

การแยกแบบดูซ้ำของของผสมเอทานอล-น้ำโดยโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ



นายจิติ เลิศวรสิริกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SORPTIVE SEPARATION OF ETHANOL-WATER MIXTURE BY 3A AND 4A MOLECULAR SIEVES



Mr. Thiti Lertvorasirikul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแยกแบบดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำโดยโมเลกุลาร์ซีฟชนิด
3เอ และ 4เอ

โดย

นาย รุติ เลิศวรสิริกุล


สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

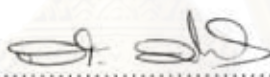
อาจารย์ที่ปรึกษา

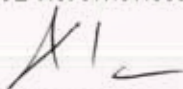
รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิฑิตสานต์

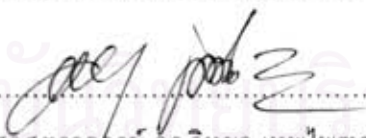
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

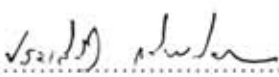
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. กัทพรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิฑิตสานต์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา เทพไพฑูรย์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

ฐิติ เลิศวรสิริกุล : การแยกแบบดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำโดยโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ. (SORPTIVE SEPARATION OF ETHANOL-WATER MIXTURE BY 3A AND 4A MOLECULAR SIEVES). อ.ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ธารพงษ์ วิทิตคานต์, 87 หน้า.

กระบวนการดูดซับเป็นเทคโนโลยีที่ปัจจุบันนิยมใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น เพื่อใช้ในการผสมกับเชื้อเพลิงแกโซลีน งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกเอาน้ำออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำในสภาวะแก๊สโดยใช้ตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ ซึ่งบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง การทดลองทำที่ความดันบรรยากาศ ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และ ศึกษาชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของเบดเพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับน้ำลดลง และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นจะทำให้ได้เวลาเบรคทูที่ลดลง ส่วนผลของความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลลดลงจะทำให้ตัวดูดซับอิ่มตัวเร็วขึ้น โดยจากการทดลองจะได้ภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิเบด 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนของสารละลายเอทานอลเริ่มต้น 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 90-95 โดยน้ำหนัก ชนิดของตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ ตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และเมื่อนำภาวะที่เหมาะสมไปทำการทดลองการผสมกันของตัวดูดซับ 3 แบบ คือ แบบผสม, แบบ 3เอ ก่อน 4เอ, และแบบ 4เอ ก่อน 3เอ พบว่า การผสมกันทั้ง 3 แบบ ให้เวลาเบรคทูที่ลดลงและไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด โดยได้สมการคือ $q = (12.97c)/(1+60.24c)$

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต..... ฐิติ เลิศวรสิริกุล
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2550.....

4972284723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: ADSORPTION / ETHANOL / ZEOLITE / FIXED BED

THITI LERTVORASIRIKUL : SORPTIVE SEPARATION OF ETHANOL-WATER MIXTURE BY 3A AND 4A MOLECULAR SIEVES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARAPONG VITIDSANT, PH.D., 87 pp.

Recently, adsorption has proved to be the most suitable method for removing water from ethanol before being blended with normal gasoline. This research focuses on water separation from ethanol-water solution under gases phase with the use of molecular sieves type 3A and 4A. The testing was done in a fixed-bed adsorber under atmospheric pressure to study the optimum condition for adsorption and to compare performances of different types of zeolite. The experiment showed that increasing initial temperature of the bed would reduce water capacity of the zeolite. Moreover, it was also found that breakthrough time was decreased as ethanol-water solution feed flow rate as increased. Furthermore, it was illustrated that the lower the concentration of the feed solution, the sooner the bed saturated. From the study, it was found that the most suitable condition for water adsorption was at 90 °C initial bed temperature, feed flow rate 0.0166 ml/sec, feed concentration 90-95% wt ethanol. The experiment also showed that molecular sieves type 3A had a better performance. At the optimum condition, there are three more different experiments as packed bed of mixed 3A and 4A zeolite, 3A on top of 4A and 4A on top of 3A. All variation resulted in shorter breakthrough time. Finally it was found that, Langmuir isotherm could be best used to predict the experiment results with the corresponding equation of $q = (12.97C)/(1+60.24C)$.

Department.....Chemical Technology....Student's signature.....*Thiti Lertvorasirikul*.....
 Field of Study...Chemical Technology....Advisor's signature.....*T. Vitidsant*.....
 Academic Year.....2007.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัย ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาตลอด

ขอขอบคุณ บริษัท ชูเทค เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ทุนในการศึกษาต่อปริญญาโท

กราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ เสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ คุณพิชญ์ พงษ์อักษร ที่ให้คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัย และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ และ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของดำเนินงานวิจัย.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	3
2.2 เอทานอล.....	3
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของเอทานอล.....	3
2.2.2 กระบวนการผลิตเอทานอล.....	4
2.2.3 มาตรฐานเอทานอล.....	8
2.3 การดูดซับ.....	9
2.3.1 ทฤษฎีการดูดซับ.....	9
2.3.2 ชนิดของตัวดูดซับ.....	11
2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	19
2.3.4 สมดุลของการดูดซับ.....	20
2.3.5 การดูดซับแบบเบตนิง.....	29
2.4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k	32
2.4.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2	33
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37

บทที่	หน้า
3	วิธีดำเนินการวิจัย..... 39
3.1.	รูปแบบการศึกษา..... 39
3.2.	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย..... 39
3.2.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเตรียมสารละลายเอทานอล..... 39
3.2.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ในการศึกษาการดูดซับ..... 39
3.2.3	สารเคมีที่ใช้..... 40
3.2.4	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวดูดซับ..... 41
3.2.5	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นเอทานอล..... 43
3.4	ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง..... 44
3.4.1	การเตรียมตัวดูดซับและการรีเจนเนเรชั่น..... 44
3.4.2	การทดลองศึกษาการดูดซับ..... 44
3.4.3	การทดลองการผสมกันของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ ทั้ง 2 ชนิด..... 45
3.4.4	การวิเคราะห์ความเข้มข้นเอทานอล..... 45
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... 46
4.1	สมบัติของตัวดูดซับ..... 46
4.1.1	สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ..... 46
4.2	2 ^k แพกทอเรียล..... 47
4.2.1	ผลการทดลอง 2 ^k แพกทอเรียล..... 48
4.3	ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ..... 50
4.3.1	ผลของอุณหภูมิเบดเริ่มต้นที่มีผลต่อเวลาเบรคทู..... 51
4.3.2	ผลของอัตราการป้อนสารละลายเอทานอลที่มีต่อเวลาเบรคทู..... 52
4.3.3	ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อเวลาเบรคทู..... 54
4.3.4	ผลของน้ำหนักตัวดูดซับที่มีต่อเวลาเบรคทู..... 55
4.4	ผลของผสมกันของตัวดูดซับ 2 ชนิด..... 56
4.5	ความยาวสมดุล (Length of equilibrium zone, LES)..... 60
4.6	สมดุลของการดูดซับ..... 62
4.6.1	ไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง (Linear Isotherm)..... 62
4.6.2	ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)..... 63
4.6.3	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)..... 64
4.7	การเกิดคาร์บอน (Coke Formation) บนตัวดูดซับ..... 67

บทที่	หน้า
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 68
5.1	สรุปผลการวิจัย..... 68
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 68
	รายการอ้างอิง..... 69
	ภาคผนวก.....
	ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง..... 72
	ภาคผนวก ข การคำนวณปริมาณน้ำในตัวดูดซับ..... 74
	ภาคผนวก ค การหาสมดุลของการดูดซับ..... 77
	ภาคผนวก ง การคำนวณหาความยาวสมดุล..... 80
	ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับ..... 82
	ภาคผนวก ฉ ตารางเปรียบเทียบความหนาแน่นกับความเข้มข้น..... 85
	ภาคผนวก ช เครื่องมือทดลอง..... 86
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 87

