

สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

การทำเอทานอลให้บริสุทธิ์ด้วยซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อย



ศิริกาญจน์ ดอกไม้เงิน
สุภามาส ใจดี

ร.พ.
84477
2550

เลขานุ.....
เลขทะเบียน..... 83193
วัน, เดือน, ปี..... 6 ส.ค. 2551

.b. 11962215
.i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ETHANOL PURIFICATION BY ZEOLITE A SYNTHESIZED FROM
BAGASSE FLY ASH**



**A REPORT SUMMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 2007 ศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การทำเอทานอลให้บริสุทธิ์ด้วยซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์จากเถ้าลอย
ชานอ้อย
จัดทำโดย นางสาวศิริกาญจน์ ดอกไม้เงิน รหัสประจำตัว 47010761
นางสาวสุภามาส ใจดี รหัสประจำตัว 47010884
พ.ศ. 2550
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุธาสนี เนรมิตคกพงศ์

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

.....
(ดร.สุธาสนี เนรมิตคกพงศ์)

.....
(ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

.....
(อาจารย์ศิริพันธ์ มุรธาชัยลักษณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การทำเอทานอลให้บริสุทธิ์ด้วยซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์จากเถ้าลอย ขานอ้อย		
จัดทำโดย	นางสาวศิริกาญจน์	ดอกไม้อัจฉริยะ	รหัสประจำตัว 47010761
	นางสาวสุภามาส	ใจดี	รหัสประจำตัว 47010884
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สุธาสนี เนรมิตตกพงศ์		
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี		
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์		
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์ด้วยซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์นี้เป็นการทดลองแบบกะที่มีอัตราการปั่นกววนคงที่ และทำการทดลองที่อุณหภูมิ 0 และ 25 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมงจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส คือ สามารถดูดซับน้ำจากเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ได้ร้อยละ 14.5 โดยปริมาตร ซึ่งมีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณซีโอไลต์ (1 กรัม) เท่ากับ 36.4 และความสามารถในการดูดซับน้ำจะลดลงตามเวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น

Report Title Ethanol Purification by Zeolite A Synthesized from Bagasse Fly Ash
By Miss.Sirikarn Dokmaijeen ID.NO. 47010761
 Miss.Supamas Jaidee ID.NO. 47010884
Advisor Dr. Sutasinee Neramittagapong
Report for Bachelor Degree of Engineering (Chemical Engineering)
 Department of Chemical Engineering
 Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This project was to study the ethanol purification by zeolite A synthesized from bagasse fly ash. Zeolite A was synthesized at various crystallization time of 2, 4 and 6 h. The ethanol purification was carried out in batch reactor with constant stirring rate at 0 and 25°C. It has been found that zeolite A synthesized from bagasse fly ash using crystallization time of 2 h exhibited the highest amount of adsorbed water at 0°C, water in 95% ethanol-water solution was reduced about 14.5% by using this zeolite. The amount of water adsorb on zeolite was 36.4 mg water / g zeolite. The amount of adsorbed water decreased with an increasing of crystallization time.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้จะไม่สำเร็จล่วงได้ด้วยดี หากปราศจากความกรุณาและความอนุเคราะห์ของหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณ

ดร. สุธาสนี เนรมิตคกพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรที่กรุณาให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ คำแนะนำตลอดจนช่วยแก้ปัญหา ให้ความรู้และเอาใจใส่ดูแลเสมอมา ทำให้ปริญญาบัตรนี้สำเร็จล่วงไปด้วยดี

คุณวัชรารัตน์ ปราณี และคุณจุฑามาศ อินตะศรี ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดีมาโดยตลอด และขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้มีพระคุณสูงสุดในชีวิต และอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ช่วยให้กำลังใจและคำแนะนำเวลาที่ประสบปัญหาระหว่างการทำงานวิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้ศึกษาขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีสิ่งผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ศิริกาญจน์ ดอกไม้เงิน

สุภามาส ใจดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ III อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ซีไอไลต์.....	3
2.1.1 สมบัติของซีไอไลต์.....	3
2.1.2 ประโยชน์ของซีไอไลต์.....	5
2.1.3 ซีไอไลต์ (ตัวดูดซับ) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	6
2.2 การดูดซับ.....	6
2.2.1 ประเภทของการดูดซับ.....	7
2.2.2 กลไกการดูดซับ.....	9
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	9
2.2.4 ตัวดูดซับ.....	10
2.2.5 การจำแนกขนาดของรูพรุน.....	11
2.2.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	11
2.2.7 อัตราการดูดซับ.....	17
2.2.8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ.....	18
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 สารเคมี.....	21
3.2 อุปกรณ์.....	21
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	24
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	29
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	29
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	29
เอกสารอ้างอิง.....	30
ภาคผนวก ก.....	33
ภาคผนวก ข.....	36
ภาคผนวก ค.....	39
ภาคผนวก ง.....	42

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การจัดแบ่งขนาดรพุนตามมาตรฐานสากล.....	11
ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส.....	27
ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	27
ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ(ร้อยละ โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส.....	28
ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ(ร้อยละ โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส.....	28
ตารางที่ ก.1 พื้นที่ได้กราฟของน้ำและเอทานอลที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ	
0.5 ไมโครลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ในครั้งที่ 1.....	34
ตารางที่ ก.2 พื้นที่ได้กราฟของน้ำและเอทานอลที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ	
0.5 ไมโครลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ในครั้งที่ 2.....	34
ตารางที่ ก.3 พื้นที่ได้กราฟของน้ำและเอทานอลที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ	
0.5 ไมโครลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ในครั้งที่ 1.....	35
ตารางที่ ก.4 พื้นที่ได้กราฟของน้ำและเอทานอลที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ	
0.5 ไมโครลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ในครั้งที่ 2.....	35
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลปริมาตรเอทานอล (ร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร) และพื้นที่ได้กราฟจากเครื่อง ก๊าซโครมาโตกราฟ.....	40
ตารางที่ ค.2 ข้อมูลปริมาตรน้ำ และพื้นที่ได้กราฟจากเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ.....	41
ตารางที่ ง.1 ภาวะของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ.....	43

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 สมบัติในการเลือกสารที่เข้าทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์.....	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ.....	6
รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับ.....	9
รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ 6 ชนิด ตามการจำแนกของ IUPAC.....	13
รูปที่ 2.5 ลักษณะของไอโซเทอมแบบเลงเมียร์ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง.....	15
รูปที่ 2.6 ลักษณะของไอโซเทอมแบบฟรอยดลิตซ์.....	16
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับอุณหภูมิ.....	18
รูปที่ 4.1 เส้นโค้งการดูดซับน้ำออกจากเอทานอลโดยใช้ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึก ของสารผลิตภัณฑ์ต่างกัน.....	25
รูปที่ ค.1 กราฟมาตรฐานของเอทานอล.....	40
รูปที่ ค.2 กราฟมาตรฐานของน้ำ.....	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นและมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นทุกวันและราคาของเชื้อเพลิงมีราคาสูง ดังนั้นในปัจจุบันนี้จึงได้มีการหาพลังงานทดแทนเพื่อนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงที่มีราคาสูงและมีจำนวนลดน้อยลงเรื่อยๆ การใช้เอทานอลจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะเอทานอลสามารถแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ โดยนำเอทานอลผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงขับเคลื่อนเครื่องยนต์ ทั้งนี้เพราะน้ำมันเบนซินผสมเอทานอลเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากช่วยเพิ่มค่าออกเทน ลดการใช้สารตะกั่วและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ก่อให้เกิดมลภาวะในอากาศ ดังนั้นในอนาคตแนวโน้มการนำเอทานอลไปใช้จะเพิ่มสูงขึ้น

เอทานอลยังถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้ในการผลิตยาและเครื่องสำอาง ใช้ผลิตเครื่องดับที่มีแอลกอฮอล์ สุรา ใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ และใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป เอทานอลสามารถสังเคราะห์ได้จากการแปรรูปพืชจำพวกแป้งและน้ำตาลรวมทั้งเซลลูโลสโดยผ่านกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น อ้อย ข้าว ข้าวฟ่าง ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งวัสดุทางการเกษตรเหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายภายในประเทศ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาผลผลิตทางการเกษตรล้นตลาดได้บางส่วนอีกด้วย โดยปกติเอทานอลที่ได้จากกระบวนการหมักจะมีความเข้มข้นของเอทานอลประมาณร้อยละ 6-10 โดยปริมาตรเท่านั้น ที่เหลือโดยส่วนใหญ่เป็นน้ำ จากนั้นต้องนำไปผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในรูปของน้ำมันเชื้อเพลิง [1] ปัจจุบันกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลหลังผ่านกระบวนการหมักนั้นใช้การกลั่น ซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการกลั่นจะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร เพราะจุดอะซีโอโทรป (Azeotrope) ของสารละลายเอทานอล-น้ำอยู่ที่ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ซึ่งยังไม่บริสุทธิ์เพียงพอต่อการนำไปผลิตเชื้อเพลิงทดแทนที่ต้องการความเข้มข้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการอื่นเพื่อทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ขึ้นต่อไป กระบวนการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์ทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้วิธีการกลั่นแบบอะซีโอโทรป (Azeotropic Distillation) โดยการเติมสารเคมีตัวที่สามลงไปเปลี่ยนสมมูลไอของสารละลาย เป็นการเลื่อนจุดอะซีโอโทรปทำให้สามารถกลั่นเอทานอลได้ความเข้มข้นสูงขึ้นคือร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร สารที่นิยมเติมลงไปในการกลั่นแบบอะซีโอโทรป ได้แก่ เบนซิน และเฮกเซน แต่เนื่องจากวิธีการนี้จะต้องใช้พลังงานสูงถึง 6-9 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอล อีกทั้งสารเคมีตัวที่สามที่ใช้ยังเป็นสารที่ก่อให้เกิด

มะเร็งและเป็นพิษอีกด้วย [2] อีกวิธีหนึ่งคือ การใช้กระบวนการเพอร์เวปอเรชัน (Pervaporation) เป็นกระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรน วิธีนี้จะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้เมมเบรนที่เหมาะสมซึ่งเมมเบรนที่ใช้จะต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นวิธีที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่งคือ การใช้กระบวนการดูดซับ เนื่องจากเป็นกระบวนการแยกที่ใช้พลังงานต่ำ และตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้อีก โดยการคืนสภาพด้วยกระบวนการให้ความร้อนหรือวิธีอื่นเพื่อทำให้เกิดการคายซับ (Desorption) ดังนั้นในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการใช้ซีโอไลต์เอซึ่งเป็นตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยเพื่อดูดซับน้ำออกจากเอทานอล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาแนวทางในการใช้ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยเป็นตัวดูดซับน้ำสำหรับกระบวนการแยกน้ำออกจากเอทานอล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำจากเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 0 และ 27 องศาเซลเซียส โดยใช้ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถใช้ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขานอ้อยเป็นตัวดูดซับน้ำจากเอทานอลทำให้สารละลายเอทานอลมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น
2. เป็นการเพิ่มมูลค่าและลดภาระการฝังกลบของเถ้าลอยขานอ้อยจากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล

บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วย อะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปทรงสี่หน้า โดยอะตอมของซิลิกอนอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของ ออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างรูปทรงสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์มีลักษณะ เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและมีช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติขนาด ตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม ($1 \text{ อังสตรอมเท่ากับ } 1 \times 10^{-10} \text{ เมตร}$)

นอกจากซิลิกอนและออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวก ของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เก้ากันอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำ เป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก ซึ่งสามารถดัดให้เดือดระเหยออกไปได้ [3]

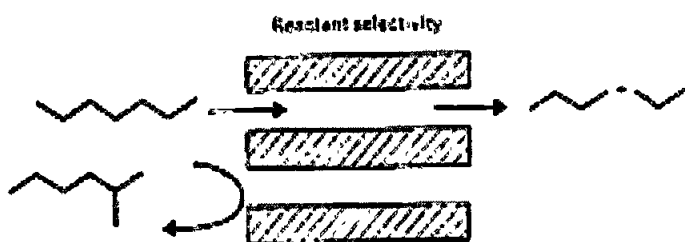
2.1.1 สมบัติของซีโอไลต์ [4]

(1) มีโครงสร้างเป็นผลึกและมีรูพรุนอยู่ภายใน

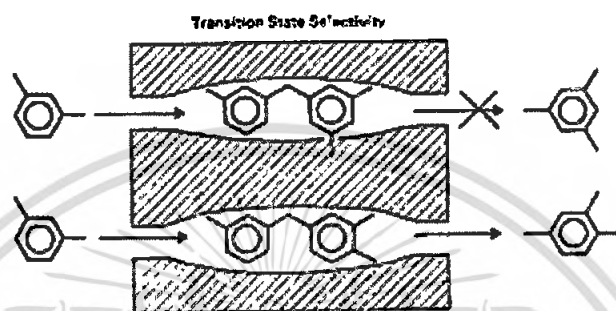
การที่โครงสร้างเป็นผลึกและมีรูพรุนอยู่ภายใน ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของสารมาก นอกจากนั้นรูพรุนขนาดเล็กยังทำหน้าที่คล้ายหม้อปฏิกรณ์ระดับโมเลกุล ซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำที่รุนแรงกับ โมเลกุลของสาร

(2) มีสมบัติในการเลือกสารเข้าออกเพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมี

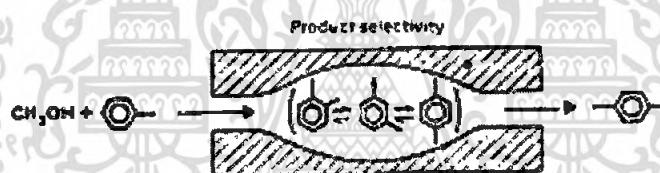
ซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนขนาดหนึ่งจะสามารถเลือกทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของสาร ที่มีขนาดเหมาะสมเท่านั้น โมเลกุลที่มีขนาดไม่เหมาะสมจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ การที่ซีโอไลต์มีขนาดและรูปร่างของรูพรุนที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวทำให้ ซีโอไลต์มีสมบัติพิเศษในการเร่งปฏิกิริยาเคมี คือสามารถเลือกสารตั้งต้นให้เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ ถ้าสารตั้งต้นมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนจะไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนได้ การเลือกโมเลกุล ดังกล่าวสามารถเลือกได้ทั้งสารตั้งต้น สารมัธยันตร์ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1 นอกจากนี้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ก็มีผลต่อปฏิกิริยาเช่นกัน รูปที่ 2.1 (ก)-(ค) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดสารผลิตภัณฑ์แล้ว สารที่มีรูปร่างเหมาะสมเท่านั้นจึงสามารถผ่านออกมาจากรูพรุนของ ซีโอไลต์ได้ ส่วนสารที่มีกิ่งก้านมากจะติดอยู่ภายในรูพรุน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.1 สมบัติในการเลือกสารที่เข้าทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ [5]

(ก) ความเฉพาะเจาะจงกับสารตั้งต้น (Reactant Selectivity)

(ข) ความเฉพาะเจาะจงกับสารผลิตภัณฑ์

(ค) ความเฉพาะเจาะจงกับสารมัธยันตร์

(3) ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เร็วขึ้น

เนื่องจากซีโอไลต์ช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปในทิศทางที่มีพลังงานก่อกัมมันต์ลดลง ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น

(4) สามารถปรับเปลี่ยนสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้

- ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเป็นกรด (Acid Zeolite)
- ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเป็นเบส (Basic Zeolite)
- ซีโอไลต์ที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชันอยู่ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5) ทนต่อความร้อน และการเปลี่ยนแปลงความดัน

เนื่องจากซีโอไลต์มีลักษณะเป็น โครงข่ายสามมิติและมี โครงสร้างรูพรุนที่หนาแน่น ทำให้สามารถทนต่อความร้อน โดยเฉพาะซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูงจะมีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่ำ

2.1.2 ประโยชน์ของซีโอไลต์ [3]

การใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์จะถูกกำหนดด้วยสมบัติพื้นฐานในระดับ โมเลกุลของสาร ซึ่งมีอยู่ 4 ด้านหลักๆ ด้วยกัน ได้แก่

(1) ตัวแลกเปลี่ยนประจุ

การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ เนื่องจากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์นั้นจะเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ จึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นที่อยู่ในสารละลายได้ ด้วยหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ เช่น ในอุตสาหกรรมการซักฟอก โดยโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์ จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นสาเหตุทำให้น้ำกระด้าง ทำให้เป็นการลดแรงตึงผิวของน้ำ และมีการนำซีโอไลต์มาใช้ลดความกระด้างของน้ำ แทนฟอสเฟตในผงซักฟอก เนื่องจากฟอสเฟตนั้นถือว่าเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

(2) ตัวดูดซับ

การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับจะใช้ในกระบวนการทำให้แห้ง การทำให้บริสุทธิ์ และการแยกสาร ซึ่งซีโอไลต์นั้นมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่าง อันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล โดยสามารถเลือกให้มีการดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการทำให้แห้งนั้น เนื่องจากซีโอไลต์ที่มีประจุบวกสามารถดูดซับน้ำได้ดีเป็นพิเศษและสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ กล่าวคือ เมื่อมีการให้ความร้อน น้ำก็จะระเหยออกไปหมด และเมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้ง ก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก หรืออาจนำไปใช้ดูดซับสารอินทรีย์แทน เช่น ก๊าซ ไอโอดีน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย แบบย้อนกลับได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังใช้ในการแยกก๊าซ ซึ่ง โมเลกุลของก๊าซต่างชนิดจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตกับไอออนโลหะ ในทางกลับกัน ซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ แต่จะดูดซับเฉพาะ โมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น

(3) ตัวเร่งปฏิกิริยา

การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะใช้มากในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น ในปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน การเกิดอะโรแมติก การเปลี่ยนไอโซเมอร์ เป็นต้น ในแต่ละปีประเทศไทยต้องนำเข้าตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมีปีละกว่าพันล้านบาท และกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของตัวเร่งปฏิกิริยานี้คือ ซีโอไลต์ เพราะซีโอไลต์จะอยู่ในรูปของแข็งที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีความคงทน และนำกลับมาใช้ได้ง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซ ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานและเป็นมิตรกับธรรมชาติ

(4) สารคัดแยกโมเลกุล

การใช้ซีโอไลต์เป็นสารคัดแยกโมเลกุล เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์มีขนาดของรูพรุนหรือช่องว่างที่สม่ำเสมอและมีระเบียบจำนวนมาก จึงทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นสารคัดแยกโมเลกุล ซึ่งแตกต่างจากสารดูดซับตัวอื่นที่มีขนาดรูพรุนไม่สม่ำเสมอ เช่น ซิลิกาเจล ถ่านกัมมันต์ และอะลูมินา เป็นต้น จะมีขนาดรูพรุน 3.8-10 อังสตรอมขึ้นอยู่กับชนิดของแคลทไอออนและโครงสร้างผลึก รูพรุนดังกล่าวจะทำหน้าที่กักกรอง โดยยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าผ่านไปได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสารดูดซับอื่นแล้วซีโอไลต์จะมีคุณสมบัติเฉพาะที่เลือกให้โมเลกุลบางขนาดเท่านั้นผ่านไปได้ เพราะทุก ๆ ช่องเปิดมีขนาดเดียวกันหมดและดูดซับโมเลกุลอื่น ๆ ได้ คุณสมบัตินี้สามารถนำไปใช้ในการแยกสารบางอย่างออกจากกันได้ โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างโมเลกุล

2.1.3 ซีโอไลต์ (ตัวดูดซับ) ที่ใช้ในงานวิจัย

ซีโอไลต์เอ [6] มีโครงสร้างที่เกิดจาก polyhedral 2 ชนิด ประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างซีโอไลต์เอ ชนิดแรกคือ ลิเทียมลูกบาศก์ เกิดจากการจัดตัวของเตตระฮีดรอล $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 8 โมเลกุล และ polyhedral ชนิดที่สอง คือ ออกเตดราฮีดรอลเกิดจากการจัดตัวของเตตระฮีดรอล 24 โมเลกุล ซึ่งเรียกว่า β -cage ที่มีขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.6 อังสตรอม และ α -cage มีขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.4 อังสตรอม ทำให้มีช่องเปิดขนาด 4.1 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ [6]

2.2 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ คือ กระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารหนึ่งยึดติดอยู่กับผิวของสารอีกสารหนึ่ง สารที่ไปยึดเกาะอยู่ผิวหน้าเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ตัวถูกดูดซับไปเกาะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ปริมาณการดูดซับจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเข้าถึงเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็น ข้อใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ พื้นผิวและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ การดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีนิยมนำใช้ในการแยกสารหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น

2.2.1 ประเภทของการดูดซับ [7-9]

การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

(1) การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับประเภทนี้แรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Forces) เป็นต้น โดยที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม ระหว่างกระบวนการดูดซับทางกายภาพตัวถูกดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง การดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเอง องค์ประกอบหลักของการดูดซับทางกายภาพ คือ ธรรมชาติของสาร แรงระหว่างผิวสัมผัส และความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ และเป็นกระบวนการคายความร้อน อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะถูกจำกัดโดยอัตราการเคลื่อนที่ของมวลในวัฏภาคก๊าซหรือในตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะสูงเมื่อก๊าซมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

ลักษณะการเกาะจับด้วยแรงทางกายภาพเกิดจากผล 3 อย่าง คือ

1. เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่
2. เกิดจากหลักการที่ว่าโมเลกุลที่ไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มาอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะแบบเดียวกันเข้ามาจะเกิดแรงดึงดูดกัน แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงอ่อนๆ ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลที่ไม่มีขั้วทั้งคู่
3. เกิดจาก โมเลกุลมีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงกันข้ามแล้วเกิดแรงดึงดูดกัน ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้วและ โมเลกุลไม่มีขั้ว

