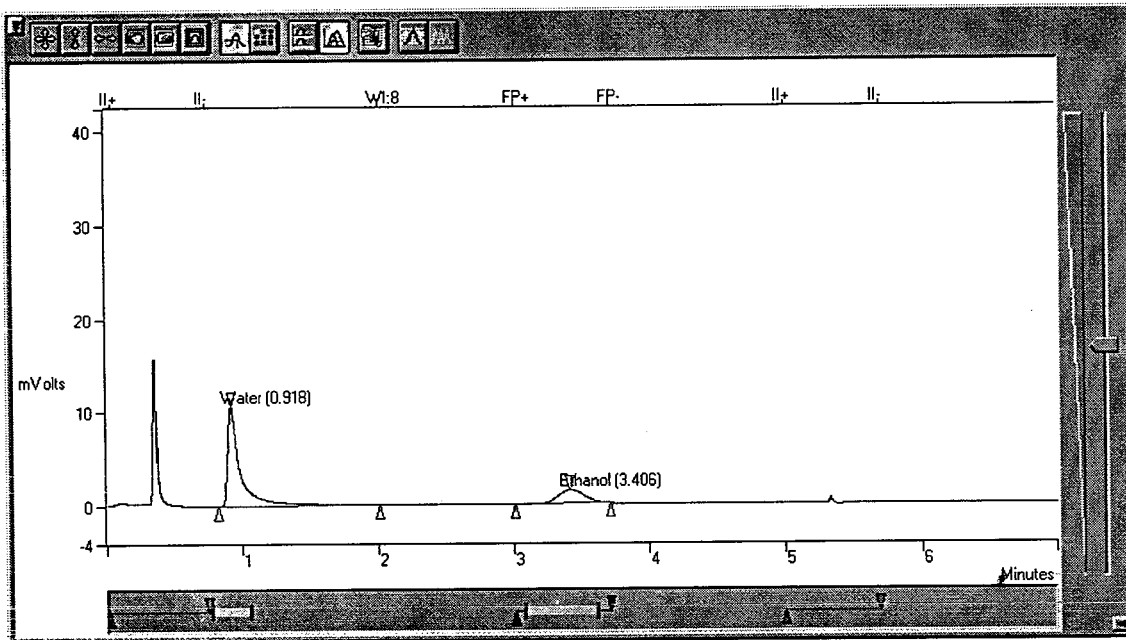
รูปที่ ก.7 โครมาโทแกรมของเชื้อเลือกผ่านโคโตซานที่อัตราการไหลแก๊สพา 160 ml/min



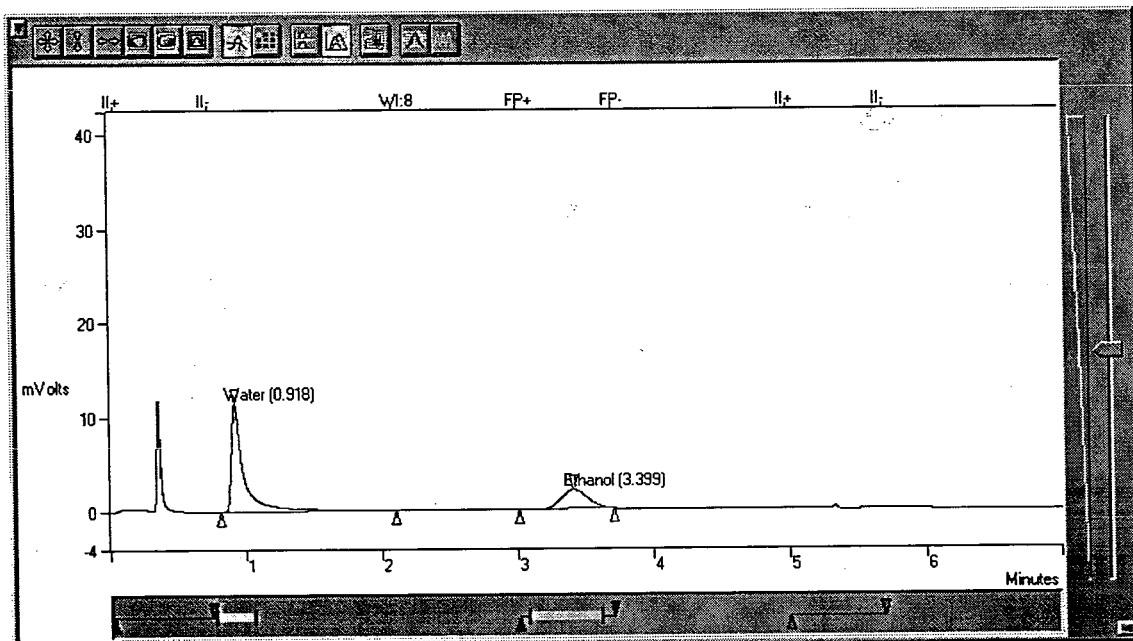
รูปที่ ก.8 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคไตซาน



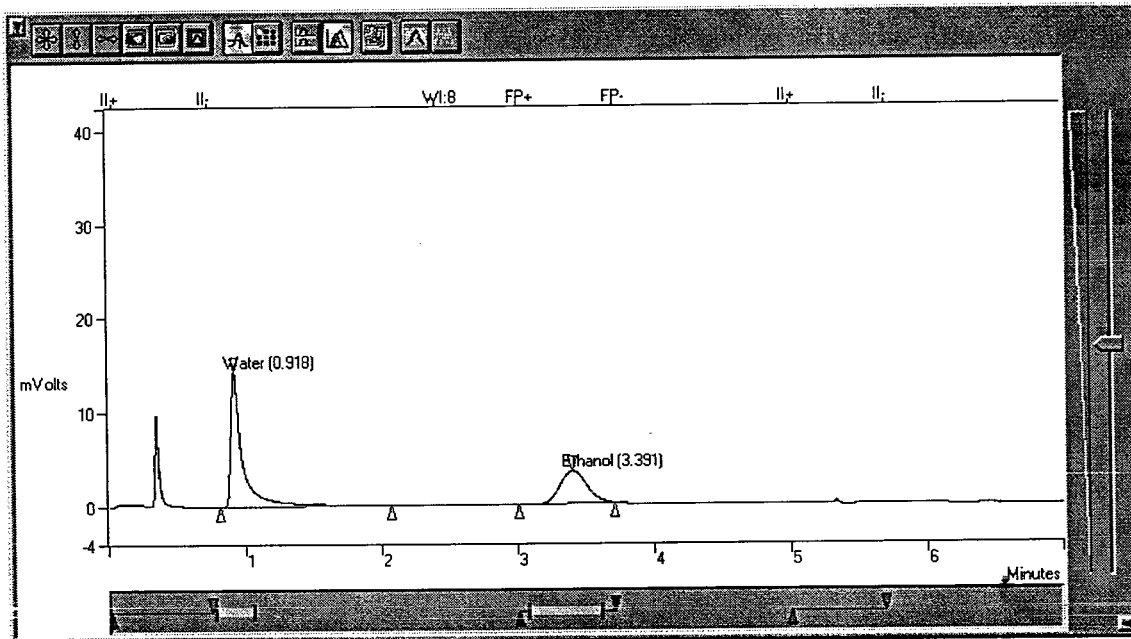
รูปที่ ก.9 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคไตซานที่ผสมซีไอไลโซเดียมเอ 5 phr