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	มาตรฐานเอทานอลของกรมธุรกิจพลังงาน.....	8
2.2	การนำไปใช้ของตัวดูดซับแต่ละชนิด.....	11
2.3	ชนิดของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้างทฤษฎี.....	15
2.4	สมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ.....	18
2.5	การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มชนิดต่าง ๆ.....	28
2.6	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	33
3.1	แสดงคุณสมบัติของเครื่องวัดความหนาแน่น.....	43
4.1	สมบัติของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ ขนาด 4-8 เมช (mesh).....	46
4.2	พื้นที่ผิวของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ ขนาด 4-8 เมช (mesh).....	47
4.3	ปัจจัยที่ศึกษา	47
4.4	การทดลอง 2^k factorial	48
4.5	ผลการทดลองตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ.....	49
4.6	ผลการทดลองตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ.....	49
4.7	เวลาเบรคทิวที่อุณหภูมิเบดต่างๆ.....	52
4.8	เวลาเบรคทิวที่อัตราการป้อนสารละลายเอทานอลต่างๆ.....	53
4.9	เวลาเบรคทิวที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นต่างๆ.....	55
4.10	เวลาเบรคทิวที่น้ำหนักตัวดูดซับต่างๆ.....	56
4.11	เวลาเบรคทิวที่การผสมกันของตัวดูดซับ.....	60
4.12	ความยาวเขตของการถ่ายโอนมวลสารของโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ ที่ภาวะต่างๆ.....	61
4.13	ความยาวเขตของการถ่ายโอนมวลสารของโมเลกุลาร์ซีฟ 4เอ ที่ภาวะต่างๆ.....	61
4.14	ความจุการดูดซับของน้ำที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นต่างๆ.	62
4.15	ค่า R^2 ของไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ.....	66
ก1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิเบด 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก.....	72
ข1	ผลการคำนวณปริมาณน้ำในตัวดูดซับ.....	75
ค1	ความจุการดูดซับของน้ำที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นต่างๆ.....	77

ตาราง	หน้า	
ค2	ลોકการรท่มของคความจการคุดค้บของน้ำแลคความค้มนค้บของน้ำในสารละลาย เอทานอลเร่มค้บ.....	78
ค3	อัตราส่วนคความค้มนค้บต่อคความจน้ำที่คความค้มนค้บค้บค้บ.....	78
ค1	คความหนาแน่นของสารละลายเอทานอลที่คความค้มนค้บค้บค้บ.....	85



สถาบันวศทศบรคการ
จุฬาลงกรณค้บมหาวศทศาลค้บ

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตเอทานอล.....	5
2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Technology).....	6
2.3 เทคโนโลยีเยื่อบาง (Membrane technology).....	7
2.4 กระบวนการกลั่นอะซีโอโทรป (Azeotropic distillation).....	8
2.5 ทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron)	14
2.6 โครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิเนียมซิลิเกต.....	15
2.7 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ.....	16
2.8 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่.....	16
2.9 ประจุลบในโครงสร้างตาข่ายที่เกิดประจุ.....	17
2.10 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ.....	18
2.11 ลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับของนอร์มัลเพนเทน บนของแข็งชนิดต่าง ๆ และน้ำซึ่งเป็นของเหลว.....	21
2.12 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแก๊สอาร์กอน และไนโตรเจนที่ $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ และของนอร์มัลเพนเทน ที่ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ บนแก้วที่มีความพรุน.....	22
2.13 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ บนวัสดุที่มีความพรุน.....	22
2.14 ไอโซเทอร์ม 3 ประเภท.....	23
2.15 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 ชนิด ตามการจำแนกของ IUPAC.....	23
2.16 ขอบเขตการถ่ายเทมวล (Mass transfer Zone, MTZ).....	30
2.17 การดูดซับในหอดูดซับ.....	30
2.18 การหาค่า t_g จากเส้นโค้งเบรคทู.....	32
2.19 แสดงการจับคู่ของระดับของตัวแปรในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2	34
3.1 อุปกรณ์ทดลอง.....	40
3.2 ซีโอไลต์ 3เอที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.3 เครื่อง Surface area analyzer รุ่น FlowSorb II 2300 ยี่ห้อ Micromeritics	41
3.4 เครื่อง Thermal analyzer รุ่น TGA/SDTA 851 ^o ยี่ห้อ Mettler Toledo.....	42
3.5 เครื่อง CHN Element analysis รุ่น CHN-2000 ยี่ห้อ LECO.....	42
3.6 เครื่องวัดความหนาแน่น รุ่น DMA 35N ยี่ห้อ Anton paar.....	44
3.7 การบรรจุตัวดูดซับแบบผสม.....	45

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 กราฟ Designs-Expert.....	50
4.2 ผลอุณหภูมิเบดเริ่มต้นที่มีต่อเวลาเบรคทฐ.....	51
4.3 ผลอัตราการป้อนสารละลายเอทานอลที่มีต่อเวลาเบรคทฐ.....	53
4.4 ผลความเข้มข้นสารป้อนที่มีต่อเวลาเบรคทฐ.....	54
4.5 ผลน้ำหนักรีดตัวดูดซับที่มีต่อ เวลาเบรคทฐ.....	56
4.6 ผลการดูดซับโดยโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอและ 4เอ.....	57
4.7 ผลการผสมกันของโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ และ 4เอ.....	58
4.8 อุณหภูมิภายในเบตของโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ และ4เอ.....	59
4.9 ไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง (Linear Isotherm).....	63
4.10 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm).....	64
4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm).....	65
4.12 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับไอโซเทอร์ม.....	66
4.13 คาร์บอนสะสมในโมเลกุลาร์ซีฟ.....	67
ง1 การหาค่า t_s	81
จ1 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวตัวดูดซับ.....	82
จ2 ผลทดสอบสมบัติเชิงความร้อนตัวดูดซับก่อนการใช้งาน.....	83
จ3 ผลทดสอบสมบัติเชิงความร้อนตัวดูดซับหลังการใช้งาน.....	84
ช1 อุปกรณ์เครื่องมือทดลอง.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ (Crude oil) และนำไปใช้ในเครื่องยนต์ชนิดที่มีการสันดาปภายใน การกำหนดคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง มักใช้การกำหนดค่าออกเทน หมายถึงดัชนีที่บ่งชี้คุณภาพของการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ซึ่งอยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง แต่เดิมน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีการเติมสารตะกั่ว (Tetramethyl Lead หรือ Tetraethyl Lead) เพื่อเพิ่มค่าออกเทน ในปัจจุบันนี้สารดังกล่าวไม่อนุญาตให้ใช้ในหลายประเทศ เนื่องจากพบว่าการปลดปล่อยควันเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันที่ผสมสารดังกล่าวจะมีตะกั่วปะปนออกมาด้วย ซึ่งต่อมาทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงมีการใช้สารที่เพิ่มออกเทนชนิดอื่นทดแทน เช่น Methyl Tertiarybutyl Ether (MTBE) หรือ Methylcyclopentadienyl Manganese Tricarbonyl (MMT) และในปัจจุบันประเทศไทยใช้เอทานอลส่วนใหญ่แทน MTBE ในน้ำมันแก๊ซโซลีนร้อยละ 10 โดยปริมาตร และในปลายปี 2550 นี้สามารถผลิตเอทานอลร้อยละ 99.5 สามารถผลิตได้ถึง 1.8 ล้านลิตรต่อวัน ซึ่งจะพอดีกับความต้องการของการใช้ผสมแก๊ซโซลีนเป็นแก๊ซฮอลที่ใช้ภายในประเทศไทย ในการผลิตเอทานอลในปัจจุบันประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 กระบวนการ คือ กระบวนการหมัก กระบวนการกลั่น และกระบวนการดูดซับด้วยโมเลกุลาร์ซีฟ

เอทานอลสามารถสังเคราะห์ได้จากการแปรรูปพืชจำพวกแป้งและน้ำตาลรวมทั้งเซลลูโลส โดยผ่าน กระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งเอทานอลที่ได้จากกระบวนการหมักจะมีความเข้มข้น ของเอทานอลประมาณร้อยละ 6-10 โดยน้ำหนัก ที่เหลือโดยส่วนใหญ่เป็นน้ำ จากนั้นต้องนำไปผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นโดยการกลั่นซึ่งการกลั่นจะได้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดเพียงร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากสารละลายเอทานอล-น้ำจะอยู่ในรูปของสารละลายอะซีไอโทรป เพื่อที่จะนำมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิง จะต้องมีการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้มากกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งแต่ก่อนจะใช้กระบวนการกลั่นแบบอะซีไอโทรป โดยการเติมสารตัวเติมลงไป ซึ่งส่วนมากจะใช้ไซโคลเฮกเซนหรือเบนซีน แต่กระบวนการนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานที่สูง และสารตัวเติมที่ใช้เป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ปัจจุบันกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลจะทำโดยกระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการดูดซับน้ำของของผสมเอทานอล-น้ำด้วยโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ
- 1.2.2 ศึกษาตัวปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 อธิบายผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับพร้อมเสนอแบบจำลองการดูดซับ
- 1.3.2 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ
- 1.4.2 หาภาวะที่เหมาะสมในการแยกของของผสมเอทานอล-น้ำ
- 1.4.3 หาสมดุลของการดูดซับ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
- 1.5.2 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 1.5.3 ประกอบเครื่องมือทดลอง
- 1.5.4 ศึกษาเครื่องมือวิเคราะห์ความหนาแน่น
- 1.5.5 ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่
 - อุณหภูมิในการดูดซับ 90 และ 110 องศาเซลเซียส
 - ชนิดของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ, 4เอ และแบบผสม
 - อัตราการป้อนสารละลายเอทานอลเริ่มต้น 0.0166 และ 0.033 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
 - ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 90 และ 95 โดยน้ำหนัก
- 1.5.6 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