(2) การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้จะเกี่ยวข้องกับแรงหรือพันธะทางเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยา แรงที่เกิดขึ้นจะมากกว่าแรงในการดูดซับทางกายภาพ การเกาะของตัวถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับจะเหมือนแรงที่ใช้ยึดเหนี่ยวกันระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล บางครั้งต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วย การดูดซับทางเคมีขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่สามารถทำการดูดซับได้ ธรรมชาติของการ

ดูดซับสามารถศึกษาได้จากความสามารถในการเข้าสู่สมดุลของโมเลกุลที่เกี่ยวข้อง สมดุลของการดูดซับที่อ้างอิงจากหลักการทางอุณหพลศาสตร์ คือ อัตราของโมเลกุลถูกดูดซับที่ผิวเท่ากับอัตราที่โมเลกุลนั้นถูกปลดปล่อยออกมา การอธิบายปรากฏการณ์ในการดูดซับนิยมใช้สมมติฐานเกี่ยวกับระบบสมดุลของก๊าซ - ของเหลวเป็นพื้นฐาน

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ

1. การดูดซับทางเคมีที่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Activated Chemisorption) การดูดซับลักษณะนี้ อัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามสมการของอาร์เรเนียส ($k_p e^{-E/RT}$)

2. การดูดซับทางเคมีที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Nonactivated Chemisorption) การดูดซับลักษณะนี้ อัตราเร็วในการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าพลังงานกระตุ้นต่ำ

โดยทั่วไปแล้วการเกิดการดูดซับทางเคมีในช่วงเริ่มต้นมักจะเป็นการดูดซับที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น หลังจากนั้นกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลงและมักจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความสามารถของตัวดูดซับในการที่จะดูดซับสาร โมเลกุลเล็กหรือตัวถูกดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ คือ

1. ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหล (C_L)
2. ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของแข็ง (C_S)
3. อุณหภูมิของระบบ

ซึ่งถ้าปัจจัยตัวใดตัวหนึ่งคงที่แล้วสามารถนำอีก 2 ตัวที่เหลือมาเขียนกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่ภาวะสมดุลได้ การดูดซับในระบบองค์ประกอบเดี่ยว (Single Component Adsorption) สำหรับระบบของการดูดซับก๊าซ (Gas Adsorption) อาศัยสมมติฐานเบื้องต้นดังนี้ ก๊าซในระบบจะประพฤติตัวเหมือนก๊าซอุดมคติ โมเลกุลที่มีความเข้มข้นต่ำจะถูกดูดซับทั่วผิวของตัวดูดซับ ไม่มีการรวมตัวกันระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้นของวัฏภาคของไหลจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของวัฏภาคของแข็ง

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่มีการถ่ายเทหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน สามารถผันกลับได้ในภาวะอุณหภูมิเดียวกัน แต่การดูดซับทางเคมีจะผันกลับไม่ได้

2. การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับไม่มีบริเวณจำเพาะ ในการเกิดกระบวนการดูดซับภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้นได้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น และโดยทั่วไปการดูดซับทางเคมีจะเกิดแบบชั้นเดียวเท่านั้น

3. ความร้อนที่ได้รับจากการดูดซับทางกายภาพจะน้อยกว่าการดูดซับทางเคมี

2.2.2 กลไกการดูดซับ [10]

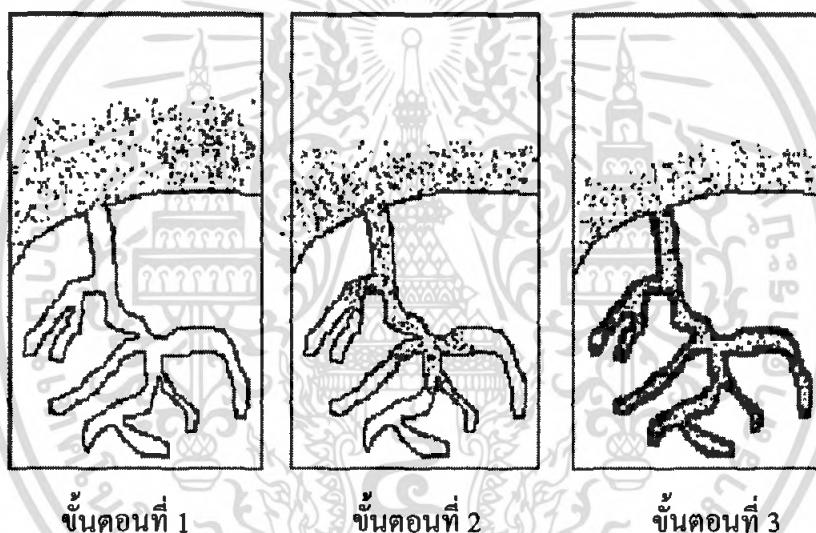
โดยทั่วไปการดูดซับจะเกิดขึ้นผ่าน 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังรูปที่ 2.3

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ไปยังผิวของตัวดูดซับ (Diffusion to Adsorbent Surface) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านจาก bulk phase ไปยังผิวด้านนอกของอนุภาคของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การผ่านเข้ารูพรุนของตัวดูดซับ (Migration into Pores of Adsorbent) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวด้านนอกซึ่งมีพื้นที่น้อยไปยังรูพรุนภายในอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า และการดูดซับเกือบทั้งหมดจะยึดติดอยู่ภายในรูพรุน

ขั้นตอนที่ 3 การดูดซับชั้นเดียวของตัวดูดซับอย่างรวดเร็ว (Monolayer Build up of Adsorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะยึดติดอยู่ที่ผิวภายในรูพรุน

กลไกขั้นตอนที่ 3 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก เร็วกว่าขั้นตอนที่ 1 และ 2 ดังนั้นกลไกขั้นตอนที่ 1 และ 2 จึงเป็นกระบวนการที่ควบคุมการดูดซับ



รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับ [10]

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [11]

(1) ขนาดของตัวดูดซับ

ถ้าตัวดูดซับเป็นชนิดไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าตัวดูดซับเป็นชนิดที่มีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

(2) พื้นที่ผิวและ โครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของ โมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของ โมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการ

ดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับ ความสามารถของตัวดูดซับจะต่ำลง

(3) ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ

การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายและไปเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น ในกรณีที่สารละลายมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นการยากต่อการดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมักสามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตาม ค่ากล่าวข้างต้นไม่ได้จริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก

(4) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารที่เป็นตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ และจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

(5) ความมีขั้วของโมเลกุล

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายมากขึ้น

(6) ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะไฮโดรเนียมไอออน (H^+) เพิ่มขึ้น และ H^+ ยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลาง (Neutralize) เสมอ เนื่องจากคาร์บอนเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้วของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวของคาร์บอนได้ดี

(7) อุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.2.4 ตัวดูดซับ [12]

ตัวดูดซับสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. ตัวดูดซับแบบไม่มีขั้ว (Non-polar Adsorption) จะเกิดการดูดซับทางกายภาพ

ตัวดูดซับที่สำคัญของกลุ่มนี้ คือ คาร์บอนกัมมันต์

2. ตัวดูดซับแบบมีขั้ว (Polar Adsorption) การดูดซับที่เกิดขึ้นกับสารประเภทนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลและผิวของตัวดูดซับ ได้แก่ พวกรอกไซด์ เช่น ออกไซด์ของซิลิกา และออกไซด์ของโลหะ วัสดุจำพวกซิลิกา ได้แก่ ซิลิกาเจล ฟลูเลอร์เอิร์ธ (Fuller's Earth)

3. ตัวดูดซับประเภทที่อาศัยปฏิกิริยาเคมี ตัวดูดซับนี้จะมีผิวหน้าที่ดูดซับทางเคมี โดยทั่วไปตัวดูดซับที่ใช้ ได้แก่ โคลโลไมด์ คาร์บอนกัมมันต์ อัลคาไลน์อะลูมินา ซิลิกาเจลกัมมันต์ และเมงกานีสออกไซด์กัมมันต์

2.2.5 การจำแนกขนาดของรูพรุน [13]

จากการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างและขนาดของรูพรุน พบว่ามีหลายลักษณะแตกต่างกันของแข็งบางชนิดอาจจะมีรูพรุนขนาดเล็กเท่ากับขนาดโมเลกุล หรือเพียง 2-3 อังสตรอม แต่บางชนิดอาจมีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นล้านๆ อังสตรอมก็ได้ Dubinin ได้จำแนกขนาดของรูพรุนโดยอาศัยสมบัติด้านการดูดซับและการควบแน่นในรูพรุน การจัดแบ่งตามลักษณะนี้ต่อมาได้รับการยอมรับจากที่ประชุม The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) และถือเป็นมาตรฐานสากลดังนี้

ตารางที่ 2.1 การจัดแบ่งขนาดรูพรุนตามมาตรฐานสากล [13]

ชื่อรูพรุน	ความกว้างของรูพรุน
รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore)	น้อยกว่า 20 อังสตรอม
รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore)	ระหว่าง 20-500 อังสตรอม
รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore)	มากกว่า 500 อังสตรอม

ตัวเลขที่บอกขนาดรูพรุนในตารางเป็นค่าประมาณ ทั้งนี้ด้วยเหตุว่าความกว้างของรูพรุนที่จัดแบ่งมักจะมีปัญหาในการตัดสินใจว่าเป็นรูพรุนประเภทใด ปกติจะใช้สมบัติด้านการดูดซับประกอบการพิจารณา ตัวอย่างเช่น รูพรุนขนาด 20 อังสตรอม ที่คิดเกี่ยวไปมาและมีการเชื่อมโยงกับรูพรุนอื่นจะมีแรงดูดซับมากกว่ารูพรุนขนาดเดียวกันที่ตรงและไม่มีการเชื่อมโยงกับรูพรุนอื่น รูพรุนกรณีแรกจัดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก และกรณีหลังจัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง

2.2.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) [14-16]

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยของตัวถูกดูดซับ โดยมักใช้ค่าความสัมพันธ์ P/P_0 กับปริมาณที่ดูดซับที่สมดุลเมื่ออุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมของการดูดซับมีค่าเริ่มจากศูนย์เมื่อ $P/P_0 = 0$ จนถึงอนันต์เมื่อ $P/P_0 = 1$ ซึ่งเป็นจุดที่ผิวหน้าเปียกอย่างสมบูรณ์ นั่นคือการเกิดการควบแน่นของไอของโมเลกุลที่มาดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพมีความหลากหลาย ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ ในปี ค.ศ. 1945 Brunauer ได้จำแนกชนิดของไอโซเทอมเป็น 5 ชนิด คือ ชนิดที่ 1-5 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งชื่อที่เรียกเป็นไปตาม IUPAC ส่วนไอโซเทอมแบบที่ 6 เพิ่งเป็นแบบที่ค้นพบใหม่