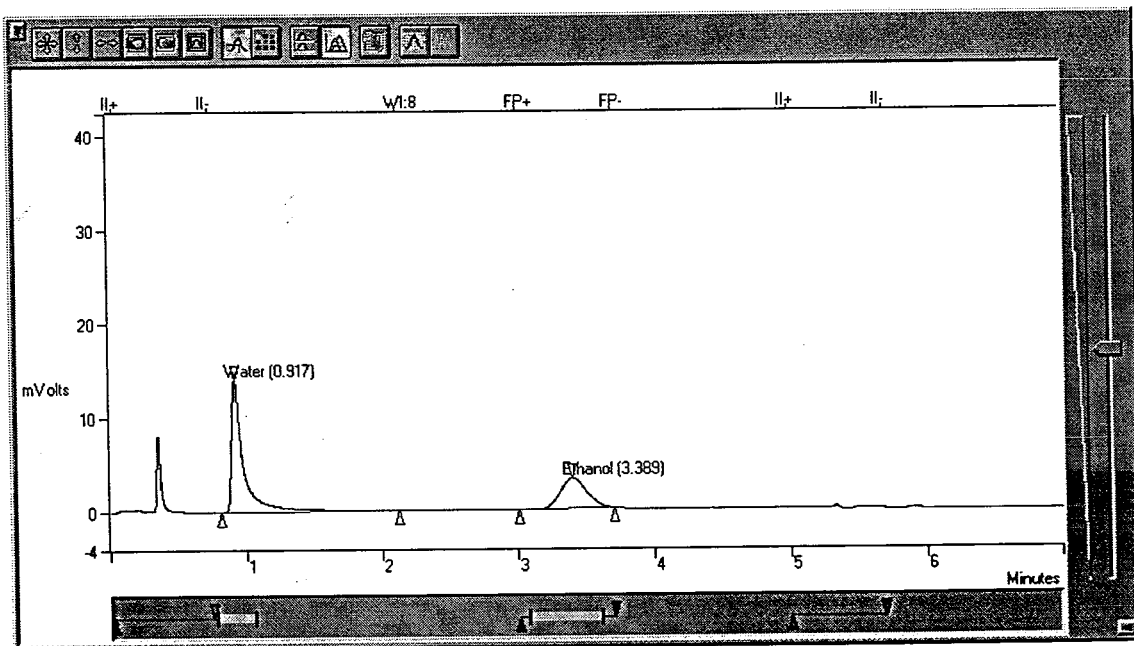
รูปที่ ก.10 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่ผสมซีโพลิตโซเดียมเอ 10 phr



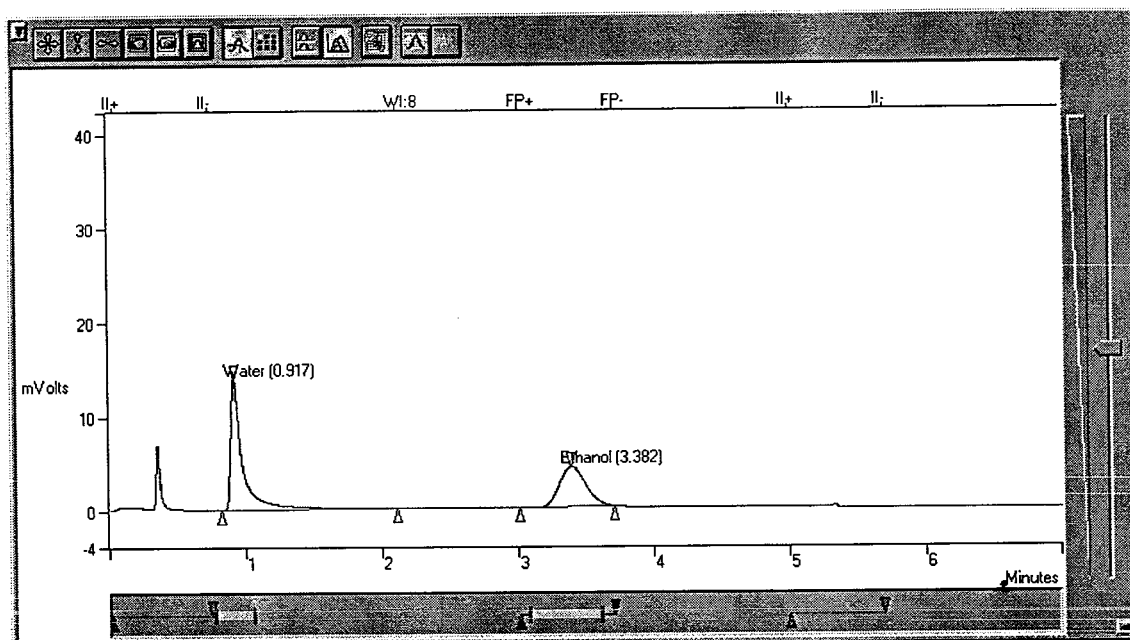
รูปที่ ก.11 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่ผสมซีโพลิตโซเดียมเอ 20 phr



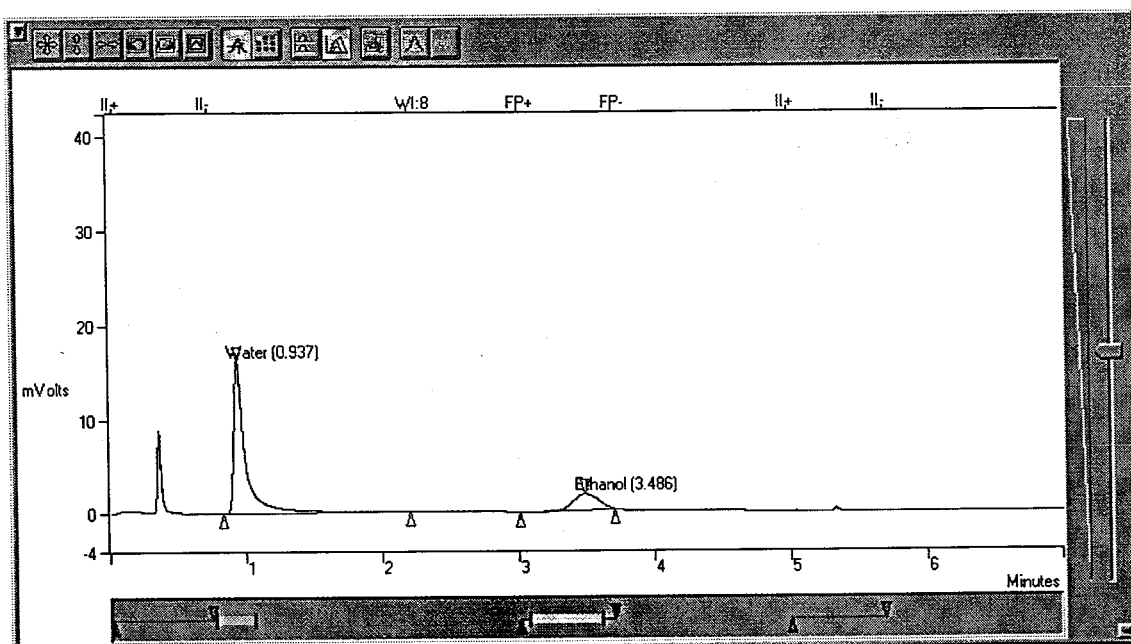
รูปที่ ก.12 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่ผสมซีโอดีโซเดียมเอ 30 phr



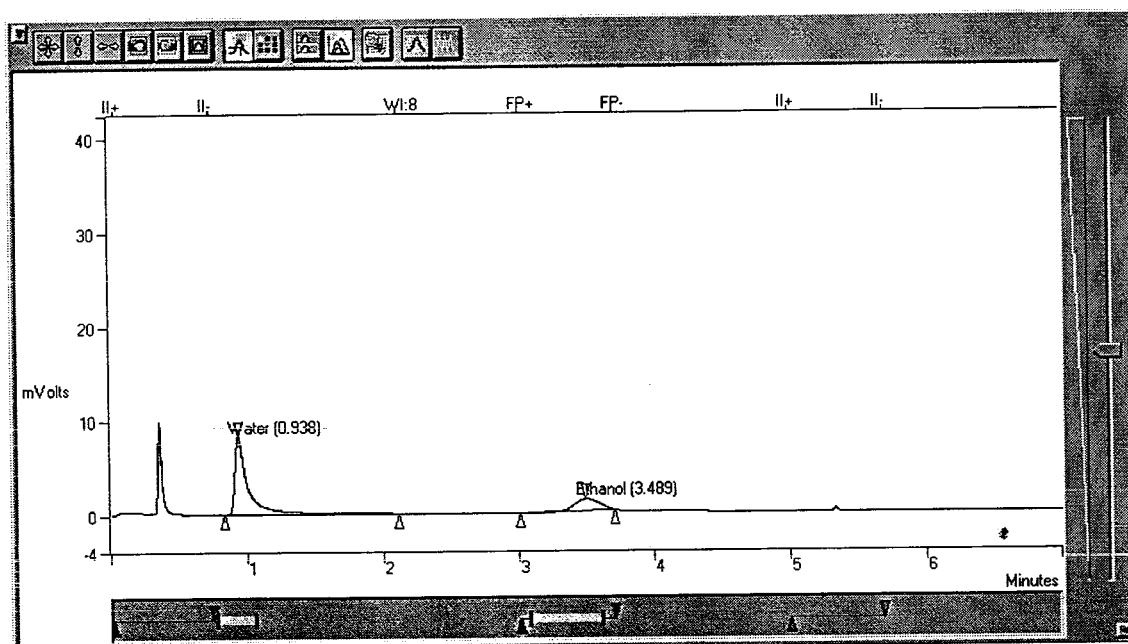
รูปที่ ก.13 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่ผสมซีโอดีโซเดียมเอ 40 phr