สืบเนื่องจากในสภาวะปัจจุบันประเทศไทยต้องประสบความเสียหายเปรียบทางด้านพลังงาน อันเนื่องมาจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และเมื่อราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกมีราคาสูงขึ้น ส่งผลให้ประเทศไทยต้องประสบกับความเสียหายเปรียบทางด้านพลังงาน การพิจารณาหาแหล่งพลังงานทดแทนการนำเข้าน้ำมันจึงเป็นนโยบายที่สำคัญอันหนึ่ง โดยเฉพาะแหล่งพลังงานทดแทนที่มาจากวัตถุดิบทางการเกษตรที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศ ซึ่งก็คือ พลังงานจากชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต (ยกเว้นที่ได้กลายเป็นเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติไปแล้ว) และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก และพลังงานจากชีวมวลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเบนซินในตอนนี้คือ เอทานอล

2.2 เอทานอล (Ethanol)

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของเอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) คือสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งเพื่อการบริโภค (Beverage alcohol) ซึ่งหมายถึง รูปแบบใดๆ ของเอทานอลที่ถูกลั่นและมีความเหมาะสมสำหรับการบริโภคของมนุษย์ โดยเป็นแอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักด้วยกระบวนการธรรมชาติ

ส่วนเอทานอลที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ต้องเป็นเอทานอลที่ถูกกำจัดน้ำออก หรือ เอทานอลไร้น้ำ (Anhydrous ethanol) ที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.5%) เอทานอลสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้แก่

1. ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงเพื่อทดแทนน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล
2. ใช้ผสมกับน้ำมันเบนซิน เรียกว่า แกโซฮอล (Gasohol) หรือผสมกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ดีโซฮอล (Diesohol)
3. ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้กับเครื่องยนต์ ได้แก่ Ethyl Tertiary Butyl Ether (ETBE)

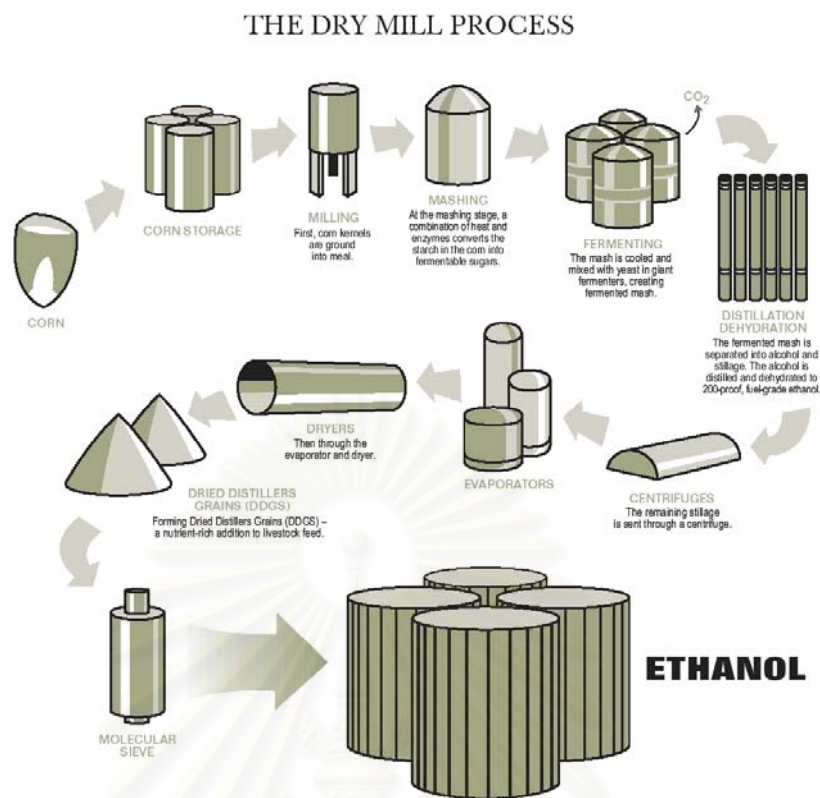
2.2.2 กระบวนการผลิตเอทานอล

กระบวนการผลิตเอทานอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis) และกระบวนการหมัก (Fermentation)

1. เอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical synthesis) เป็นการผลิตจากอนุพันธ์สารปิโตรเลียม เช่น เอทิลีนด้วยปฏิกิริยาการระเหยน้ำ (Dehydration)
2. กระบวนการหมัก (Fermentation) เป็นการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลด้วยเชื้อยีสต์ จะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกยีสต์จะใช้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) เป็นอาหารและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลโดยกระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน



โดยตามทฤษฎีน้ำตาลกลูโคสทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอทานอลร้อยละ 48.89 และ 51.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อได้เอทานอล ขั้นตอนที่ 2 จึงเป็นการทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นและบริสุทธิ์สูงขึ้นโดยการกลั่นแต่จะได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์เพียงร้อยละ 95 และขั้นตอนสุดท้ายคือ การเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้สูงขึ้นโดยการแยกน้ำออกด้วยตัวดูดซับ รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตเอทานอลที่ได้จากการหมัก โดยการนำข้าวโพดที่เก็บไว้ไปบดแล้วเอาเข้ากระบวนการหมักเพื่อให้ได้เอทานอล จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการกลั่นและกระบวนการดูดซับตามลำดับ จนได้เอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.8-99.9 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตเอทานอล [Southridgeethanol, 2550]

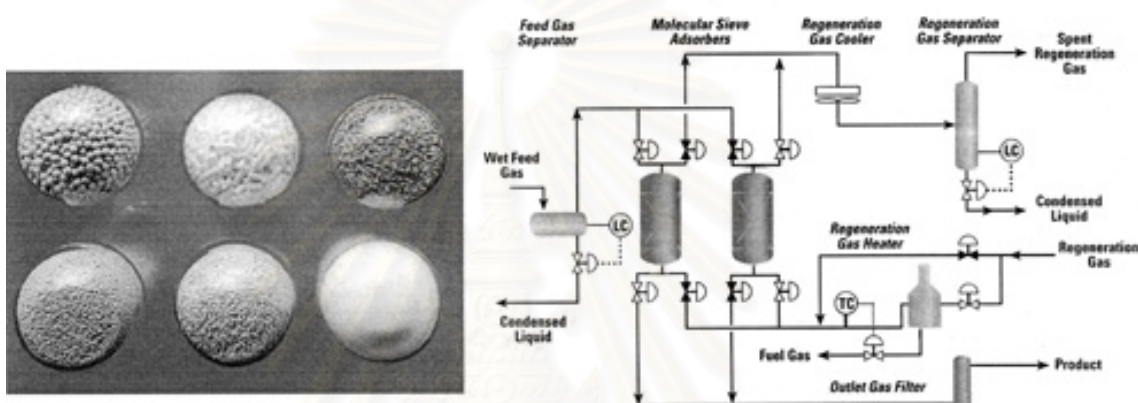
การผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล (Fuel ethanol) หรือแอลกอฮอล์ความบริสุทธิ์สูง (Absolute ethanol) ทำได้โดยการขจัดน้ำออกจากเอทานอลสามารถทำได้ 3 วิธี คือ

1. กระบวนการดูดซับ
2. เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบาง
3. การกลั่นอะซีโโทรป

กระบวนการดูดซับ (Adsorption Technology)

โมเลกุลาร์ซีฟหรือซีโอไลต์ (Molecular sieve, Zeolite) เป็นสารที่มีความเป็นรูพรุนสูง สามารถดูดน้ำในภาวะที่เย็นและคายน้ำออกเมื่อได้รับความร้อน หลักการของเทคโนโลยีชนิดนี้ จะใช้สมบัติพิเศษนี้ในการกำจัดน้ำออกจากเอทานอล โดยยอมให้โมเลกุลน้ำผ่านเข้าไปในโมเลกุล ขณะที่โมเลกุลของเอทานอลที่มีขนาดใหญ่กว่าจะผ่านไปได้ กระบวนการแยกน้ำนี้ เริ่มจากการใช้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ในช่วงร้อยละ 92-96 ผ่านไปยังปฏิกรณ์ที่บรรจุโมเลกุลาร์ซีฟภายในเป็นชั้นๆ ประมาณ 2-3 ชั้นในแนวขนาน โมเลกุลน้ำจะถูกจับไว้ ในขณะที่เอทานอลบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.8-99.9 จะผ่านลงมา และถูกนำไปยังถังเก็บ หลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการแยกน้ำ