ชนิดที่ 1 เรียกว่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) สำหรับการดูดซับที่ถือว่าเป็นชั้นเดียว ตามสมการของแลงเมียร์ (Langmuir Equation) ไอโซเทอมแบบนี้มักจะพบในวัสดุที่มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ เช่น ซีโอไลต์ หรือถ่านกัมมันต์บางชนิด ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่ กรณีเช่นนี้ปริมาณของรูพรุนจะมีค่ามากกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดการดูดซับชั้นเดียวมาก การดูดซับแบบนี้จะพบได้ในการดูดซับที่ย้อนกลับได้

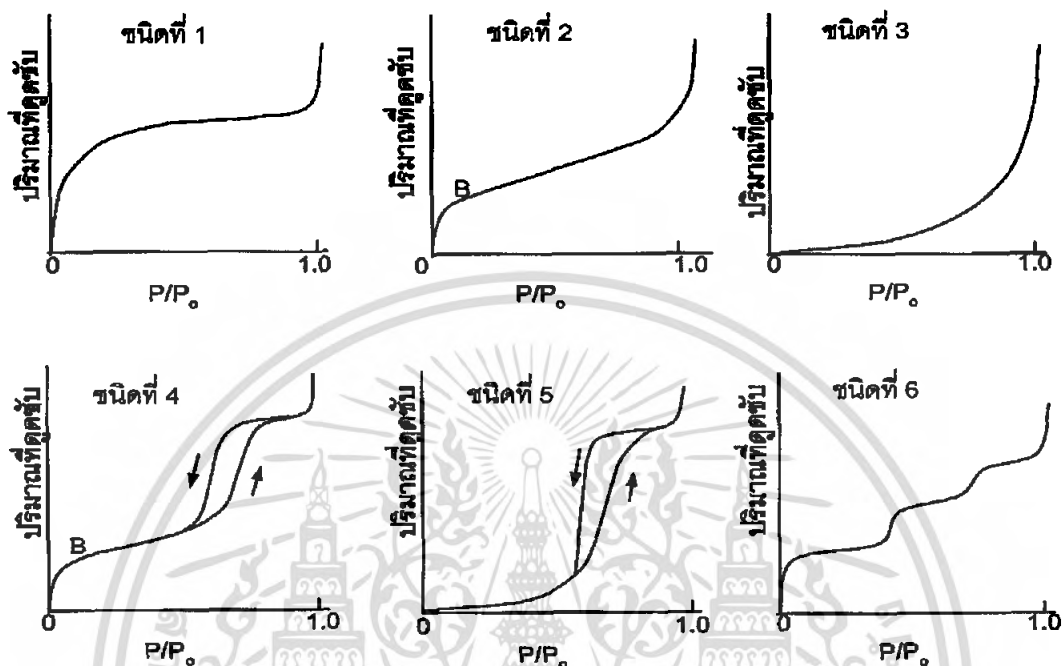
ชนิดที่ 2 บางครั้งจะเรียกว่า Sigmoid หรือไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-Shaped Isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่หรือมาโครพอร์ส (Macroporous) ตำแหน่ง B ซึ่งเป็นคล้ายหัวเข้าเป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมด้วยชั้นเดียวแล้ว หลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น ดังนั้นปริมาณการดูดซับที่จุด B จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ การดูดซับแบบนี้ย้อนกลับได้

ชนิดที่ 3 มีรูปร่างเหมือนกระจกแก้ว และไม่มีตำแหน่งเหมือนหัวเข้า ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อย จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อน เกิดเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ เช่น การดูดซับของสารที่มีขั้วบนวัสดุที่ไม่มีขั้ว หลังจากที่มีผิวหน้าถูกคลุมหมดแล้ว การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงแรงดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกันเองมีสูง ตัวอย่างการดูดซับแบบนี้ได้แก่ การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์

ชนิดที่ 4 มักจะพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบมีโซพอร์ส (Mesopore) คือ มีขนาดของรูพรุนระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร การดูดซับในช่วงแรกซึ่งมีค่า P/P_0 ต่ำ จะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า P/P_0 มาก ซึ่งเกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบกะปิลารี ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส ซึ่งเกิดจากเส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายซับไม่ทับกัน เพราะการคายซับเกิดได้ยากกว่าเพราะต้องเอาชนะแรงกะปิลารี ขนาดของการเกิดการควบแน่นในรูขนาดเล็กสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายของขนาดของรูพรุน (Pore-size Distribution) ได้

ชนิดที่ 5 เหมือนกับชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุนในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า P/P_0 สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ ส่วนฮิสเทอรีซิสจากการดูดซับและการคายซับก็เกิดจากการเอาชนะแรงกะปิลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ไอโซเทอมชนิดนี้พบบ่อยน้อย

ชนิดที่ 6 เรียกว่าเป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) ซึ่งพบได้ไม่บ่อยนัก เกิดจากการดูดซับที่ละชั้นบนผิวหน้าที่มีหลายชั้นและความเป็นระเบียบสูง ความชันของเส้นกราฟจะขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ 6 ชนิด ตามการจำแนกของ IUPAC [14]

(1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ เป็นแบบจำลองที่มีการนำไปประยุกต์มากที่สุดกับการดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิคงที่ เนื่องจากเข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อน อาศัยข้อสมมติฐานว่า

1. การดูดซับ โมเลกุลของก๊าซจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ บนผิวหน้าจนกระทั่งเต็ม แต่จะเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) คือ แต่ละตำแหน่งจะสามารถรับ โมเลกุลที่มาเกาะได้เพียงโมเลกุลเดียว

2. การดูดซับจะไม่เกิดการเคลื่อนย้าย (Localize)

3. ความร้อนของการดูดซับ (Differential Energy of Adsorption) ไม่ขึ้นกับเศษส่วนของผิวหน้าที่ไม่ว่าง (Surface Coverage) หมายความว่า โอกาสของการดูดซับทุกตำแหน่งบนผิวหน้าของของแข็งจะเหมือนกันหมด ไม่มีแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงกัน และพลังงานของโมเลกุลที่มาดูดซับหรือโอกาสที่เกิดการดูดซับขึ้นบนตำแหน่งที่ว่างจะไม่ขึ้นกับว่าที่ตำแหน่งข้างเคียงจะมีโมเลกุลมาเกาะอยู่หรือไม่

$$\text{ถ้ากำหนดให้} \quad \theta = \frac{q}{q_m} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ q = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล
(มิลลิกรัม/กรัม)

q_m = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่ภาวะอิ่มตัว
(มิลลิกรัม/กรัม)

θ = สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกตัวถูกดูดซับเกาะแล้วต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับทั้งหมด

อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_a = k_a C(1-\theta) \quad (2.2)$$

เมื่อ k_a = ค่าคงที่ของการดูดซับ (1/นาที)

C = ค่าความเข้มข้นที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_d = k_d \theta \quad (2.3)$$

เมื่อ k_d = ค่าคงที่ของการคายซับ (มิลลิกรัม/ลิตร×นาที)

ที่ภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ ดังนั้น

$$k_a C(1-\theta) = k_d \theta \quad (2.4)$$

$$\theta = \frac{k_a C}{(k_d + k_a C)} \quad (2.5)$$

ถ้ากำหนดให้

$$K_A = \frac{k_a}{k_d} \quad (2.6)$$

จะได้สมการ

$$q = \frac{q_m K_A C}{1 + K_A C} \quad (2.7)$$

จัดรูปให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

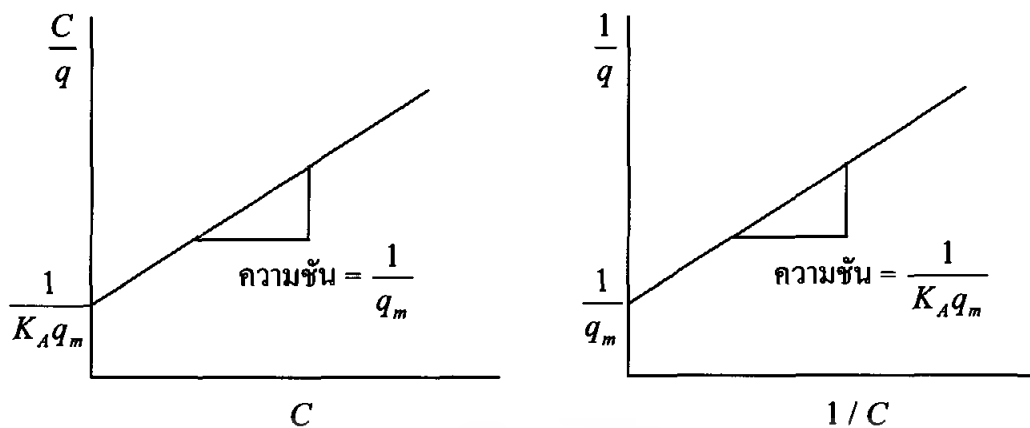
$$\frac{C}{q} = \frac{1}{K_A q_m} + \frac{C}{q_m} \quad (2.8)$$

หรือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{K_A q_m} \right) \frac{1}{C} \quad (2.9)$$

ค่า q_m และค่า K_A สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนของกราฟรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ยังมีข้อบกพร่อง เนื่องจากในการดูดซับที่เกิดขึ้นจริงเกิดแรงผลักดันระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียง และการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียวตลอดช่วงของการดูดซับทั้งหมด

(2) ไอโซเทอมแบบฟรอยดลิช (Freundlich Isotherm)

ทฤษฎีของฟรอยดลิช มีสมมติฐานดังนี้

1. ความร้อนของการดูดซับจะมีค่าลดลงเป็นลักษณะเส้นโค้งเมื่อปริมาณผิวหน้าที่ไม่ว่างมีค่าเพิ่มขึ้น

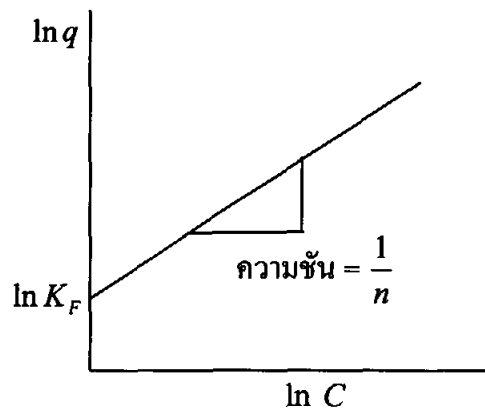
2. ไม่มีข้อจำกัดสำหรับค่าเศษส่วนของผิวหน้าที่ไม่ว่าง สามารถเขียนสมการการดูดซับของฟรอยดลิช ได้ดังนี้

$$q = K_f C^{1/n} \quad (2.10)$$

หรือ

$$\ln q = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.11) ถ้าเขียนกราฟระหว่าง $\ln q$ กับ $\ln C$ จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า K_f และ n ได้จากจุดตัดแกนและความชันของกราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของไอโซเทอมแบบฟรอยดลิจ