รูปที่ ก.14 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่ผสมซีไอไลต์โซเดียมเอ 50 phr



รูปที่ ก.15 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่ผสมซีไอไลต์โซเดียมเอจากการสังเคราะห์



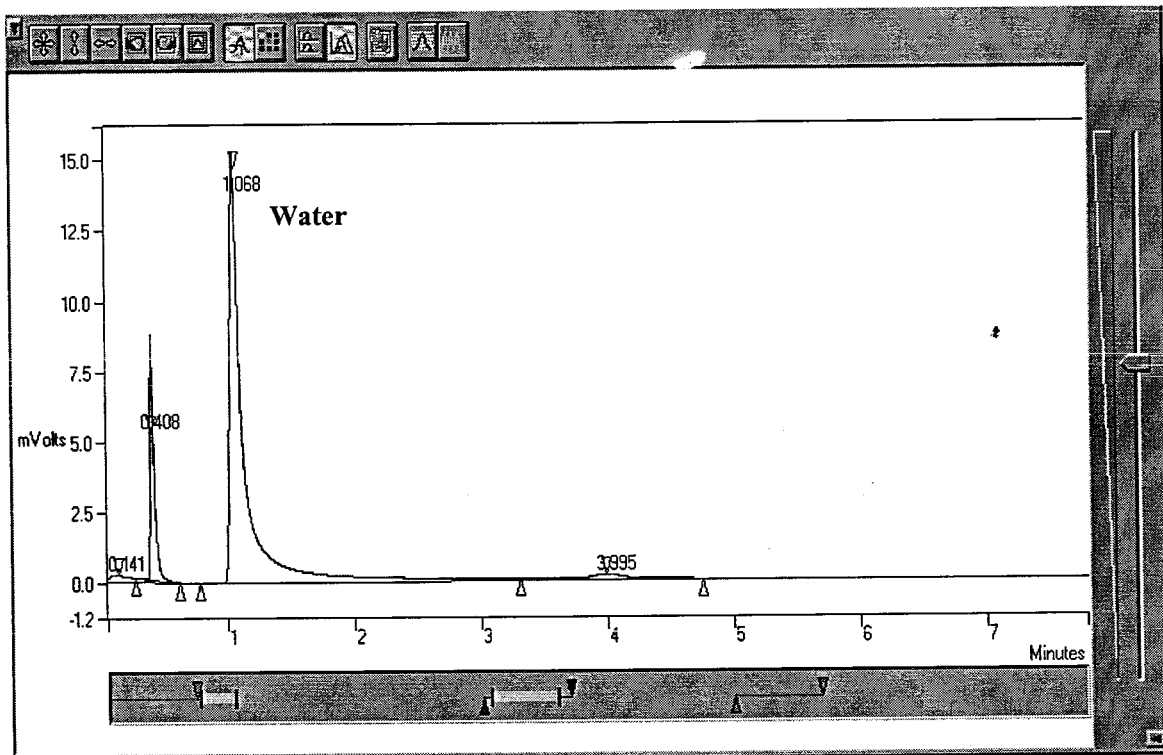
รูปที่ ก.16 โครมาโทแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตซานที่ผสมซิลิกาไลต์ 10 phr

ภาคผนวก ข  
การคำนวณ

## ตัวอย่างการคำนวณ

### การคำนวณหาค่า Response factor (Rf)

#### 1. การคำนวณหาค่า Response factor น้ำ



รูปที่ ข.1 โครมาโทแกรมของน้ำ

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลในการคำนวณและสภาวะการทดสอบ

ข้อมูล	ค่า
พื้นที่ใต้กราฟ	106748.8 Counts
ความดันไอ	2.3388 kPa
ความดันบรรยากาศ	104.3739 kPa
อุณหภูมิ	20 °C

$$\text{สูตร} \quad \text{Response factor (Rf)} = \frac{Cs}{As}$$

$$Cs = \frac{Pi}{Patm} \times 100$$

Rf = Response factor

Cs = เปอร์เซ็นต์โดยโมลของสาร

As = พื้นที่ใต้กราฟของสาร

Pi = ความดันไอของสาร

Patm = ความดันบรรยากาศ

$$\text{จากสูตร} \quad Cs = \frac{2.3388}{104.3739} \times 100$$

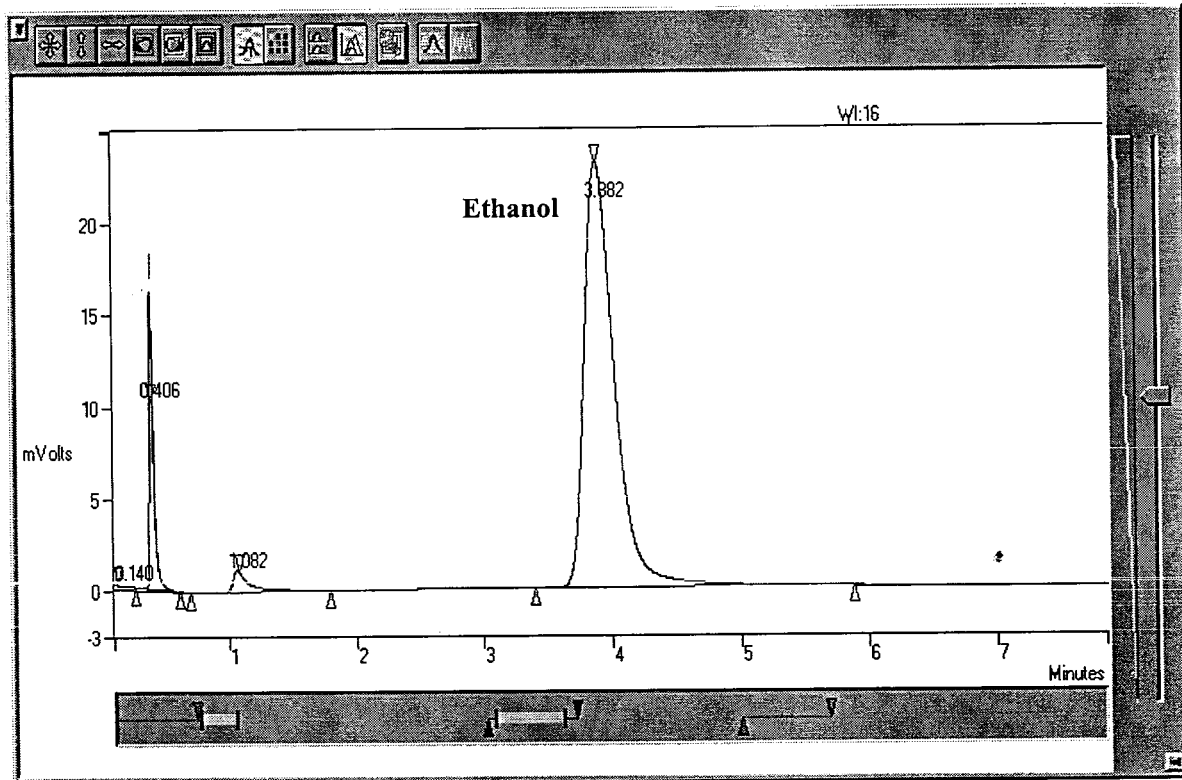
$$= 2.241 \% \text{ mol}$$

$$As = 106748.8$$

$$Rf = \frac{2.241}{106748.8}$$

$$Rf_{\text{water}} = 2.099 \times 10^{-5}$$

## 2. การคำนวณหาค่า Response factor เอทานอล



รูปที่ ข.2 โครมาโทแกรมของเอทานอล

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลในการคำนวณและสภาวะการทดสอบ

ข้อมูล	ค่า
พื้นที่ใต้กราฟ	363633.4 Counts
ความดันไอ	5.8 kPa
ความดันบรรยากาศ	104.3739 kPa
อุณหภูมิ	20 °C