ชั้นของโมเลกุลาร์ซีฟแต่ละชั้นจะชุ่มไปด้วยน้ำ ซึ่งสามารถดึงน้ำออกจากโมเลกุลาร์ซีฟด้วยเอทานอลความบริสุทธิ์สูง เพื่อไล่น้ำที่ถูกดูดซับในโมเลกุลาร์ซีฟออก โดยรูปที่ 2.2 แสดงตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ และกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากแก๊ส ข้อดีของเทคโนโลยีนี้ คือ เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ใช้ไอน้ำและพลังงานที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการกลั่น นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นๆ มาช่วยในการแยกน้ำ การกำจัดของเสียจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง แต่เทคโนโลยีนี้มีข้อเสียตรงที่ อัตราการสึกกร่อน หรือเกิดการเน่า (Fouling of media) ของโมเลกุลาร์ซีฟมีค่อนข้างสูง

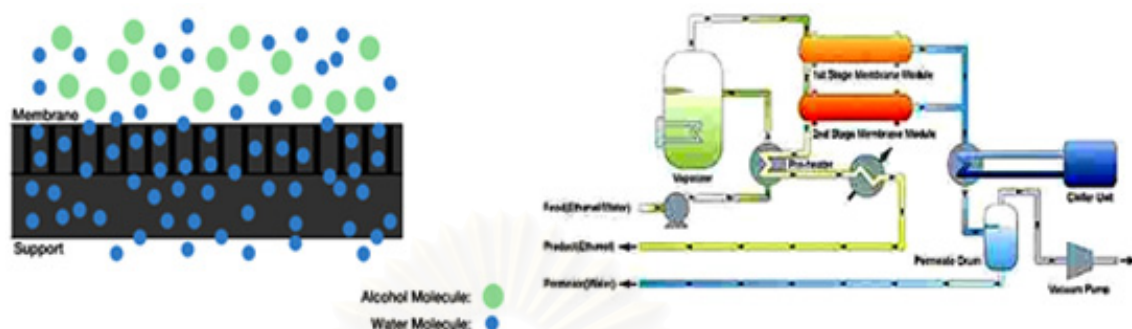


รูปที่ 2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) [UOP, 2007]

เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบาง (Membrane technology)

เทคโนโลยีนี้ นอกจากจะเป็นเทคโนโลยีใหม่ล่าสุด ยังเป็นเทคโนโลยีที่ง่ายและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ในการแยกสารละลายผสมผ่านเยื่อแผ่น (Membrane) โดยใช้เทคนิคการซึมผ่าน (Permeation) ของน้ำผ่านเยื่อบางในรูปของไอน้ำ ด้วยแรงดึงดูดจากภายนอกที่มีความดันต่ำกว่า (Evaporation) สารที่ผ่านเยื่อแผ่น เรียกว่า เพอมีเอท (Permeate) การแยกเกิดขึ้นได้เนื่องจากองค์ประกอบของสารในสารผสมมีความเป็นขั้ว (Hydrophilicity) ต่างกัน เช่นในกรณีของน้ำในเอทานอล น้ำมีความเป็นขั้วที่สูงกว่าเอทานอล ความสามารถในการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของน้ำจึงมีค่าสูงกว่า ขณะที่มีการซึมผ่านของน้ำ ความดันต่ำจากภายนอกจะช่วยดึงน้ำออกมาในรูปของไอน้ำ เมื่อทำการลดอุณหภูมิเพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นของเหลว เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบางเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานต่ำ ภาวะในการดำเนินการไม่รุนแรง และอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อย่างไรก็ตามแผ่นเยื่อบางจะเกิดการเสียหายหลังจากการใช้งาน เพราะฉะนั้นค่าใช้จ่ายในเรื่อง

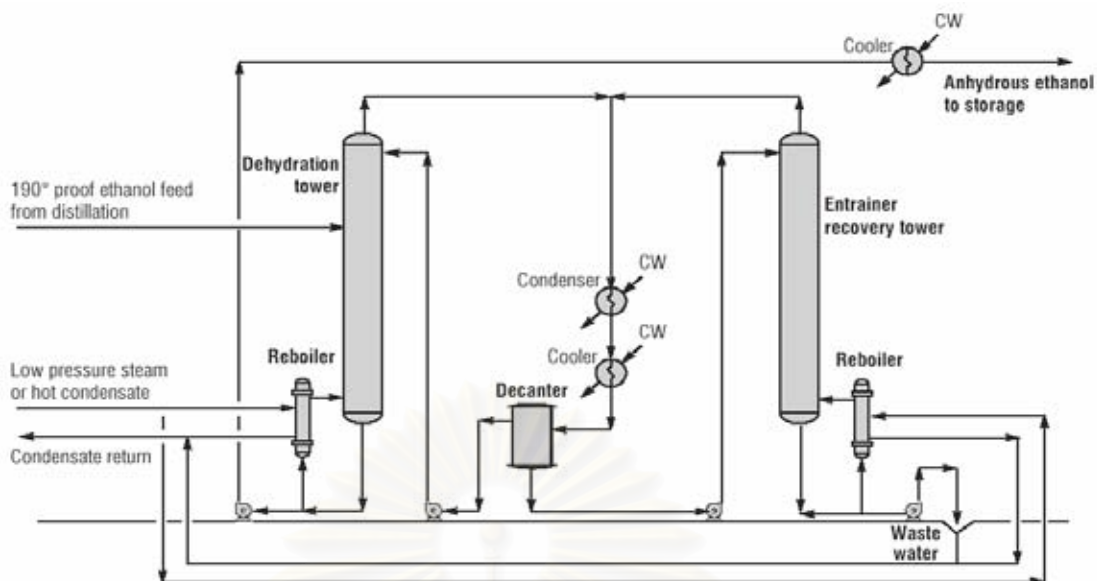
การดูแลรักษาจึงค่อนข้างสูง รูปที่ 2.3 แสดงเทคโนโลยีแผ่นเยื่อบางที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากเอทานอล



รูปที่ 2.3 เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบาง (Membrane technology) [นิรนาม, 2550]

การกลั่นอะซีโอโทรป (Azeotropic distillation)

เนื่องจากเอทานอลจะเกิดอะซีโอโทรป (Azeotrope) กับน้ำที่มีความเข้มข้นประมาณ 95% โดยปริมาตร ดังนั้นการกลั่นแบบธรรมดา (Simple binary distillation) จึงไม่สามารถแยกน้ำออกได้ การกลั่นแยกน้ำออกจากเอทานอลจึงต้องมีการเติมองค์ประกอบที่สามลงไป ซึ่งเรียกว่า สารตัวเติม (Entrainer) ตัวอย่างองค์ประกอบที่สามได้แก่ ไฮโคลเฮกเซน เบนซีน โทลูอิน อีเทอร์ และ คีโตน เป็นต้น สารตัวเติมจะเข้าไปแยกจุดอะซีโอโทรป (Azeotropic point) ของน้ำและเอทานอล ทำให้น้ำมีการระเหยมากขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้คือ เอทานอลที่ได้ต้องนำมาแยกองค์ประกอบที่สามออกภายหลังซึ่งก็อาจมีการปนเปื้อนของสารตัวเติม นอกจากนี้สารตัวเติมบางชนิดเป็นอันตรายก่อให้เกิดโรคมะเร็งและก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย โดยรูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการกลั่นแบบอะซีโอโทรป กระบวนการเริ่มจากการป้อนไอสารละลายเอทานอลที่ได้จากการกลั่นเข้าสู่หอกลั่นแบบอะซีโอโทรป จากนั้นเติมสารตัวเติม (Entrainer) ซึ่งใช้ ไฮโคลเฮกเซน หรือเบนซีน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกทางก้นหอเป็นของผสมระหว่างเอทานอลกับสารตัวเติม



รูปที่ 2.4 กระบวนการกลั่นอะซีไอโทรป [Jacques และคณะ, 2003]

2.2.3 มาตรฐานเอทานอล

เนื่องจากเอทานอลที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูง ทางกรมธุรกิจพลังงานจึงมีข้อกำหนดและวิธีทดสอบเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานเอทานอลของกรมธุรกิจพลังงาน [กรมธุรกิจพลังงาน, 2548]

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
1	ปริมาณเอทานอลและแอลกอฮอล์ชนิดอื่นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมสูงกว่าเอทานอล ร้อยละโดยปริมาตร (Ethanol plus higher saturated alcohols, %vol.)	ไม่ต่ำกว่า 99	EC 2870 Appendix 2 Method B
2	โมโนแอลกอฮอล์ชนิดอื่นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 3- 5 อะตอม ร้อยละโดยปริมาตร (Higher saturated (C3-C5) mono alcohols, %vol.)	ไม่สูงกว่า 2.0	EC 2870 Method III
3	เมทานอล ร้อยละโดยปริมาตร (Methanol, %vol.)	ไม่สูงกว่า 0.5	EC 2870 Method III
4	ยางเหนียว มิลลิกรัม/100มิลลิตร (Solvent Washed Gum, mg/100mL)	ไม่สูงกว่า 5.0	ASTM D 381
5	น้ำ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Water, %wt.)	ไม่สูงกว่า 0.3	ASTM E 203
6	คลอไรด์อนินทรีย์ มิลลิกรัม/ลิตร (Inorganic chloride, mg/L)	ไม่สูงกว่า 20	ASTM D 512