(3) ไอโซเทอมแบบบีอีที (BET Isotherm)

ทฤษฎีของบีอีที คือ ชั้นของการดูดซับ (Adsorbed Layer) สามารถก่อตัวแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ สามารถเกิดการดูดซับได้มากกว่าชั้นเดียว และมีการพิจารณาถึงแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลด้วย นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานเพิ่มเติม คือ จำนวนพื้นที่ผิวที่ว่างจะคงที่ในแต่ละภาวะสมดุล และอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความถี่ของการกระทบระหว่าง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

สำหรับการดูดซับในชั้นแรก อัตราการระเหยกลายเป็นไอมีค่าเท่ากับอัตราการควบแน่น และความร้อนของการดูดซับไม่ขึ้นอยู่กับผิวหน้าที่ไม่ว่าง

สำหรับการดูดซับบนชั้นอื่นๆ ที่ไม่ใช่ชั้นแรกนั้น อัตราการดูดซับจะแปรผันโดยตรงกับเศษส่วนผิวหน้าที่ว่าง อัตราการคายซับจะแปรผันตรงกับปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้ในชั้นนั้น และค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าเท่ากับค่าความร้อนในการกลายเป็นของเหลวของก๊าซที่ถูกดูดซับค้างสมการ

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (2.12)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับที่ความดัน P

V_m = ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับเพื่อเกิดชั้นการดูดซับแบบชั้นเดียว

P_0 = ความดันไออิ่มตัวของก๊าซที่อุณหภูมิที่ทำการศึกษา

C = ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $\exp [(q_1 - q_L)/RT]$ โดยที่ q_1 คือ ค่าความร้อนของการดูดซับในชั้นแรก และ q_L คือ ค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของก๊าซที่ถูกดูดซับ

2.2.7 อัตราการดูดซับ [17-18]

(1) แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง

สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_1 - q_t) \quad (2.13)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0 \longrightarrow t = t$
 $q_t = 0 \longrightarrow q_t = q_t$

$$\log(q_1 - q_t) = \log(q_1) - \frac{k_1}{2.303}t \quad (2.14)$$

- เมื่อ q_1 = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)
- q_t = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/กรัม)
- k_1 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/นาท)
- t = เวลา (นาท)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_1 - q_t)$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_1 ได้จากความชัน

(2) แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับสองสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_2 - q_t)^2 \quad (2.15)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0 \longrightarrow t = t$
 $q_t = 0 \longrightarrow q_t = q_t$

$$\frac{1}{(q_2 - q_t)} = \frac{1}{q_2} + k_2t \quad (2.16)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2q_2^2} + \frac{1}{q_2}t \quad (2.17)$$

- เมื่อ q_2 = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/กรัม)
- q_t = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/กรัม)
- k_2 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (1/นาท)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_2 ได้จากจุดตัดแกน y

(3) แบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับ

สมการแบบจำลองการแพร่ภายในตัวดูดซับสามารถเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ q_t = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัม/กรัม)
 k_t = Intraparticle differential rate constant (มิลลิกรัม/กรัม × นาที^{0.5})
 เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ k_t

2.2.8 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ [17-18]

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการดูดซับ พบว่าค่าคงที่อัตราขึ้นกับอุณหภูมิ ในปี ค.ศ.1889 เอส อาร์เรเนียส (S. Arrhenius) เป็นผู้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง k กับ T ดังนี้

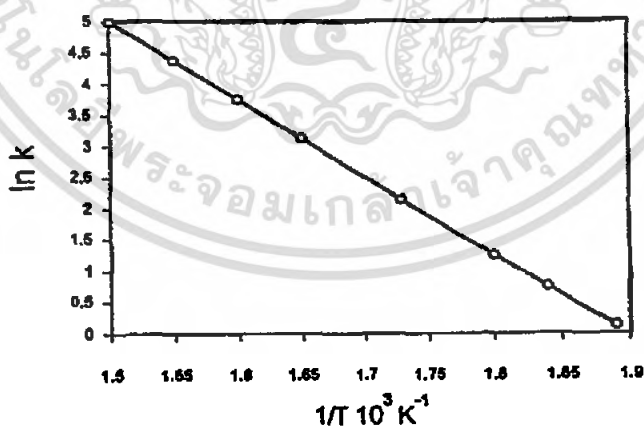
$$k = Ae^{-E_a/RT} \tag{2.19}$$

- เมื่อ A = แฟกเตอร์ความถี่ของการชน
- E_a = พลังงานกระตุ้น
- R = ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.3143 จูล/โมล×เคลวิน
- T = อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

เมื่อเขียนสมการ (2.19) ในรูปของลอการิทึม จะได้

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \tag{2.20}$$

นำสมการ (2.20) มาเขียนกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $\frac{1}{T}$ จะได้กราฟเส้นตรงตามรูป 2.7 สามารถหาค่า E_a ได้จากความชันของกราฟ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับอุณหภูมิ

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการดูดซับน้ำออกจากสารผสมเอทานอล-น้ำ ทั้งในภาวะก๊าซและของเหลวด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ เช่น Sowerby และ Crittenden [19] ได้เปรียบเทียบการดูดซับน้ำในสารผสมในภาวะก๊าซด้วย molecular sieves ชนิด 3A, 4A, 5A และ 10A โดยผลการทดลองพบว่า molecular sieves ชนิด 4A มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำได้ดีที่สุด และใช้พลังงานในการดำเนินการได้ต่ำสุด เนื่องจากขนาดรูพรุนของ molecular sieves ชนิด 4A ใหญ่กว่า 3A ทำให้น้ำถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้ง่ายกว่า สำหรับ molecular sieves ชนิด 5A และ 10A ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ เนื่องจากสารทั้งสองจะดูดซับทั้งโมเลกุลของน้ำและเอทานอลไปพร้อมกัน ทำให้สูญเสียเอทานอลบางส่วนไประหว่างการดูดซับ

Michasl และคณะ [20] ศึกษาการดูดซับน้ำในภาวะก๊าซโดยใช้ commeal เป็นตัวดูดซับน้ำในช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้พบว่าเอทานอลจะถูกดูดซับเป็นปริมาณที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ เมื่อผ่านการดูดซับจะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99.6 โดยปริมาตร

Georgia และคณะ [21] ศึกษาการดูดซับน้ำในสารผสมในภาวะของเหลว โดยใช้ตัวดูดซับที่ได้มาจากแป้งชนิดต่างๆ แต่งานวิจัยนี้ไม่ได้เน้นการผลิตเอทานอลให้มีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร เป็นเพียงการศึกษาปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อการดูดซับน้ำออกจากสารผสมเท่านั้น ซึ่งพบว่ายังไม่เหมาะในการนำมาใช้งานเนื่องจากมีความแข็งแรงทางกายภาพต่ำ

จิระเดช และวิทยา [2] ศึกษาการดูดซับไอน้ำออกจากสารผสมเอทานอล-น้ำในภาวะก๊าซด้วย Molecular Sieve ชนิด 4A ที่บรรจุไว้ใน Packed Column ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 50 เซนติเมตร และควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 85 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ จากเอทานอลเริ่มต้นที่มีความเข้มข้นร้อยละ 95.5 โดยปริมาตรที่ได้จากการกลั่น ผลการทดลองพบว่าความเร็วการไหลของไอผสมผ่านคอลัมน์ดูดซับที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า Breakthrough Time (t_b) ลดลง, ค่า Length of Unused Bed (LUB) และค่า Length of Mass Transfer Zone (LMTZ) จะมีค่าสูงขึ้น ความเร็วการไหลของไอผสมผ่านคอลัมน์ดูดซับไม่มีผลต่อค่าความจุในการดูดซับน้ำของ Molecular Sieve และจากการศึกษา Breakthrough Curve ทำให้ได้ข้อมูลทางวิศวกรรมที่ใช้ในการออกแบบและขยายขนาดคอลัมน์ดูดซับเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

อนุตร และพลกฤษต์ [22] ศึกษาการแยกเอทานอลออกจากน้ำโดยใช้สารละลายซิลิโคนเฮกเซนเคลือบบนโพลีซัลโฟนิเมมเบรน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลโดยกระบวนการเพอร์เวปพอร์เรชัน โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของเอทานอลในกระแสป้อน อุณหภูมิของกระแสป้อน และความเข้มข้นของสารละลายซิลิโคนเฮกเซนที่ใช้เคลือบเมมเบรน ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่แยกได้จะเพิ่มขึ้น และค่าเพอร์มิเอฟลักซ์

มากขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของเอทานอลในกระแสป้อนทำให้ได้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มากขึ้น และค่าการแยกลดลง

ธีรพัฒน์ และสนธยา [23] ศึกษาการแยกสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยกระบวนการดูดซับแบบ Pressure Swing Adsorption เป็นการศึกษาหลักการการทำงานของกระบวนการ Pressure Swing Adsorption และศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความดันที่ใช้ในการดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของวัฏจักรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยที่ชุดทดลอง Pressure Swing Adsorption จะประกอบด้วย Double Column และ Evaporator ใช้ Molecular Sieve Zeolite 3A ของบริษัท UOP เป็นตัวดูดซับ และใช้สารละลายเอทานอลร้อยละ 94-95 โดยปริมาตรเป็นสารป้อน โดยใช้ความดันในการดูดซับอยู่ในช่วง 2-4 บาร์ ความดันที่ใช้ในการคายซับ 0.2 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดำเนินการครึ่งวัฏจักร 3 และ 4 นาที จากผลการทดลองพบว่า เมื่อ Half Cycle Time เพิ่มขึ้น %Ethanol in Product ที่ได้จะเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาความดันที่ใช้ในคอลัมน์ดูดซับก็พบว่าเมื่อเพิ่มทำให้ %Ethanol in Product เพิ่มขึ้นด้วย แต่ใน Half Cycle Time หนึ่งๆจะมีความดันที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว โดยที่ Half Cycle Time 3 นาที ความดันในการดูดซับ 3 บาร์ สามารถให้ %Ethanol in product สูงที่สุดถึงร้อยละ 99.71 โดยปริมาตร

จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาการดูดซับนั้น ส่วนใหญ่จะศึกษาในภาวะก๊าซ ซึ่งยังมีผู้น้อยเกี่ยวกับการดูดซับของผสมในภาวะของเหลว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการดูดซับของสารละลายผสมเอทานอล-น้ำในภาวะของเหลว เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกระบวนการทำเอทานอลบริสุทธิ์ต่อไป

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 % โดยปริมาตร
2. น้ำกลั่น
3. อะซีโตน
4. สารตรวจสอบรอยรั่ว (liquid leak detector)
5. ก๊าซฮีเลียม
6. ถ้ำลอยของชาน้อยจาก โรงงานผลิตน้ำตาล
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Analytical grade, Merck)
8. โซเดียมอะลูมิเนต (Wako)
9. กรดไฮโดรคลอริก