สูตร Response factor ( Rf ) =  $\frac{Cs}{As}$

$$Cs = \frac{Pi}{Patm} \times 100$$

Rf = Response factor

Cs = เปอร์เซ็นต์โดยโมลของสาร

As = พื้นที่ใต้กราฟของสาร

Pi = ความดันไอของสาร

Patm = ความดันบรรยากาศ

จากสูตร

$$Cs = \frac{5.8}{104.3739} \times 100$$

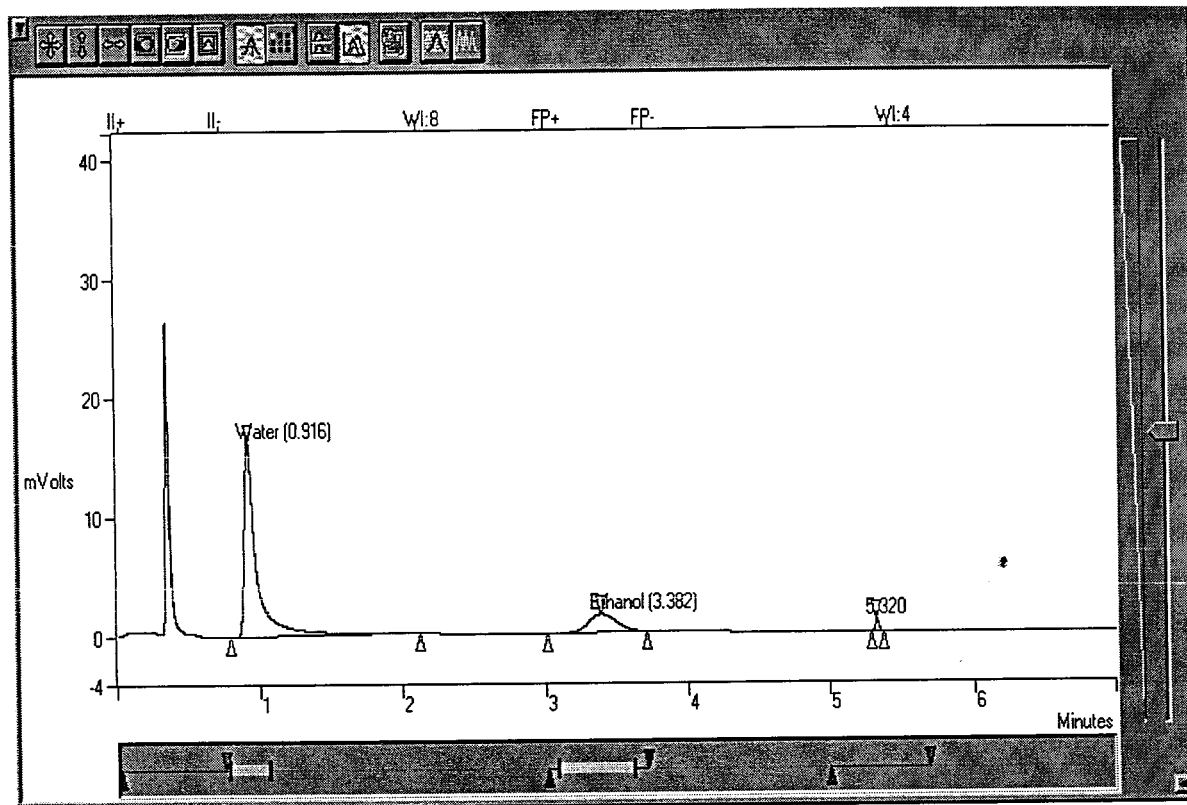
$$= 5.557 \% \text{ mol}$$

$$As = 363633.4$$

$$Rf = \frac{5.557}{363633.4}$$

$$Rf_{\text{Ethanol}} = 1.528 \times 10^{-5}$$

การคำนวณหาค่าฟลักซ์ (Flux) และค่าความสามารถในการแยก (Separation factor)



รูปที่ ข.3 โครมาโทแกรมของน้ำและเอทานอล

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการคำนวณและสภาวะการทดสอบ

ข้อมูล	ค่า
พื้นที่ใต้กราฟของน้ำ	100149 Counts
พื้นที่ใต้กราฟของเอทานอล	19843 Counts
อัตราการไหลของฮีเลียม	40.71 ml/min
ความดัน	1.0286 atm
อุณหภูมิ	297.5 K
พื้นที่หน้าตัดของเยื่อเลือกผ่าน	1.8 cm <sup>2</sup>

## 1. ค่าฟลักซ์ (Flux)

$$\text{สูตร} \quad R_f = \frac{C_s}{A_s}$$

$$C_s = R_f \times A_s$$

$$R_f = \text{Response factor}$$

$$C = \text{เปอร์เซ็นต์โดยโมลของสาร}$$

$$A = \text{พื้นที่ใต้กราฟของสาร}$$

น้ำ

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad C_{\text{water}} &= A_{\text{water}} \times R_{f_{\text{water}}} \\ &= 100149 \times 2.099 \times 10^{-5} \\ &= 2.102 \% \text{ mol} \end{aligned}$$

เอทานอล

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad C_{\text{ethanol}} &= A_{\text{ethanol}} \times R_{f_{\text{ethanol}}} \\ &= 19843 \times 1.528 \times 10^{-5} \\ &= 0.3032 \% \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_t &= C_{\text{water}} + C_{\text{ethanol}} \\ &= 2.102 + 0.3032 \\ &= 2.4052 \% \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{He}} &= 100 - C_t \\ &= 100 - 2.4052 \\ &= 97.5948 \% \text{ mol} \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์โดยโมล 97.5948 % mol คิดเป็นอัตราการไหล = 40.71 ml/min

เปอร์เซ็นต์โดยโมลของน้ำ 2.102 % mol คิดเป็นอัตราการไหล =  $\frac{40.71}{97.5948} \times 2.102$

∴ อัตราการไหลของน้ำ = 0.8768 ml/min

เปอร์เซ็นต์โดยโมลของเอทานอล 0.3032 % mol คิดเป็นอัตราการไหล =  $\frac{40.71}{97.5948} \times 0.3032$

∴ อัตราการไหลของเอทานอล = 0.1264 ml/min

สูตร

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT}$$

P = ความดัน

V = ปริมาตร

N = โมล

R = ค่าคงที่ของแก๊ส

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

น้ำ

จากสูตร

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{PV}{RT} \\
 &= \frac{1.0286 \times (0.8786 \times 10^{-3})}{0.082 \times 297.5} \\
 &= 3.705 \times 10^{-5} \text{ mol/min} \\
 &= 2.233 \times 10^{-3} \text{ mol/hr} \\
 &= 0.040 \text{ g/hr}
 \end{aligned}$$

เอทานอล

จากสูตร

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{PV}{RT} \\
 &= \frac{1.0286 \times (0.1264 \times 10^{-3})}{0.082 \times 297.5} \\
 &= 5.3296 \times 10^{-6} \text{ mol/min} \\
 &= 3.1977 \times 10^{-4} \text{ mol/hr} \\
 &= 0.0147 \text{ g/hr}
 \end{aligned}$$

ค่าฟลักซ์ (Flux)

$$\text{Flux} = \frac{\text{อัตราการไหล}}{\text{พื้นที่หน้าตัดเยื่อเลือกผ่าน}}$$

น้ำ

$$\text{จากสูตร} \quad \text{Flux}_{\text{water}} = \frac{0.040 \times 10000}{1.8}$$

$$= 222.22 \text{ g/hr.m}^2$$

เอทานอล

$$\text{จากสูตร} \quad \text{Flux}_{\text{ethanol}} = \frac{0.0147 \times 10000}{1.8}$$

$$= 81.67 \text{ g/hr.m}^2$$

## 2. ค่าความสามารถในการแยก (Separation factor)

$$\text{สูตร} \quad \text{Separation factor } (\alpha) = \frac{(Y_{\text{Water}} / Y_{\text{Ethanol}})}{(X_{\text{Water}} / X_{\text{Ethanol}})}$$

$$Y_{\text{water}} = \text{สัดส่วนโมลของน้ำในเฟอรัมมิเอต}$$

$$Y_{\text{ethanol}} = \text{สัดส่วนโมลของเอทานอลในเฟอรัมมิเอต}$$

$$X_{\text{water}} = \text{สัดส่วนโมลของน้ำในสารป้อน}$$

$$X_{\text{ethanol}} = \text{สัดส่วนโมลของเอทานอลในสารป้อน}$$

สารละลายเอทานอล 96 %v/v คิดเป็น 88.24 %mol

$$\therefore \text{ประกอบด้วยเอทานอล} = 88.24 \text{ mol}$$

$$\therefore \text{ประกอบด้วยน้ำ} = 100 - 88.24 = 11.76 \text{ mol}$$

$$\text{จากสูตร} \quad \text{Separation factor } (\alpha) = \frac{(Y_{\text{Water}} / Y_{\text{Ethanol}})}{(X_{\text{Water}} / X_{\text{Ethanol}})}$$

$$= \frac{2.102 / 0.3032}{11.76 / 88.24}$$

$$= 52.13$$

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลจากการคำนวณของเยื่อเลือกผ่านโคไตซานที่อัตราการไหลของแก๊สพา 40-160 ml/min