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานเอทานอลของกรมธุรกิจพลังงาน [กรมธุรกิจพลังงาน, 2548] (ต่อ)

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ
7	ทองแดง มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Copper , mg/kg)	ไม่สูงกว่า	0.07	ASTM D 1688
8	ความเป็นกรดคำนวณเป็นกรดอะซิติก มิลลิกรัม/ลิตร (Acidity as acetic acid, mg/L)	ไม่สูงกว่า	30	ASTM D 1613
9	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	ไม่ต่ำกว่า และ	6.5	ASTM D 6423
10	สภาพตัวนำไฟฟ้า ไมโครซีเมนส์/เมตร (Electrical conductivity, $\mu\text{S}/\text{m}$)	ไม่สูงกว่า	500	ASTM D 1125
11	ลักษณะที่ปรากฏ (Appearance)		เป็นของเหลวใส ไม่ขุ่น ไม่แยก ชั้น และไม่มี สารแขวนลอย	ตรวจพินิจด้วยสายตา
12	สารเติมแต่ง(ถ้ามี) (Additive)			ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน

ดังที่กล่าวก่อนหน้านี้นี้กระบวนการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลมี 3 วิธีหลัก ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอลโดยโมเลกุลาร์ซีฟ จึงนำเสนอเฉพาะทฤษฎีของกระบวนการดูดซับ

2.3 การดูดซับ (Adsorption)

2.3.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับเป็นการใช้ประโยชน์บนพื้นผิวของของแข็งที่เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยโมเลกุลหรืออะตอมของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จะเกาะติดบนพื้นผิว และปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งการเกาะติดบนพื้นผิวดังกล่าวสามารถจำแนกออกเป็นการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และด้วยพันธะเคมีหรือการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่อ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น แรงดึงดูดระหว่างอะตอมผิวหน้ากับตัวถูกดูดซับ คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ (น้อยกว่า 25 kJ/mol) เป็นกระบวนการคายความร้อน ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) และไม่มีการแตกของพันธะ ดังนั้นจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในทันทีที่โมเลกุลเดินทางมาถึงผิวหน้า แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีความพหุนสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลงเนื่องจากถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ ปริมาณของการดูดซับแบบนี้เป็นแบบไม่เลือก กล่าวคือ ขึ้นกับจุดเดือดของแก๊ส แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของพื้นผิวและชนิดของแก๊ส หลังการดูดซับแก๊สที่ผิวหน้าไม่เป็นชั้นเดียว

โดยพิจารณาปริมาณที่ดูดซับจากค่าความดันสัมพัทธ์ P/P_0 เมื่อ P คือความดันย่อยในระบบ และ P_0 คือความดันไอที่อยู่เหนือของเหลวบริสุทธิ์ ถ้าค่า P/P_0 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01 ถือว่าเกิดการดูดซับทางกายภาพน้อยมากจนไม่ต้องนำมาคิด ถ้าค่า P/P_0 มีค่า 0.1 จะถือว่าปริมาณที่ดูดซับเป็นชั้นเดียว และเมื่อค่า P/P_0 เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หมายถึงการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเมื่อค่า P/P_0 เป็น 1 จะหมายถึงตัวถูกดูดซับที่ผิวหน้ามีสภาพเป็นของเหลวทั้งหมด (Condensation condition)

การดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้อย่างสมบูรณ์ และระบบจะเข้าสู่สมดุลได้อย่างรวดเร็วทันทีที่โมเลกุลสัมผัสผิวหน้ายกเว้นในกรณีของของแข็งที่มีรูพรุนละเอียด การดูดซับและการคายจากผิวหน้าสามารถทำได้โดยการเพิ่มและลดความดันของแก๊สโดยไม่ขึ้นกับธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีนั้นอาจจะย้อนกลับได้หรือไม่ได้ขึ้นกับชนิดของโมเลกุลที่มาดูดซับ

2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เป็นการเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 60-85 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง กล่าวคือ ขึ้นกับชนิดของแก๊สและผิวหน้าของตัวดูดซับ หลังการดูดซับแก๊สที่ผิวหน้าจะเป็นชั้นเดียว การที่จะให้การดูดซับทางเคมีเข้าสู่สมดุลนั้นต้องให้เวลานาน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณที่ดูดซับที่ภาวะสมดุลจะขึ้นกับชนิดของระบบ ปริมาณไอของสารที่ดูดซับจะมีค่ามากที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของสารนั้นมาก และปริมาณการดูดซับจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่งซึ่งผิวหน้าเกิดการอิ่มตัว เป็นปริมาณการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ โดยพิจารณาที่ความดันคงที่ (Isobaric) โดยทั่วไปปริมาณการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำมักจะมีค่าน้อยเนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับมีค่าต่ำทำให้ไม่เกิดการอิ่มตัว

การเกิดการดูดซับทางกายภาพนั้นเป็นกระบวนการที่ไม่มีเฉพาะเจาะจง กล่าวคือเกิดขึ้นได้กับไอของแก๊สทุกชนิดบนผิวหน้าทำให้ค่า P/Po สูง ส่วนการเกิดการดูดซับทางเคมีนั้นมีความเฉพาะเจาะจงสูง จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับสามารถเกิดพันธะเคมีกับตัวถูกดูดซับได้เท่านั้น ดังนั้นปริมาณของการเกิดการดูดซับทางเคมีจะขึ้นกับชนิดของผิวหน้าของตัวดูดซับ

2.3.2 ชนิดของตัวดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการจับโมเลกุลแก๊สหรือของเหลว (ตัวถูกดูดซับ) บนพื้นผิวอนุภาคของแข็ง(ตัวดูดซับ) คุณสมบัติสำคัญของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติต่างๆของรูพรุน เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยการเลือกตัวดูดซับ ที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลบางชนิดออกติดไว้กับตัวดูดซับนั้น เมื่อดูดจนอิ่มแล้ว ก็สามารถนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ดูดไว้ ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น เปลี่ยนอุณหภูมิ หรือ เปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และนำไปดูดซับอีก ตัวดูดซับสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น

- ใช้ในการดูดความชื้นของอากาศ และแก๊สต่างๆ เพื่อให้อากาศ หรือก๊าซนั้นแห้ง
- ใช้ในการกำจัดกลิ่นและสารปนเปื้อนต่างๆ ออกจากแก๊ส เช่น กำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารกำมะถันอื่นๆ กำจัดสารคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น
- แยกไอของตัวทำละลายที่ปะปนออกมากับอากาศกับก๊าซอื่นๆที่เป็นคู่แข่งกัน
- แยกองค์ประกอบต่างๆ ของก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน หรือ ไฮโดรเจนคาร์บอนอื่นที่ประสงค์จัดเป็นการทำองค์ประกอบนี้ให้บริสุทธิ์

ในตารางที่ 2.2 แสดงถึงตัวดูดซับแต่ละชนิดที่นำไปใช้ประโยชน์ต่างๆกัน เช่น ซิลิกาเจลถูกนำไปใช้ในการทำแก๊สให้แห้ง คาร์บอนถูกใช้ในการแยกแก๊สไนโตรเจนออกจากอากาศ เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 การนำไปใช้ของตัวดูดซับแต่ละชนิด [Thomas, 1998]

Type	Typical applications
Silica Gel	-Drying of gases, refrigerants, organic solvents, transformer oils -Desiccant in packings and double glazing
Activated alumina	-Drying of gases, organic solvents, transformer oils -Removal of HCl from hydrogen

ตารางที่ 2.2 การนำไปใช้ของตัวดูดซับแต่ละชนิด [Thomas, 1998] (ต่อ)

Type	Typical applications
Carbons	<ul style="list-style-type: none"> -Nitrogen from air -Hydrogen from syn-gas and hydrogenation process -Ethene from methane and hydrogen -Vinyl chloride monomer (VCM) from air -Removal of odours from gases -Recovery of solvent vapours -Removal of SO_x and NO_x -Purification of helium -Clean-up of nuclear off-gases -Decolourizing of syrups, sugars and molasses -Water purification, including removal of phenol, pesticides, chlorine, caprolactam
Zeolites	<ul style="list-style-type: none"> -Oxygen from air -Drying of gases -Removal water from azeotropes -Sweetening sour gases and liquids -Purification of hydrogen -Separation of ammonia and hydrogen -Recovery of carbon dioxide -Separation of oxygen and argon -Removal of acetylene, propane, and butane from air -Separation of xylenes and ethyl benzene -Separation of normal from branched paraffins -Separation of olefins and aromatics from paraffins