3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ (SHIMADZU GC- 8A)
2. เครื่องปั่นกวนชนิดแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)
3. ขวดแก้วพร้อมฝา
4. ปิเปตพร้อมลูกยางแดง (Pipette & Bulb)
5. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า (Analytical Balance)
6. บีกเกอร์ (Beaker)
7. กระบอกตวง (Graduated Cylinder)
8. หลอดฉีดยา (Syringe)
9. หัวกรองไซริงค์ (Syringe Filter) เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มม. ขนาดรูพรุน 0.2 μm
10. พาราฟิล์ม (Parafilm)

3.3 การดำเนินการทดลอง

3.3.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของเอทานอลและน้ำ

กราฟมาตรฐานของเอทานอล

(1) นำเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร ปริมาณ 0.2 ไมโครลิตร ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ ทำซ้ำประมาณ 3 ครั้ง

(2) ทำซ้ำข้อ (1) แต่ใช้เอทานอลปริมาณ 0.5, 0.7 และ 1 ไมโครลิตร

(3) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานโดยพลอตความสัมพัทธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟกับน้ำหนักของเอทานอล

กราฟมาตรฐานของน้ำ

วิธีทำเหมือนกับการทำกราฟมาตรฐานของเอทานอล แต่เปลี่ยนจากเอทานอลเป็น น้ำกลั่น

3.3.2 การสังเคราะห์ซีไอไลต์เอ

(1) การสกัดซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าลอยของขานอ้อย

นำเถ้าลอยของขานอ้อยผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปั่นกวนที่อุณหภูมิในช่วง 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรอง (Whatman No. 41) และล้างเถ้าลอยของขานอ้อยด้วยน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อล้างเกลือออก ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ จนกระทั่งมี pH เท่ากับ 7 ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมง เกิดเป็น ซิลิกาเจล จากนั้นเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง แล้วนำไปเข้าเครื่องอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่ออบให้แห้ง ได้เป็นซิลิกา หลังจากนั้นนำของแข็งมาบดให้ละเอียดและกรองพร้อมกับล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

(2) การสังเคราะห์ซีไอไลต์เอ

ก. ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยน้ำกลั่น แบ่งเป็น 2 ขวด ในปริมาตรที่เท่ากัน

ข. ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากข้อ ก. กับ โซเดียมอะลูมิเนตพร้อมทั้งนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที

ค. ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อีกขวดที่เหลือจากข้อ ก. กับซิลิกาบริสุทธิ์ที่สกัดได้และโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมทั้งนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที

ง. ผสมสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ ข. และข้อ ค. จนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใส่ในขวดพอลิโพรพิลีนที่ปิดสนิท

จ. นำไปตกผลึกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง

ฉ. นำสารที่ได้ออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งมี pH ต่ำกว่า 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. นำของแข็งที่กรองได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 8 ชั่วโมง แล้วจึงได้ซีโอไลต์เอ

(3) การเตรียมซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้

นำซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ ไปอบที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์

3.3.3 การทดสอบการดูดซับน้ำจากเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร

ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส)

(1) เตรียมเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร จากเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร ปริมาณ 10 มิลลิลิตร

(2) แบ่งเอทานอลที่เตรียมได้มาปริมาณ 5 มิลลิลิตรใส่ในขวดแก้ว

(3) เติมซีโอไลต์เอปริมาณ 1 กรัม ลงในขวดแก้วเดียวกับข้อ (2)

(4) ปิดฝาขวดแก้วพร้อมกับหุ้มด้วยพาราฟิล์ม เพื่อป้องกันสารละลายเอทานอลระเหย

(5) นำขวดแก้วจากข้อ (4) มาทำการปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนชนิดแม่เหล็ก พร้อมทั้งเริ่มจับเวลา

(6) นำเอทานอลที่เหลืออีก 5 มิลลิลิตร มาปริมาณ 0.5 ไมโครลิตร ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ เพื่อวัดความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลและน้ำ

(7) เมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างในขวดแก้วมาประมาณ 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นกรองด้วยหัวกรองไซริงค์ จะได้สารละลายเอทานอลใส

(8) นำสารละลายเอทานอลใสจากข้อ (7) มาปริมาณ 0.5 ไมโครลิตร ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ เพื่อวัดความเข้มข้นของเอทานอลและน้ำใน 1 ชั่วโมงแรก

(9) เมื่อเวลาผ่านไปทุก 1 ชั่วโมง ทำซ้ำข้อ (7)-(8) จนกระทั่งความเข้มข้นของเอทานอลและน้ำไม่เปลี่ยนแปลง

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

วิธีการทดลองเหมือนกับการทดลองที่อุณหภูมิห้อง แต่ในข้อ (5) จะนำขวดแก้วที่ได้ไปใส่ในบีกเกอร์ขนาดใหญ่กว่าซึ่งภายในบรรจุน้ำแข็ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

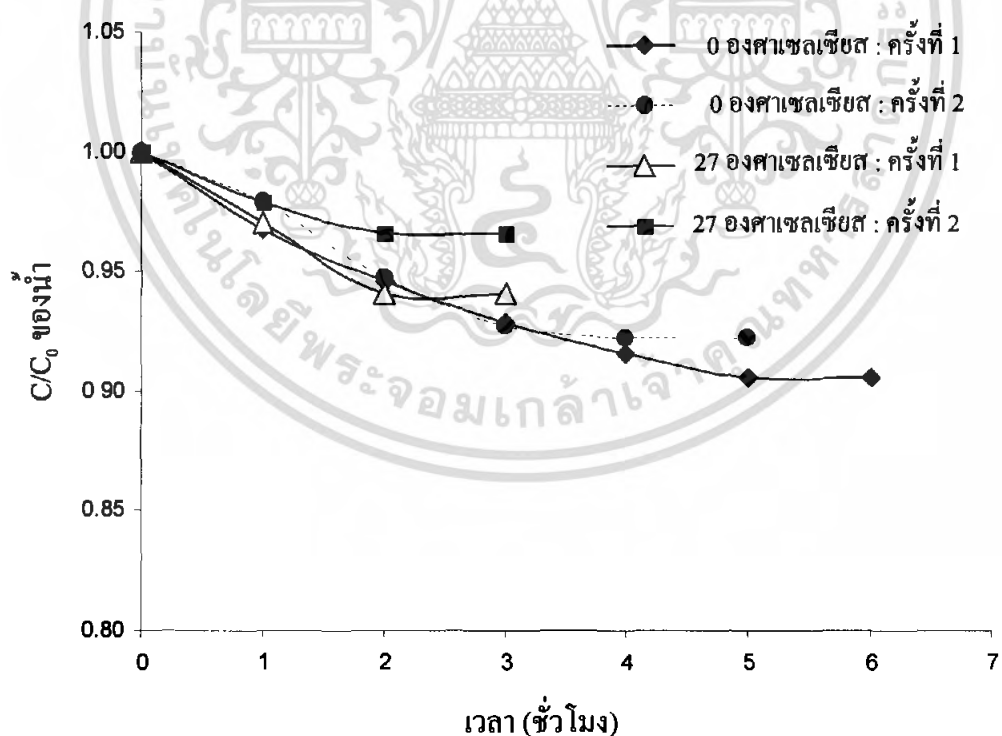
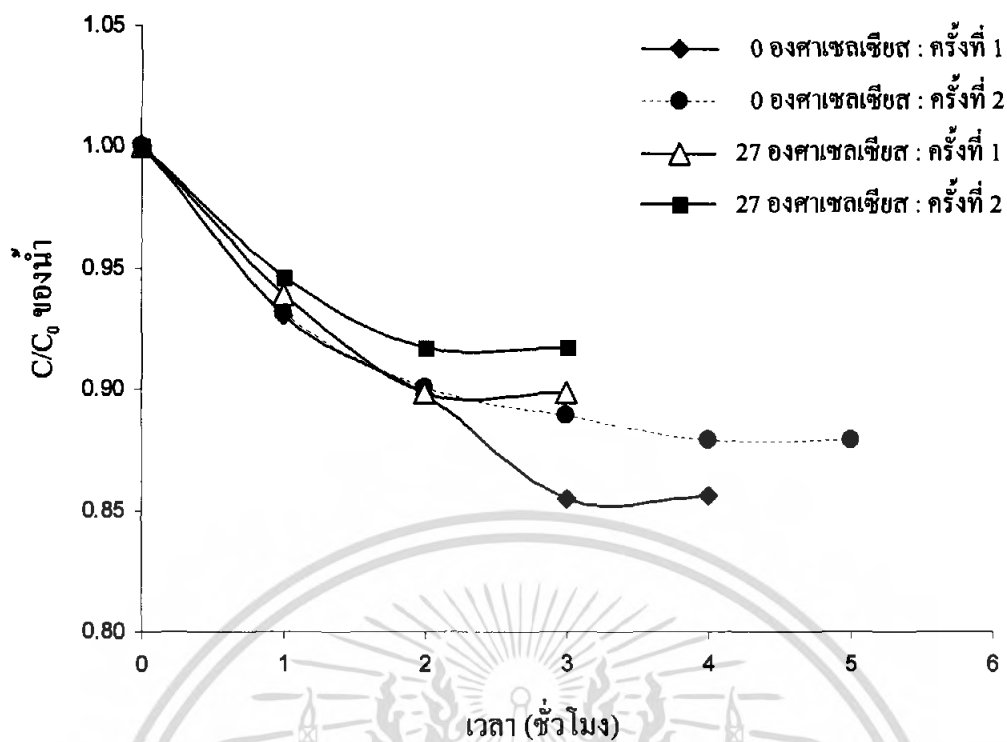
ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยขานฮ้อยที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งได้จากการเตรียมอย่างละ 2 ครั้ง จะถูกนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำออกจากเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 0 และ 27 องศาเซลเซียส ได้ผลดังนี้

ที่อุณหภูมิ 0 และ 27 องศาเซลเซียส พบว่าการดูดซับน้ำจะเกิดขึ้นดีในช่วงแรก และการดูดซับน้ำจะน้อยลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่เกิดการดูดซับ และเปรียบเทียบค่า C/C_0 (ความเข้มข้นสุดท้ายต่อความเข้มข้นเริ่มต้น) ของน้ำ จะพบว่า

ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.85 และในครั้งที่ 2 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.88 ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 4 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.91 และในครั้งที่ 2 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.92 และซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 6 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.97 และในครั้งที่ 2 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.95

และที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.90 และในครั้งที่ 2 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.92 ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 4 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.94 และในครั้งที่ 2 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.97 และซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 6 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.98 และในครั้งที่ 2 มีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.98