อัตราการไหลของแก๊สซีเลียม(ml/min)	Area(Counts)		$\alpha_{\text{ซีเลียม}}$	ผลิตภัณฑ์(g/hr.m <sup>2</sup> )		
	น้ำ	เอทานอล		น้ำ	เอทานอล	รวม
40.71	100149	19843	52.01	224.33	82.69	307.02
	100789	19914	52.16	225.80	82.99	308.79
	101945	20088	52.30	228.45	83.74	312.19
59.58	71195	12218	60.05	231.67	73.96	305.64
	72107	12203	60.89	234.69	73.89	308.57
	71267	11992	61.24	231.90	72.59	304.50
80.64	54032	8713	63.32	236.98	71.74	308.72
	53528	8686	63.51	234.74	70.86	305.60
	55263	8938	63.72	242.45	72.95	315.39
100.36	46830	7244	66.62	255.17	73.43	328.60
	47535	7336	66.77	259.05	74.37	333.42
	46814	7206	66.95	255.08	73.04	328.12
120.32	38665	5938	67.10	252.09	72.02	324.11
	40202	6121	67.68	262.20	74.27	336.47
	40377	6097	68.25	263.35	73.98	337.33
140.32	36605	5255	71.78	278.14	74.28	352.42
	35868	5132	72.02	272.49	72.53	345.02
	36248	5172	72.22	275.40	73.10	348.51
160.71	31978	4697	70.16	278.03	75.97	354.01
	31345	4580	70.53	272.49	74.07	346.56
	31508	4513	71.95	273.91	72.99	346.90

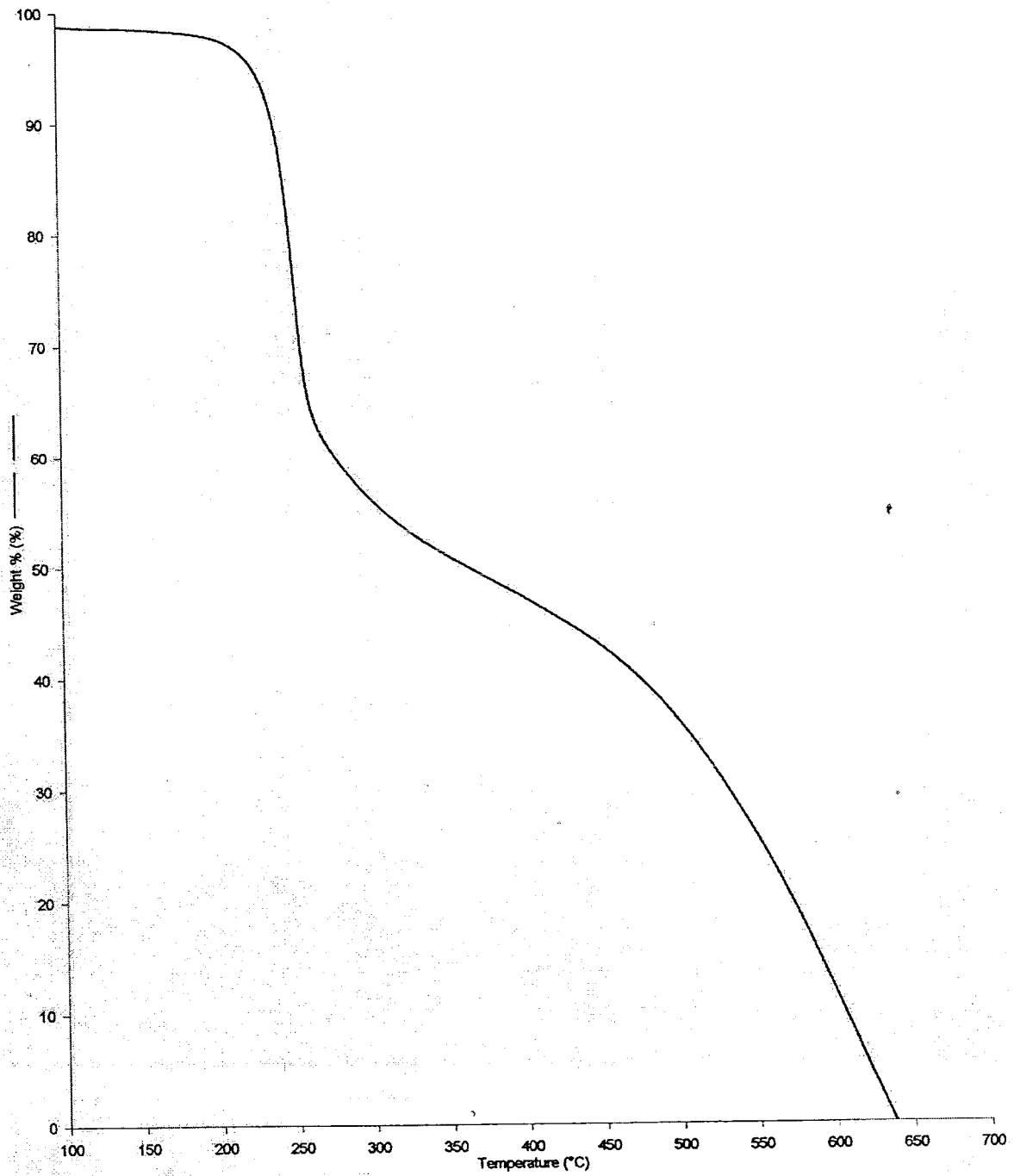
ตารางที่ ๗.7 ข้อมูลจากการคำนวณของเยื่อเลือกผ่านโคไตซานผสมที่โพลีเอทิลีนปริมาณ 0-50 phr

โคไตซาน	Area(Counts)		น้ำ	น้ำหนัก	ฟลักซ์(g/hr.m <sup>2</sup> )	น้ำ	เอทานอล	รวม
	น้ำ	เอทานอล						
CG	55102	9307	240.10	61.01	75.45	240.10	75.45	315.55
	55528	9193	241.98	62.25	74.53	241.98	74.53	316.50
	55932	9126	243.75	63.16	73.99	243.75	73.99	317.74
CGZ 5	67257	18955	291.30	36.57	152.73	291.30	152.73	444.03
	68539	19145	296.95	36.89	154.31	296.95	154.31	451.25
	66280	18350	286.98	37.22	147.81	286.98	147.81	434.80
CGZ 10	70013	19607	305.05	36.80	158.93	305.05	158.93	463.98
	70247	19380	306.07	37.35	157.09	306.07	157.09	463.16
	69913	19265	304.59	37.40	156.14	304.59	156.14	460.74
CGZ 20	72659	27881	320.57	26.86	222.85	320.57	222.85	549.42
	72843	27517	321.38	27.28	225.85	321.38	225.85	547.23
	74777	27899	330.07	27.62	229.10	330.07	229.10	559.17
CGZ 30	88267	46632	393.44	19.51	386.69	393.44	386.69	780.13
	88047	46352	392.42	19.58	384.33	392.42	384.33	776.76
	89242	46935	397.89	19.59	389.30	397.89	389.30	787.11
CGZ 40	87873	44516	393.55	20.34	370.90	393.55	370.90	764.44
	87440	44286	391.56	20.35	368.93	391.56	368.93	760.49
	87819	44259	393.28	20.45	368.74	393.28	368.74	762.02
CGZ 50	85970	59683	383.09	14.84	494.77	383.09	494.77	877.85
	84879	57820	378.03	15.13	479.07	378.03	479.07	857.10
	86507	58427	385.45	15.26	484.31	385.45	484.31	869.76