ตารางที่ 2.2 การนำไปใช้ของตัวดูดซับแต่ละชนิด [Thomas, 1998] (ต่อ)

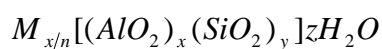
Type	Typical applications
Zeolites	-Recovery of carbon monoxide from methane and hydrogen -Purification of nuclear off-gases -Separation of cresols -Drying of refrigerants and organic liquids -Separation of solvent systems -Purification of silanes
Polymers and resins	-Water purification -Recovery and purification of steroids, amino acids and polypeptides -Separation of fatty acids from water and toluene -Separation of aromatics from aliphatics
Clays(acid treated and pillared)	-Treatment of edible oils -Removal of organic pigments -Refining of mineral oils -Removal of polychlorinated biphenyls (PCBs)

2.3.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับซีโอไลต์

โมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve) หรือซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นผลึกของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) ของโลหะแอลคาไลน์หรือแอลคาไลน์เอิร์ธ เช่น โซเดียม (Sodium) โพแทสเซียม (Potassium) แคลเซียม (Calcium) เป็นต้น โครงสร้างมีลักษณะเป็นรูพรุนสม่ำเสมอจำนวนมาก สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายขึ้นกับคุณสมบัติของซีโอไลต์แต่ละประเภท เช่น ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange resin) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และเป็นตัวดูดซับ (Adsorbent)

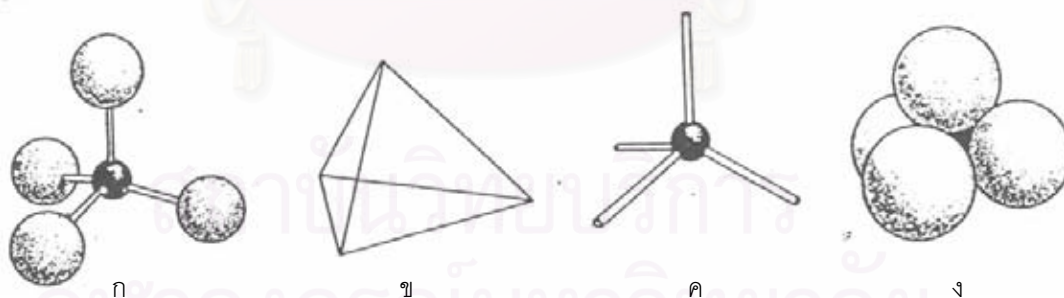
โครงสร้างของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็นโครงร่าง 3 มิติของรูปทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียม-ออกซิเจน (AlO_4 tetrahedral) และรูปทรงสี่หน้าของซิลิกอน-ออกซิเจน (SiO_4 tetrahedral) ซึ่ง

ประกอบกันเป็นอะลูมิโนซิลิเกต โดเนการเชื่อมต่อกันของออกซิเจนอะตอมแบบไม่มีที่สิ้นสุด ซีโอไลต์มีสูตรโมเลกุลดังนี้



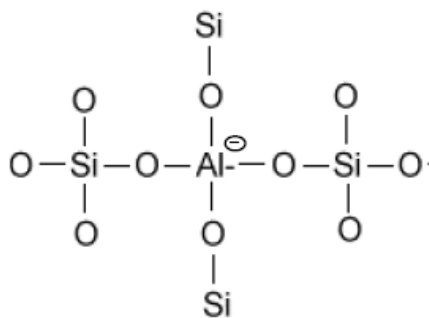
โดยที่	x,y	เป็นจำนวนโมลของ AlO_2^- และ SiO_2 ตามลำดับ
	z	เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในผลึกของซีโอไลต์
	M	เป็นโลหะหมู่ I หรือ II ซึ่งมีประจุบวกเท่ากับ n เพื่อดุลประจุลบ ณ ตำแหน่งของอะตอมอะลูมิเนียม

หน่วยโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ประกอบด้วยรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแต่ละหน่วยจัดเรียงต่อกันโดยใช้ออกซิเจนร่วมกันดังรูปที่ 2.6 เกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงกลมอะตอมออกซิเจน และต่อกันเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยตำแหน่งมุมในรูปแทนอะตอมซิลิกอนหรืออะตอมอะลูมิเนียม ในขณะที่เส้นตรงแทนอะตอมออกซิเจนซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมซิลิกอนหรืออะตอมอะลูมิเนียมและโครงสร้างที่เป็นรูปหลายเหลี่ยมดังกล่าวจะประกอบเข้าด้วยกันในลักษณะ 3 มิติเป็นโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.5 ทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) [Breck, 1984]

(ก) Ball & stick model, (ข) Solid tetrahedron, (ค) Skeletal tetrahedron,
(ง) Space filling model



รูปที่ 2.6 โครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิโนซิลิเกต

หน่วยโครงสร้างของซีโอไลต์ สามารถแบ่งออกได้เป็น

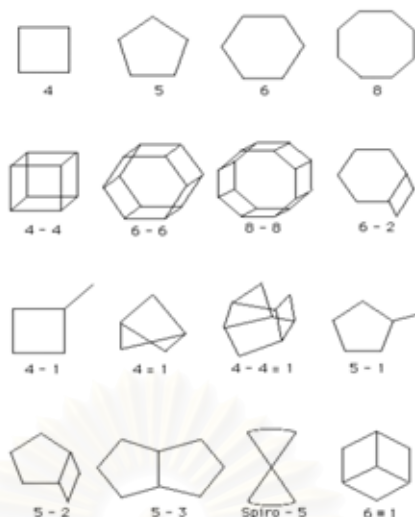
2.3.2.1.1 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary unit) ซึ่งเป็นหน่วยเล็กๆ รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม

2.3.2.1.2 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building unit: SBU) เกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิต่อกันเป็นรูปเหลี่ยมต่าง ๆ เป็นวงเดี่ยว เช่น S4R, S6R, และ S8R หรือต่อเป็นวงคู่ เช่น D4R, D6R

ในปี 1974 Breck ได้ทำการแบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิได้ 8 ชนิด ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้างทุติยภูมิ [Breck, 1984]

Group	Secondary Building Unit (SBU)
1	Single 4-ring, S4R
2	Single 6-ring, S6R
3	Single 8-ring, S8R
4	Double 4-ring, D4R
5	Double 6-ring, D6R
6	Complex 4-1, T ₅ O ₁₀ unit
7	Complex 5-1, T ₈ O ₁₆ unit
8	Complex 4-4-1, T ₁₀ O ₂₀ unit



รูปที่ 2.7 หน่วยโครงสร้างพหุติยภูมิ [จตุพร และนุรักษ์, 2547]

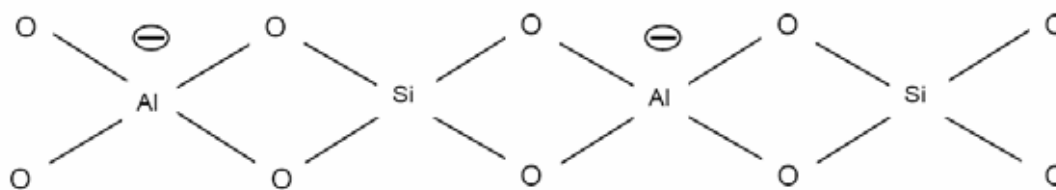
2.3.2.1.3 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า (Polyhedral units) เป็นรูปทรงสมมาตรขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดขึ้นจากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นรูปทรงที่สลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8

1. ทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ β (Truncated octahedral type)
2. ทรงยี่สิบหกหน้า หรือ α (Truncate cubooctahedron)
3. ทรงสิบแปดหน้า หรือ γ (18-hedron)
4. ทรงสิบเอ็ดหน้า หรือ ϵ (11-hedron)



รูปที่ 2.8 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่ [เลิศ, 2545]

เมื่อพิจารณาหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ พบว่าถ้าทุกหน่วยเป็น $(\text{SiO}_4)^{4-}$ สูตรเอมพิริคัลของสารนี้คือ SiO_2 นั่นเอง ซึ่งมีสภาพประจุเป็นกลาง แต่ถ้าแทนที่ $(\text{SiO}_4)^{4-}$ ด้วย $(\text{AlO}_4)^{5-}$ จะได้สูตรเอมพิริคัลคือ $(\text{AlO}_2)^-$ ดังนั้นจึงมีประจุลบสำหรับทุกหน่วยของ $(\text{AlO}_2)^-$ หรือ $(\text{AlO}_4)^{5-}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ประจุลบในโครงสร้างตาข่ายที่เกิดประจุ [เลิศ, 2545]