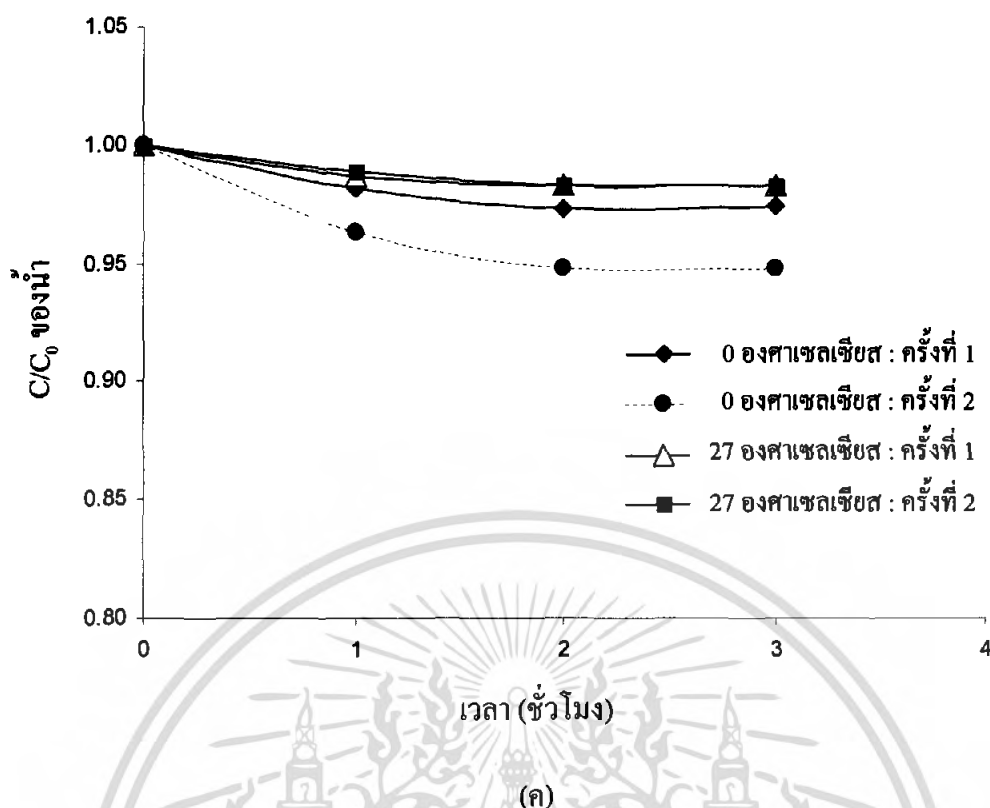
จากการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 0 และ 27 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะเกิดการดูดซับน้ำได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส และซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.85 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก)-(ค)



(ข)

รูปที่ 4.1 เส้นโค้งการดูดซับน้ำออกจากเอทานอลโดยใช้ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้นเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่ขอภาคีให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ของสารผลิตภัณฑ์เป็น (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 (ต่อ) เส้นโค้งการดูดซับน้ำออกจากเอทานอลโดยใช้ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น (ค) 6 ชั่วโมง

และความสามารถในการดูดซับน้ำยังสามารถแสดงได้ในรูปของปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ มีผลดังนี้

ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า q [ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) / ปริมาณตัวดูดซับ (1 กรัม)] เท่ากับ 36.4 และในครั้งที่ 2 มีค่า q เท่ากับ 30.1 ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 4 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า q เท่ากับ 23.6 และในครั้งที่ 2 มีค่า q เท่ากับ 19.4 และซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 6 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า q เท่ากับ 6.7 และในครั้งที่ 2 มีค่า q เท่ากับ 12.9

และที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า q เท่ากับ 25.3 และในครั้งที่ 2 มีค่า q เท่ากับ 20.6 ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 4 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า q เท่ากับ 14.8 และในครั้งที่ 2 มีค่า q เท่ากับ 8.6 และซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 6 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่า q เท่ากับ 4.2 และในครั้งที่ 2 มีค่า q เท่ากับ 4.1

จะเห็นว่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 36.4 ดังแสดงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อสาธารณะ
ตารางที่ 4.1 และ 4.2

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	q [ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) / ปริมาณตัวดูดซับ (1 กรัม)]					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	17.4	17.1	8.2	5.3	4.6	9.1
2	25.4	24.8	13.5	12.6	6.7	12.9
3	36.4	27.7	17.8	18.2	6.3	12.9
4	36.0	30.1	21.2	19.4		
5		30.1	23.6	19.4		
6			23.6			

ตารางที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	q [ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) / ปริมาณตัวดูดซับ (1 กรัม)]					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	15.2	13.4	7.4	5.3	3.2	2.8
2	25.3	20.6	14.8	8.6	4.2	4.1
3	25.3	20.6	14.8	8.6	4.2	3.7

และคำนวณหาปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (ร้อยละโดยปริมาตร) มีผลดังนี้

ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 14.5 โดยปริมาตร และในครั้งที่ 2 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 12.0 โดยปริมาตร ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 4 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 9.4 โดยปริมาตร และในครั้งที่ 2 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 7.8 โดยปริมาตร และซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 6 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 2.7 โดยปริมาตร และในครั้งที่ 2 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 5.2 โดยปริมาตร

และที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 10.1 โดยปริมาตร และในครั้งที่ 2 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 8.2 โดยปริมาตร ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 4 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 3.4 โดยปริมาตร และในครั้งที่ 2 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 5.9 โดยปริมาตร และซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสาร

ผลิตภัณฑ์เป็น 6 ชั่วโมง ในครั้งที่ 1 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 1.7 โดยปริมาตร และในครั้งที่ 2 มีค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับร้อยละ 1.6 โดยปริมาตร

จะเห็นว่าซีโอไลต์เอทีสังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยขานอ้อยที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสาร ผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสนั้น สามารถดูดซับน้ำได้สูงสุดร้อยละ 14.5 โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (ร้อยละ โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (ร้อยละ โดยปริมาตร)					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	7.0	6.8	3.3	2.1	1.8	3.6
2	10.2	9.9	5.4	5.0	2.7	5.2
3	14.5	11.1	7.1	7.3	2.5	5.2
4	14.4	12.0	8.5	7.8		
5		12.0	9.4	7.8		
6			9.4			

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (ร้อยละ โดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (ร้อยละ โดยปริมาตร)					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	6.1	5.4	2.1	3.0	1.3	1.1
2	10.1	8.2	3.4	5.9	1.7	1.6
3	10.1	8.2	3.4	5.9	1.7	1.5

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับน้ำออกจากเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยปริมาตร ทำการทดลองโดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยขานอ้อยทั้ง 2 ครั้ง พบว่าสามารถดูดซับน้ำได้ และมีแนวโน้มในการดูดซับใกล้เคียงกันทั้ง 2 ครั้ง ซึ่งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะเกิดการดูดซับน้ำได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เพราะการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน และซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีที่สุด รองลงมา คือ 4 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ ดังนั้นซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง และทำการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่า C/C_0 เท่ากับ 0.85 คิดเป็นปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณตัวดูดซับ (1 กรัม) มีค่าเท่ากับ 36.4 และสามารถดูดซับน้ำได้สูงสุดร้อยละ 14.5 โดยปริมาตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองเพิ่มเติมที่อุณหภูมิ และความเข้มข้นต่างๆ ของเอทานอล เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับน้ำ
2. หาไอโซเทอมของการดูดซับ
3. ควรปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณิดา วัฒนะกิจ. การเตรียมถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าวด้วยการต้มกับการละลาย **ซิงค์คลอไรด์**สำหรับการดูดซับเอทานอลในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
- [2] จิระเดช สายुकต์ และวิทยา เทพไพฑูรย์. การแยกของผสมเอทานอล-น้ำโดยกระบวนการดูดซับ. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] นิสากร ปานประสงค์. **“ซีโอไลต์สารพัดประโยชน์”**
[Online]. Available: <http://update.se-ed.com/192/zeolite.htm>
- [4] ชันชรรัตน์ หิรัญชนะ โขก และจตุพร ชีระกุล. การสังเคราะห์สารอินทรีย์โดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
- [5] รายงานโครงการประเมินเทคโนโลยีการผลิตเอทานอลจากผลผลิตทางการเกษตร. สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [6] กุลวดี รังษีวัฒนานนท์. การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์เอ เพื่อเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนเจาะจง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2545.
- [7] Chriti J. Geankoplis., **Transport Process and Unit Operation**, 3rd ed. ,Prentice Hall, 1995.
- [8] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. มิตรนราการพิมพ์. หน้า 264-284. 2539.
- [9] เบญจมาศ บุญสงค์ และพรพิรุณ สุดเจดีย์ว. การดูดซับน้ำมันอิสระจากน้ำยาหล่อเย็นในกระบวนการโดยใช้ตัวดูดซับพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [10] ชฎาภา ทยานนท์, ปิณัญญา รัตนสัมฤทธิ์ และพงษ์ศักดิ์ รัตนจรูญโรจน์. การผลิตสารดูดความชื้นด้วยโซล-เจลเทคโนโลยี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2544.
- [11] พ.อ.สุจินต์ เขียมปี. การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2544.

- [12] วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ. การใช้ถังกรองดูดซับน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยวิธีการดูดซับด้วยซีเมนต์ลอยในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2542.
- [13] K.D. Henning and J. Degel, "Active Carcon for Solvent Recovery, France: Paper presented at the meeting of European Rologravure Association Engineers Group", 1990.
- [14] จตุพร วิชาคุณ และนุรักษ์ กฤษดาบุรุษย์. การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. หน้า 72-88. 2547.
- [15] Satterfield, Chales N. **Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice**. 2nd ed Chemical and Petroleum Engineering Series : McGraw-Hill, 1980, pp. 44-47, 226-254, 352-375.
- [16] ชีวรัตน์ ศิลปรัตน์, ปริญญา รุ่งโรจน์กิจไพศาล และปวีณา จรัสโชติพิณีจ. การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [17] Ho,Y.S. and McKay, G., "Sorption of Dye from Aqueous Solution by Peat. **Chemical Engineering Journal**." Vol.70, pp. 115-124, 1998.
- [18] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. **เคมีทั่วไป เล่ม 1**. สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 308-341. 2535.
- [19] B.Sowerby and B.D.Crittenden. "An Experimental Comparison of Type A Molecular Sieves for Drying the Ethanol-Water Azeotrope." **Gas Separation & Purification**, Vol 2, pp. 77-83, 1988.
- [20] Micheal R.Ladisch, Macio Voloch, Juan Hong, Paul Bienkowski and T.Tsao. "Cornmeal Adsorption for Dehydrating Ethanol Vapors." **Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.**, Vol 23, pp. 437-443, 1984.
- [21] Georgia D. Vareli ety al. "Water and Ethanol Adsorption on starchy and Cellulosic Substate as Biomass Separation System." **Z. Lebanese Unters Forsch A**, Vol 205, pp. 204-208, 1997.
- [22] อนุตร คงเทพ และพลกฤษต์ อุปมนตรี. การแยกเอทานอลออกจากน้ำด้วยวิธีเพอร์เมอ-พอร์ชันโดยใช้ซิลิโคนเมมเบรนและแพคเบดของโมเลกุลาร์ซีฟ. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- [23] ชีรพัฒน์ มัชฌิมภิกโร และสนธยา หนูเกื้อ. การแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยกระบวนการ Pressure Swing Adsorption. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
ข้อมูลจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 พื้นที่ได้กราฟของน้ำและเอทานอลที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ 0.5 ไมโครลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ในครั้งที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล
0	34588	384316	29573	394949	32987	378893
1	29785	357277	26789	370548	33038	387113
2	30116	375338	26681	378443	32109	379986
3	27445	362804	27509	397474	33013	389671
4	27956	366199	22889	335482		
5			25418	377325		
6			25510	378385		