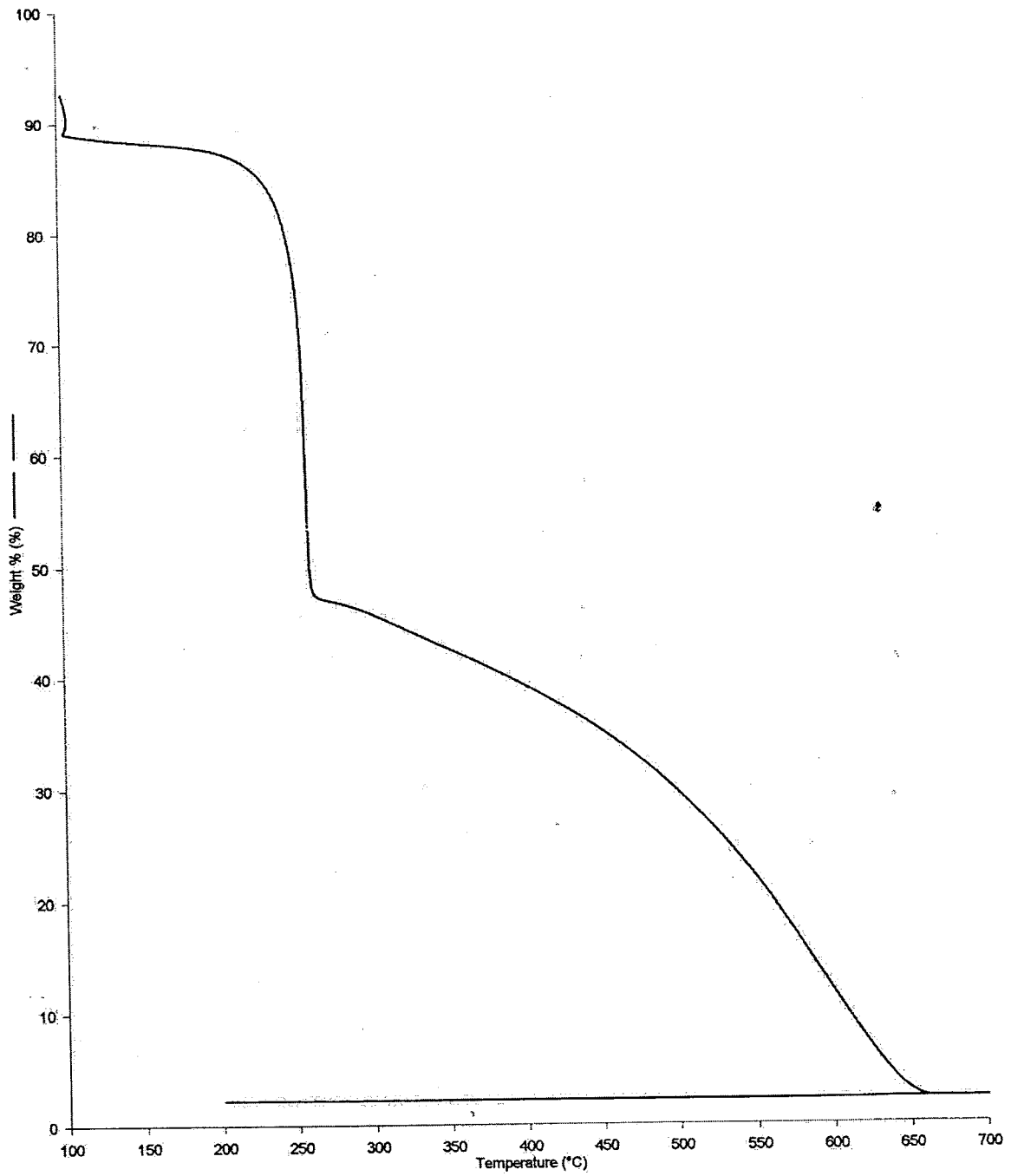
ตารางที่ ๗.๘ ข้อมูลการคำนวณของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานที่ผ่านการอบโดยผสมซีโอไลต์ซีเตมปริมาณ 0-30 phr

โคโตนาน	Area(Counts)		$\alpha_{\text{พืชมอบ}}$	ฟลักซ์(g/hr.m <sup>2</sup> )	
	น้ำ	เอทานอล		น้ำ	เอทานอล
CG	54032	8793	63.32	236.98	71.74
	53528	8686	63.51	234.74	70.86
	55263	8938	63.72	242.45	72.95
CGZ 5	61539	17179	36.92	271.15	140.81
	62083	17319	36.94	273.58	141.98
	60976	16665	37.71	268.61	136.57
CGZ 10	69082	24552	28.99	299.97	198.33
	69167	24486	29.11	300.34	197.80
	70827	25009	29.19	307.68	202.11
CGZ 20	84336	27657	31.42	372.54	227.28
	82565	23757	35.81	364.35	195.04
	79731	22735	36.14	351.58	186.50
CGZ 30	96764	60408	16.51	429.29	498.57
	94677	59040	16.53	419.75	486.95
	95997	59548	16.61	425.76	491.32
					รวม
					308.72
					305.60
					315.39
					411.96
					415.56
					405.19
					498.30
					498.14
					509.80
					599.81
					559.39
					538.08
					927.86
					906.70
					917.08