ตำแหน่งประจุลบที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณรอบ $(\text{AlO}_4)^{5-}$ ซึ่งเป็นที่อยู่ของประจุบวก (Cation) โดยยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงคูลอม (Coulombic force) เพื่อให้เกิดสมดุลทางประจุ ดังนั้นจำนวนประจุบวกที่พบในซีโอไลต์จะขึ้นกับจำนวนของหน่วย $(\text{AlO}_2)^-$ หรือ $(\text{AlO}_4)^{5-}$ และเลขออกซิเดชันของประจุบวก ดังนั้นซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ ประจุบวกและโมเลกุลของน้ำเป็นส่วนที่อยู่นอกโครงสร้างตาข่ายของซีโอไลต์ ดังนั้นการแลกเปลี่ยนประจุบวก หรือการกำจัดโมเลกุลน้ำออกจากโครงสร้างซีโอไลต์จึงไม่ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลง

2.3.2.2 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ มีดังนี้

1. การแลกเปลี่ยนไอออน ซีโอไลต์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวกนี้เป็นกระบวนการแบบผันกลับได้
2. การดูดซับน้ำ ซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำให้เข้าไปอยู่ในช่องว่างบริเวณผนังด้านในของโพรงชนิดต่าง ๆ ได้ และสามารถกำจัดน้ำออกได้ที่อุณหภูมิที่สูงพอ
3. การคัดขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงขนาดต่าง ๆ กัน มีทางให้โมเลกุลของสารอื่นผ่านเข้าออกได้เรียกว่า “ปากโพรง” (Aperture) โดยที่โมเลกุลที่มีรูปร่างและขนาดพอเหมาะสำหรับปากโพรงเท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติในการกรองแยกโมเลกุลได้ (Molecular sieve)

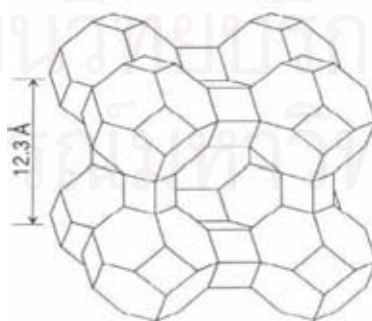
นอกจากนี้สมบัติที่สำคัญอื่น ๆ ก็คือ ปริมาณของส่วนที่แสดงความเป็นกรด (Acid site density) ความรุนแรงของกรด (Acid strength) และขนาดของช่องว่าง (Pore size) ภายในผลึก ซึ่งรวมถึงลักษณะรูปร่าง และขนาดของทางเข้าออกของช่องว่าง (Pore entrance) ตารางที่ 2.4 แสดงถึงลักษณะของช่องว่างทั้งขนาดและสูตรโมเลกุลของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่าง [Thomas, 1998]

Framework	Cationic form	Formula of typical unit cell	Window	Effective channel diameter (nm)	Application
A	Na	$\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}]$	8-ring (obstructed)	0.38	Desiccant, CO_2 removal from natural gas
	Ca	$\text{Ca}_2\text{Na}_2[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}]$	8-ring (free)	0.44	Linear paraffin separation, Air separation
	K	$\text{K}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}]$	8-ring (obstructed)	0.29	Drying of cracked gas containing C_2H_4 , etc.
X	Na	$\text{Na}_{80}[(\text{AlO}_2)_{80}(\text{SiO}_2)_{108}]$	12-ring	0.84	Pressure swing H_2 purification
	Ca	$\text{Ca}_{40}\text{Na}_4[(\text{AlO}_2)_{80}(\text{SiO}_2)_{108}]$	12-ring	0.80	Removal of mercaptans from natural gas
	Sr, Ba ^a	$\text{Sr}_{21}\text{Ba}_{22}[(\text{AlO}_2)_{80}(\text{SiO}_2)_{108}]$	12-ring	0.80	Xylene separation
Y	Na	$\text{Na}_{56}[(\text{AlO}_2)_{56}(\text{SiO}_2)_{136}]$	12-ring	0.80	Xylene separation
	K	$\text{K}_{56}[(\text{AlO}_2)_{56}(\text{SiO}_2)_{136}]$	12-ring	0.80	Xylene separation
Mordenite	Ag	$\text{Ag}_8[(\text{AlO}_2)_{8}(\text{SiO}_2)_{48}]$	12-ring	0.70	I and Kr removal from nuclear off-gases
Silicalite	H	$\text{H}_4[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_{40}]$	10-ring	0.60	Removal of organics from water
ZSM-5	—	$(\text{SiO}_2)_{40}$	10-ring	0.60	Xylene separation

2.3.2.3 ซีโอไลต์เอ (Zeolite A)

ซีโอไลต์เอ เป็นซีโอไลต์ที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 0.7-1.5 ซึ่งเป็นซีโอไลต์ที่พบได้ในธรรมชาติ มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยโพรงแบบไซดาไลซ์ ต่อเชื่อมด้วย D4R (double-4-ring) เป็น 3 มิติเกิดเป็นโพรงขนาดใหญ่ตรงกลางเรียกว่า โพรงแบบอัลฟา ซึ่งขนาดโพรงเท่ากับ 12 อังสตรอม และมีปากโพรงกว้าง 4.2 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งทำให้เหมาะที่จะนำซีโอไลต์เอไปใช้ในประโยชน์ต่าง ๆ เช่น ใช้ในแยกน้ำออกจากเอทานอล



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของซีโอไลต์ A [Thomas, 1998]

2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.3.3.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นผลของความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิว จึงเห็นได้ชัดว่าพื้นที่ผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ โดยการดูดซับสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น

2) ขนาดของอนุภาค

พื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นหากเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคลดลง อย่างไรก็ตามสำหรับตัวดูดซับที่มีรูพรุนสูงพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ในโครงสร้างของรูพรุนดังกล่าว ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค

3) สภาพทางเคมีของพื้นผิว

หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของสารดูดซับมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโดยการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุบนผิวหน้าระหว่างการดูดซับทางเคมี ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายหลายชนิด

2.3.3.2 ธรรมชาติของตัวถูกละลาย

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นหากคุณสมบัติของตัวถูกละลายได้แก่ ความยาวของสายโซ่เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้โมเลกุลมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นและความสามารถในการละลายได้ลดลง นอกจากนี้มวลโมเลกุลที่มีค่าสูงจะทำให้ขนาดของสารถูกละลายใหญ่ขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.3.3.3 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านในชั้นฟิล์มหรือการแพร่ในรูพรุนซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีความหนามากทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารถูกละลายที่เข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงข้ามถ้าระบบมีความปั่นป่วนสูงทำให้ไม่เกิดการสะสมในชั้นฟิล์ม ฟิล์มบางเป็นผลให้ตัวถูกละลายสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับได้อย่างรวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง ทำให้กรณีนี้การเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.3.3.4 ผลของอุณหภูมิ

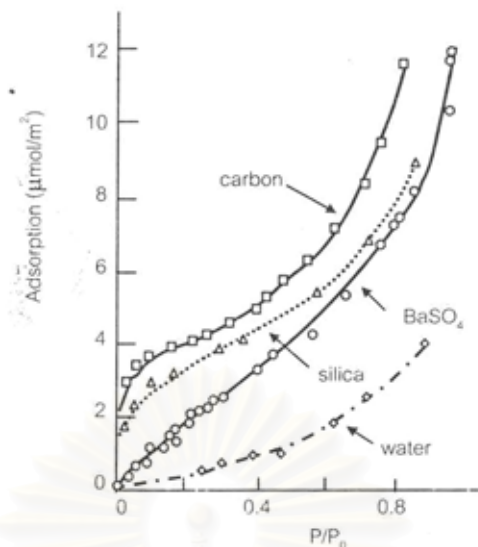
เนื่องจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามหากอุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ก็มีกระบวนการดูดซับทางเคมีบางชนิดที่สามารถเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ส่วนใหญ่เป็นการดูดซับสารจำพวกโลหะ เป็นต้น

2.3.4 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

การดูดซับของสารละลายเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของตัวถูกละลายที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดซับ เมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้ง ตัวถูกละลายจะถูกดูดซับและหลุดออกมาในปริมาณที่เท่าๆ กันในเวลาเดียวกัน จนกว่าจะเข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งเป็นภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารดูดซับหรือตัวถูกละลายในสารละลายอีกต่อไป การแสดงปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิตั้งที่เรียกว่า ไอโซเทอรั่มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) สมการที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับ ได้แก่ แลงเมียร์ไอโซเทอรั่ม (Langmuir adsorption isotherm) ฟรุนดิชไอโซเทอรั่ม (Freundlich adsorption isotherm)

ในสารที่มีสถานะเป็นไอไอโซเทอรั่มของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยของตัวถูกละลาย โดยมักใช้ค่าความดันสัมพัทธ์ P/P_0 กับปริมาณที่ดูดซับที่สมดุลเมื่ออุณหภูมิตั้งที่ ไอโซเทอรั่มของการดูดซับมีค่าเริ่มจากศูนย์เมื่อ $P/P_0 = 0$ จนถึงอนันต์ เมื่อ $P/P_0 = 1$ ซึ่งเป็นจุดที่ผิวหน้าเปียกอย่างสมบูรณ์ นั่นคือการเกิดการควบแน่นของไอของโมเลกุลที่มาดูดซับ ส่วนในสารที่มีสถานะเป็นของเหลวจะอยู่ในรูปของ C/C_0