ตารางที่ ก.2 พื้นที่ได้กราฟของน้ำและเอทานอลที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ 0.5 ไมโครลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ในครั้งที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล
0	25345	284282	34711	386800	37717	431447
1	23920	289006	24893	283865	25171	299582
2	22802	285542	30266	356615	32214	390386
3	22559	286529	32584	394188	31930	386910
4	20687	265836	24529	298318		
5	21406	275229	36998	449360		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 พื้นที่ได้กราฟของน้ำและเอทานอลที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ 0.5 ไมโครลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ในครั้งที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล
0	31384	399730	33703	383466	23298	298571
1	28565	388949	31716	372089	28830	375004
2	27094	386758	26560	322309	29190	380878
3	29413	419121	30375	368818	27298	355937

ตารางที่ ก.4 พื้นที่ได้กราฟของน้ำและเอทานอลที่ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ 0.5 ไมโครลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ในครั้งที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	พื้นที่ได้กราฟ					
	2 ชั่วโมง		4 ชั่วโมง		6 ชั่วโมง	
	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล	น้ำ	เอทานอล
0	29345	391905	34375	387121	30161	383012
1	26433	374128	33837	390246	28708	368922
2	26002	379578	32805	383580	28956	374192
3	28123	411211	36489	426689	29402	378921

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 ตัวอย่างการคำนวณ C/C_0 (ความเข้มข้นสุดท้ายต่อความเข้มข้นเริ่มต้น) ของน้ำ

ตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 และใช้ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง

ที่เวลาเริ่มต้น (0 ชั่วโมง): พื้นที่ใต้กราฟของน้ำ = 34588

พื้นที่ใต้กราฟของเอทานอล = 384316

และจากกราฟมาตรฐานของน้ำ ได้สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน คือ

$$y = 0.0011x \quad (\text{ข.1})$$

จะได้ น้ำหนักของน้ำ = $(0.0011)(34588) = 38.05 \mu\text{g}$

และจากกราฟมาตรฐานของเอทานอล ได้สมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐาน คือ

$$y = 0.0015x \quad (\text{ข.2})$$

จะได้ น้ำหนักของเอทานอล = $(0.0015)(384316) = 576.47 \mu\text{g}$

ดังนั้น ร้อยละโดยปริมาตรของน้ำ = $\frac{38.05}{38.05 + 576.47} \times 100 = 6.19 \% \text{vol}$

ที่เวลา 1 ชั่วโมง : สามารถคำนวณหาปริมาตรของน้ำเหมือนกับวิธีการข้างต้น

จะได้ ร้อยละโดยปริมาตรของน้ำ = 5.76 %vol

ดังนั้น C/C_0 ของน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง = $\frac{5.76 \% \text{vol}}{6.19 \% \text{vol}} = 0.93$

ที่เวลาถัดไปสามารถคำนวณได้เหมือนกับวิธีการข้างต้น

ข.2 ตัวอย่างการคำนวณ q [ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)/ปริมาณตัวดูดซับ (1 กรัม)]

ตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 และใช้ซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง

จากการทดลอง ใช้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95% โดยปริมาตร ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ซึ่งมีปริมาณน้ำอยู่ 250 มิลลิกรัม

จะได้ ปริมาณน้ำที่เวลา 1 ชั่วโมง = (ร้อยละโดยปริมาตรของน้ำที่เวลา 0 ชั่วโมง/ร้อยละโดยปริมาตรของน้ำที่เวลา 1 ชั่วโมง) \times 250

$$= \frac{5.76}{6.19} \times 250$$

$$= 232.6 \text{ mg}$$

ดังนั้น $q = \frac{(250 - 232.6) \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 17.4$

เอกสารนี้เป็นเวลาที่เวลาถัดไปสามารถคำนวณได้เหมือนกับวิธีการข้างต้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ (ร้อยละโดยปริมาตร)

ตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1 และใช้ฮีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2 ชั่วโมง

ที่เวลา 1 ชั่วโมง :

$$\text{ร้อยละโดยปริมาตรของน้ำที่ถูกดูดซับ} = \left(\frac{6.19 - 5.76}{6.19} \right) \times 100 = 7.0 \% \text{vol}$$

ที่เวลาถัดไปสามารถคำนวณได้เหมือนกับวิธีการข้างต้น



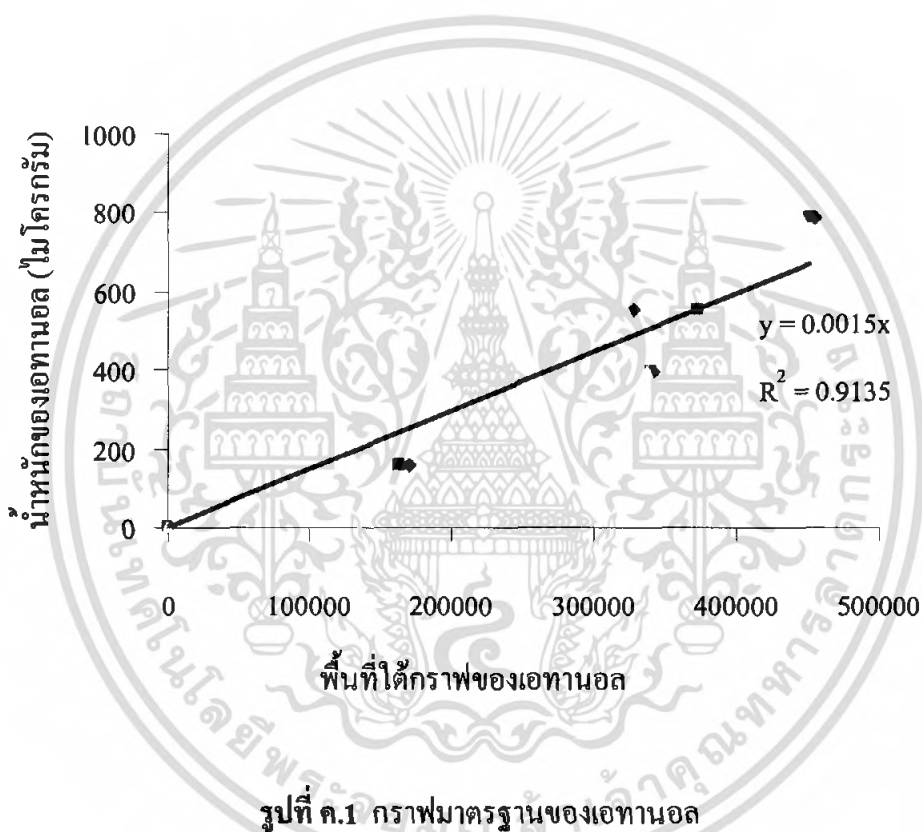
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลปริมาตรเอทานอล (ร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร) และพื้นที่ใต้กราฟจากเครื่อง
ก๊าซโครมาโตกราฟ

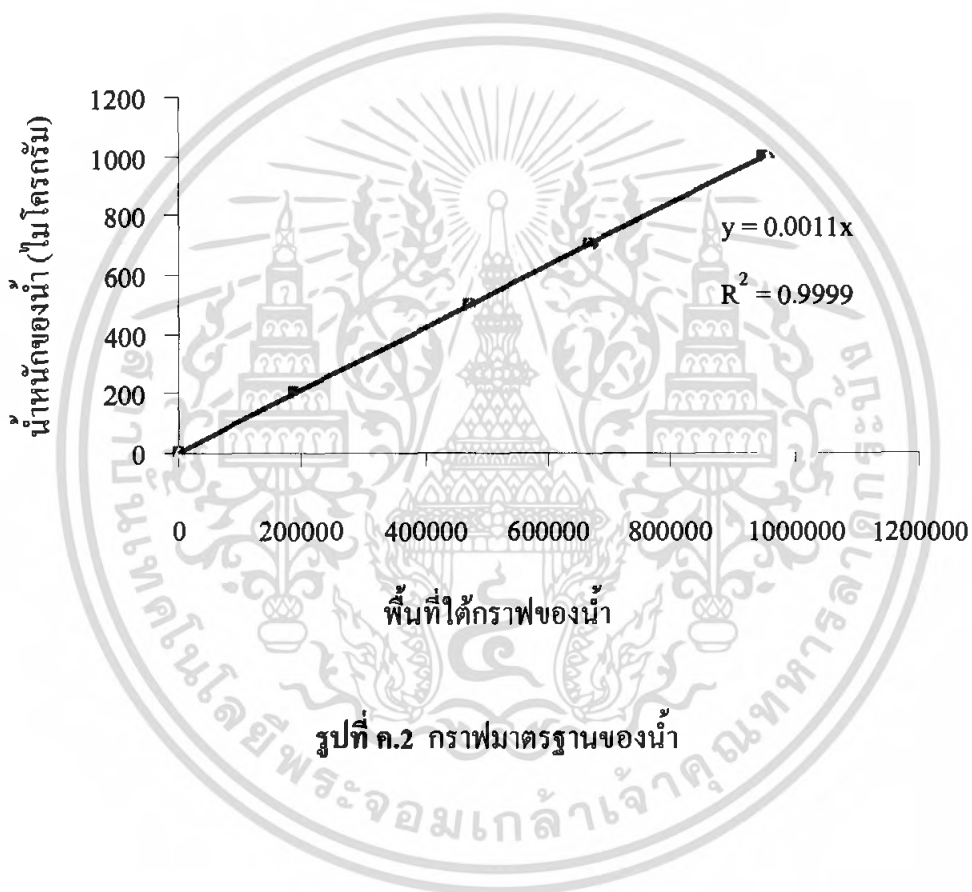
ปริมาณ (μ l)	พื้นที่ใต้กราฟ			น้ำหนัก (μ g)
	1	2	3	
0.2	169413	163233	152618	158
0.5	342930	340619	338868	395
0.7	328277	373466	322636	552
1.0	454472	450912	445330	789



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลปริมาณน้ำ และพื้นที่ได้กราฟจากเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ

ปริมาณ (μ l)	พื้นที่ได้กราฟ			น้ำหนัก (μ g)
	1	2	3	
0.2	189398	191354	196627	200
0.5	470957	473557	473300	500
0.7	674267	670075	667618	700
1.0	955788	947927	952674	1000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ภาวะของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ

รายการ	รายละเอียด
คอลัมน์แยก	Porapak T 3 mm i.d. × 10 cm
เครื่องตรวจหา	Thermal Conductivity Detector
ก๊าซพา	ก๊าซฮีเลียม
อัตราการไหลของก๊าซพา	33 มิลลิลิตรต่อนาที
ปริมาตรสารตัวอย่าง	0.5 ไมโครลิตร ภาวะของเหลว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้