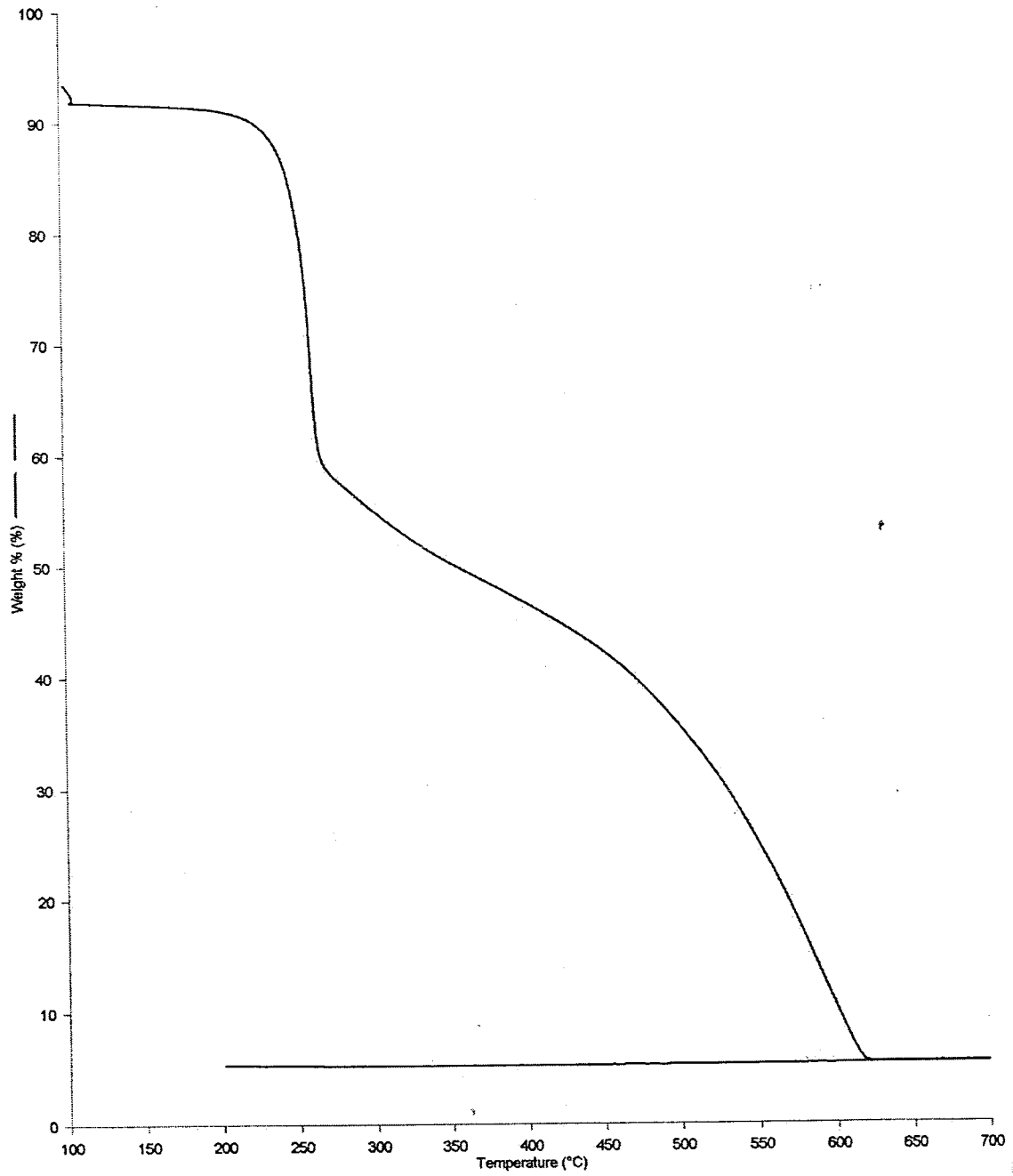
ภาคผนวก ค  
TGA เทอร์โมแกรม



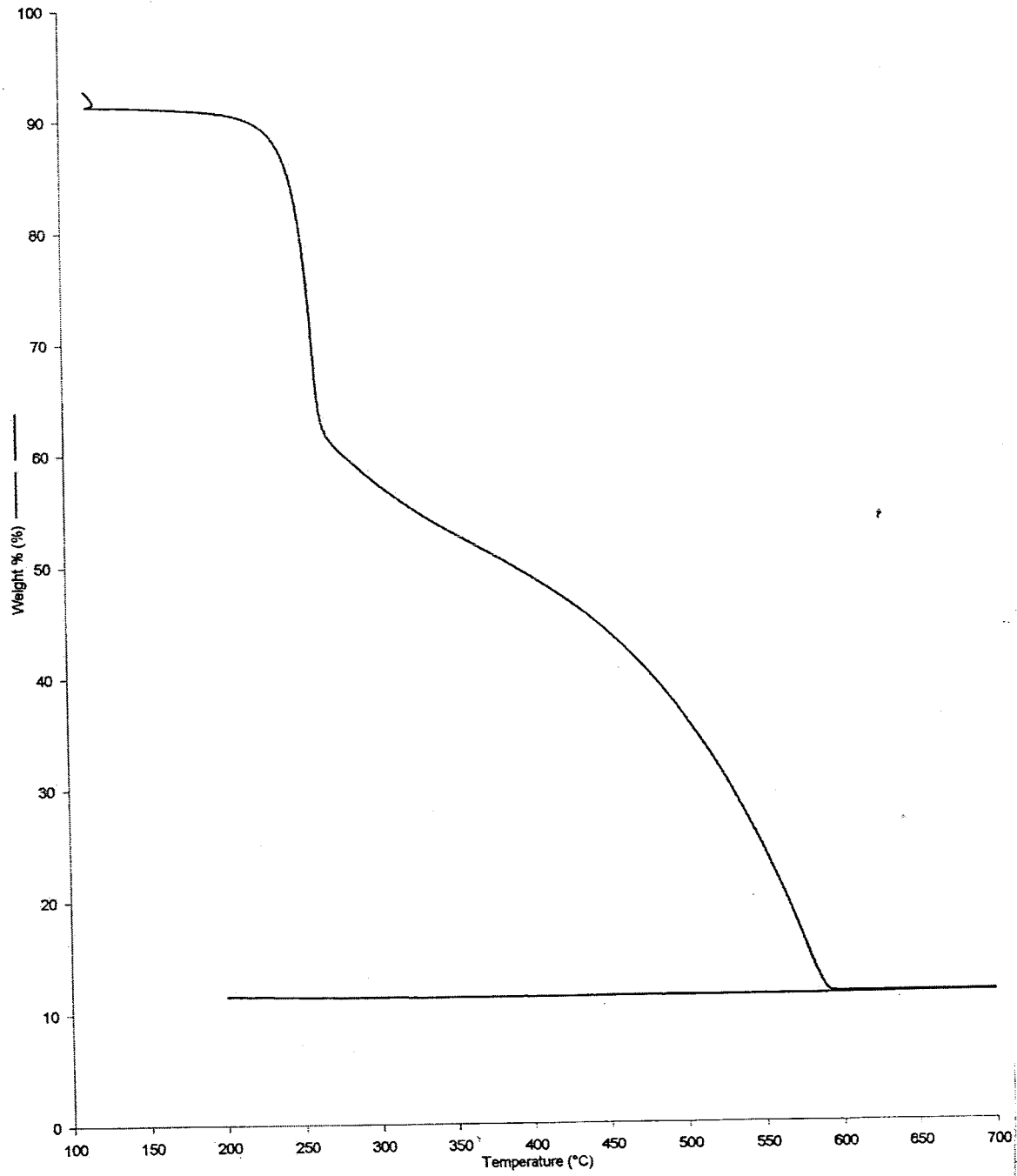
รูปที่ ค.1 TGA เทอร์โมแกรมของเยื่อเลือกผ่านไคโตซาน



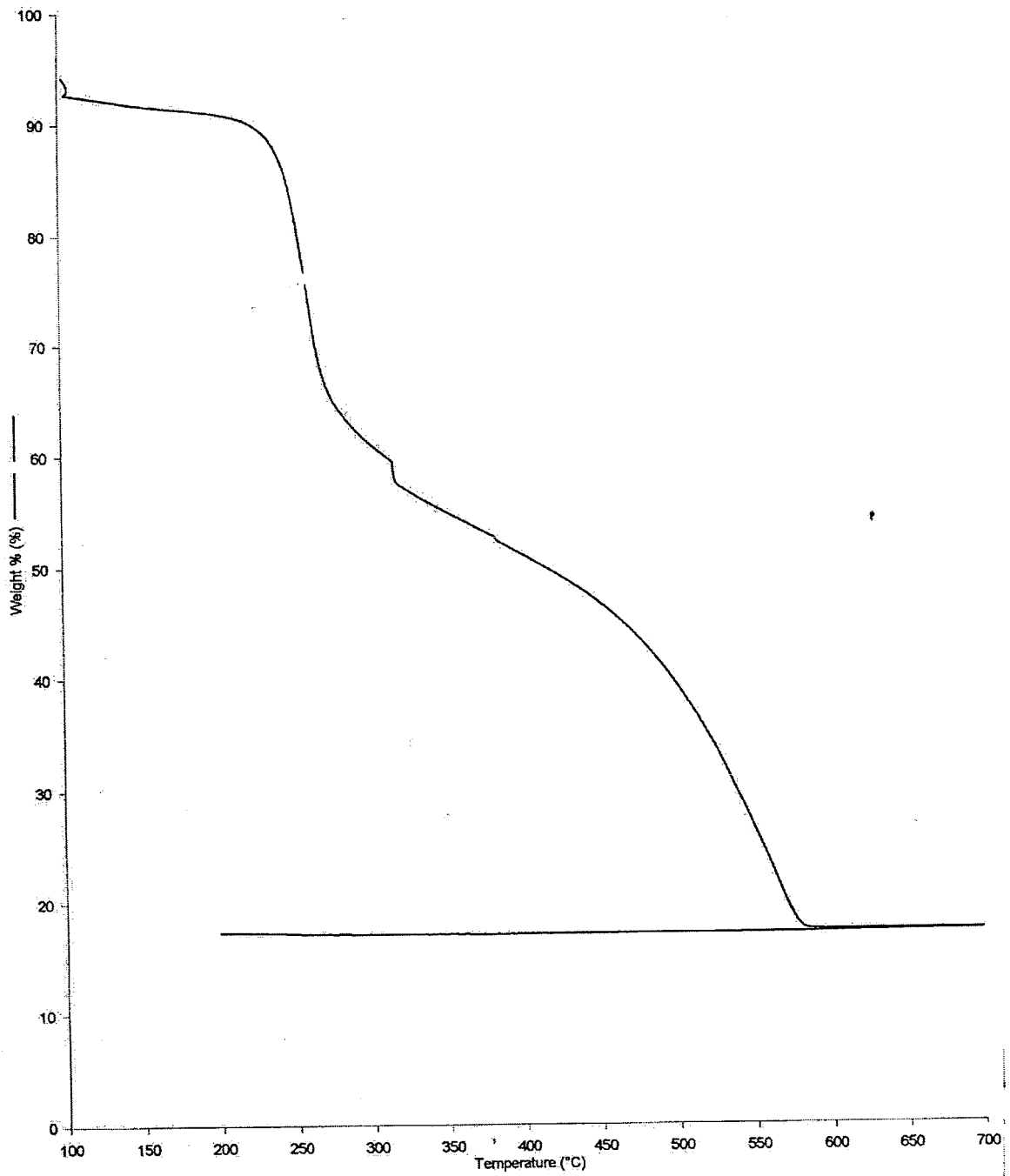
รูปที่ ค.2 TGA เทอร์โมแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโคซานผสมซีไอโลด์โซเดียมเอ 5 phr



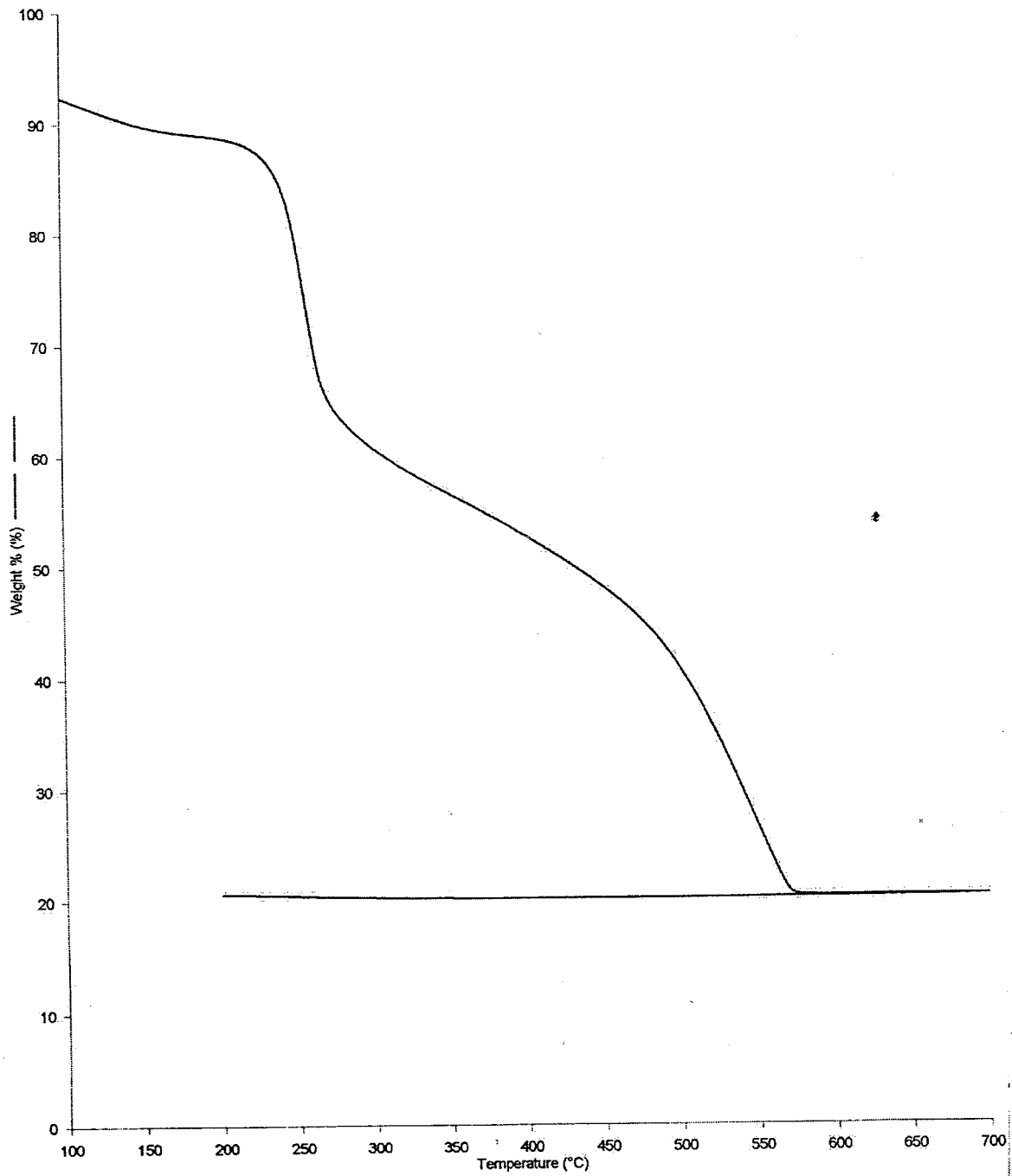
รูปที่ ค.3 TGA เทอร์โมแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโคซานผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ 10 phr



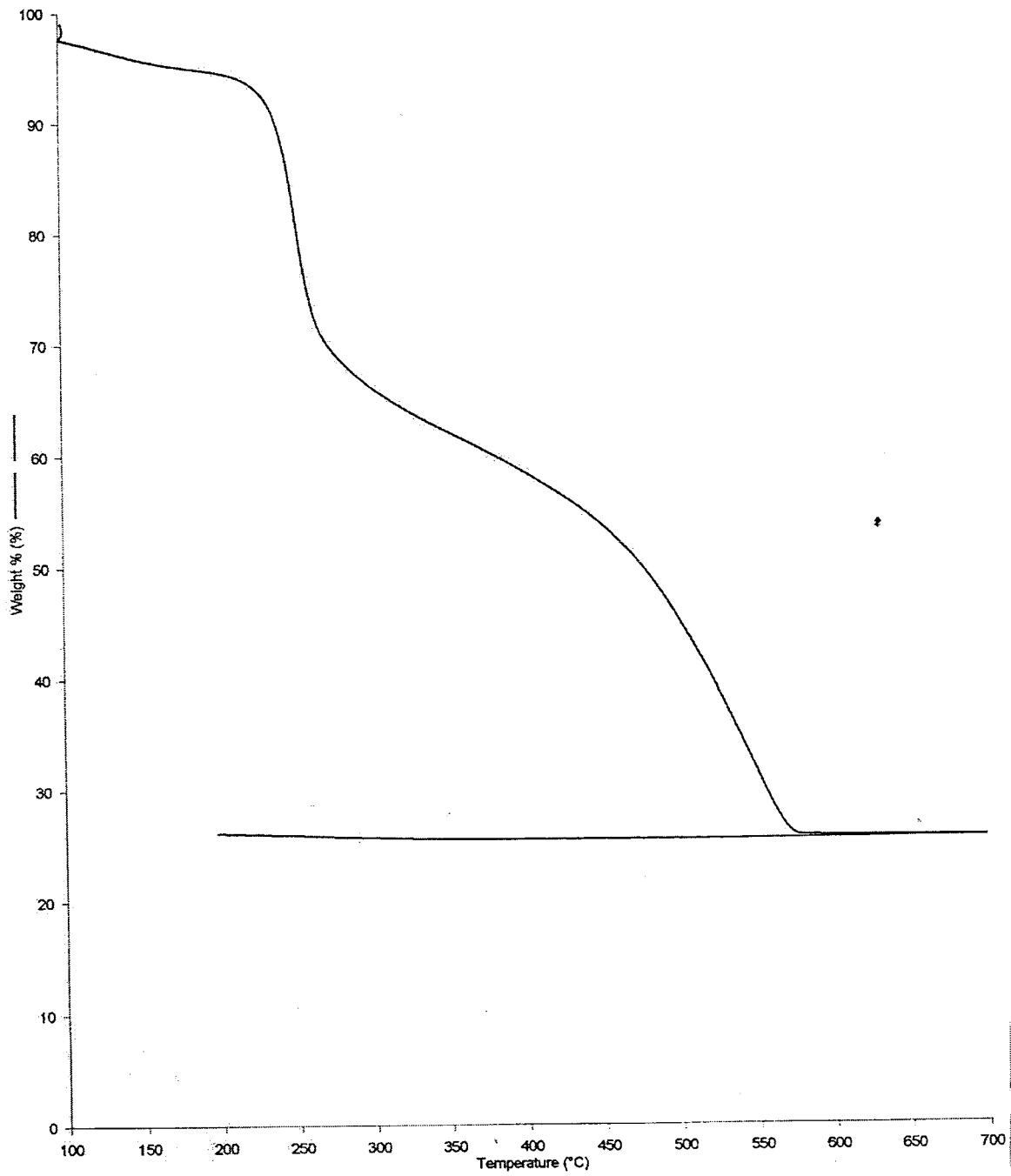
รูปที่ ค.4 TGA เทอร์โมแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตนานผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ 20 phr



รูปที่ ค.5 TGA เทอร์โมแกรมของเยื่อเลือกผ่านไคโตซานผสมซีไอไลต์โซเดียมเอ 30 phr



รูปที่ ค.6 TGA เทอร์โมแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโตะซานผสมซีโอไลต์โซเดียมเอ 40 phr



รูปที่ ค.7 TGA เทอร์โมแกรมของเยื่อเลือกผ่านโคโคซานผสมซีไอไลต์โซเดียมเอ 50 phr