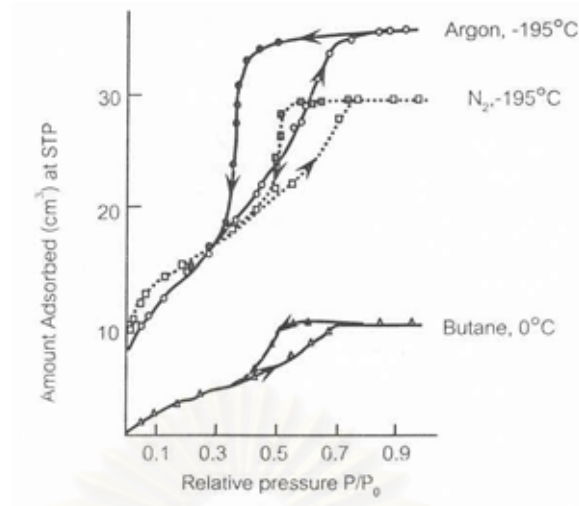
รูปร่างของไอโซเทอรั่มจะขึ้นกับธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกละลาย ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นไอโซเทอรั่มของการดูดซับของนอร์มัลเพนเทน (n-pentane) บนของแข็งสามชนิดและบนน้ำซึ่งอยู่ในสถานะของเหลว จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับขึ้นกับชนิดของตัวถูกละลาย รูปที่ 2.12 แสดงไอโซเทอรั่มของการดูดซับแก๊สอาร์กอน (Ar) และไนโตรเจน (N_2) ที่ $-195^\circ C$ และนอร์มัลเพนเทนที่ $0^\circ C$ บนแก้วที่มีความพรุน และรูปที่ 2.13 แสดงไอโซเทอรั่มของการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนที่ $-195^\circ C$ บนวัสดุที่มีความพรุน



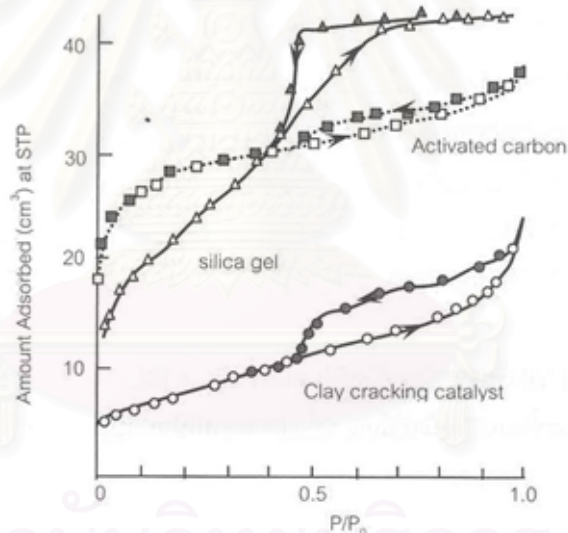
รูปที่ 2.11 ลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับของนอร์มัลเพนเทน บนของแข็งชนิดต่าง ๆ และน้ำ ซึ่งเป็นของเหลว [จตุพร และนุรักษ์ และนุรักษ์, 2547]

วัสดุที่มีความพรุนซึ่งมีขนาดรูพรุน 5-50 นาโนเมตรนั้นจะให้กราฟการดูดซับและการคายของอาร์กอน และไนโตรเจนที่ -195°C และของนอร์มัลเพนเทนที่ 0°C มีลักษณะของอีสเทอริซึส (Capillary condensation) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ส่วนรูปที่ 2.13 แสดงอีสเทอริซึสของการดูดซับไนโตรเจนบนซิลิกาเจล (Silica gel) ถ่านกัมมันต์ และ Clay cracking catalyst เส้นล่างคือการคายของโมเลกุลและเส้นบนคือการดูดซับ กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ก็ต่อเมื่อปลายทั้งสองข้างของเส้นกราฟทั้งสองทับกัน

ส่วนที่มีความชันมากของเส้นกราฟของการคายของโมเลกุล จะขึ้นกับชนิดของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ และไม่ขึ้นกับธรรมชาติของตัวดูดซับ (จากรูปที่ 2.11 และ 2.12) สำหรับไนโตรเจนที่จุดเดือดของมัน จุดที่มีความชันมากที่สุดคือที่ตำแหน่งที่มีค่า P/P_0 เป็น 0.4 สำหรับแก้วที่มีรูพรุนขนาดเล็ก หรือในซีโอไลต์เส้นกราฟจะถึงตำแหน่งที่การดูดซับมีค่าคงที่เมื่อ P/P_0 มีค่าน้อยกว่า 1.0 อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากรูพรุนนั้นถูกบรรจุเต็มด้วยไอของสารที่ควบแน่น เมื่อเพิ่มค่า P/P_0 ปริมาณที่ดูดซับจะเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่อยู่ในรูพรุน การเกิดการควบแน่นในรูพรุนขนาดเล็กแบบกะปิลารี (Capillary condensation) นี้เกิดขึ้นได้ในรูพรุนขนาดเล็กเมื่อค่า P/P_0 น้อยกว่า 1

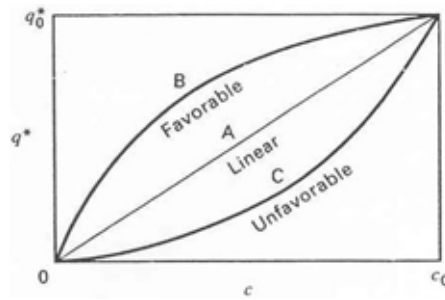


รูปที่ 2.12 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแก๊สอาร์กอน และไนโตรเจนที่ -195°C และของ นอร์มัลเพนเทน ที่ 0°C บนแก้วที่มีความพรุน [จตุพร และนุรักษ์, 2547]



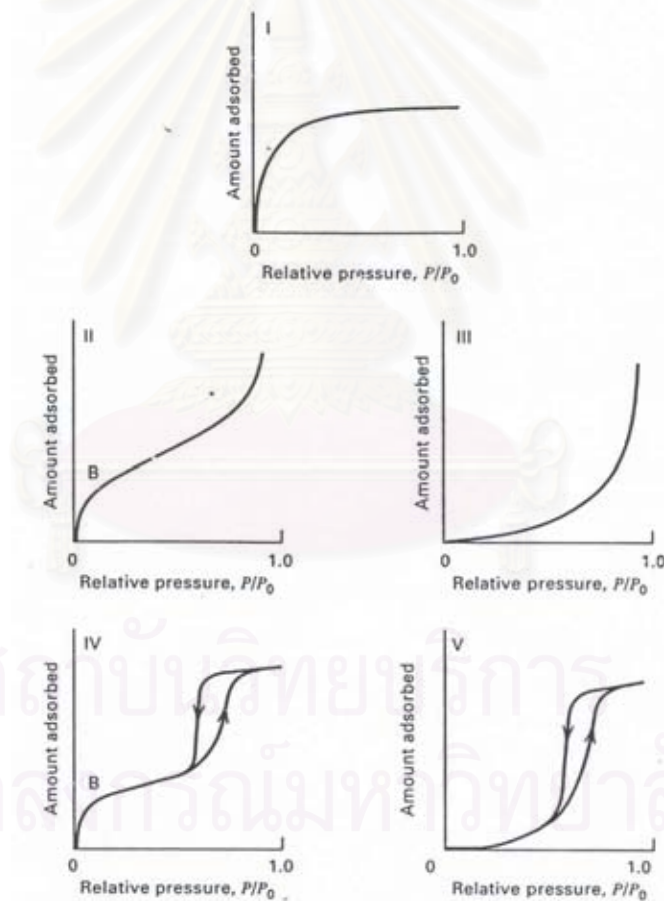
รูปที่ 2.13 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ -195°C บนวัสดุที่มีความพรุน [จตุพร และนุรักษ์, 2547]

ไอโซเทอร์มของการดูดซับทางกายภาพมีหลากหลาย ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับซึ่งสามารถแบ่งไอโซเทอร์มหลักได้ 3 ประเภทดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ไอโซเทอร์ม 3 ประเภท (A) Linear, (B) Favorable, (c) Unfavorable [Seader, 1998]

ในปี ค.ศ. 1945 Brunauer ได้จำแนกชนิดของไอโซเทอร์มเป็น 5 ชนิด คือ ชนิดที่ 1-5 ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งชื่อที่เรียกเป็นไปตาม IUPAC



รูปที่ 2.15 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 ชนิด ตามการจำแนกของ IUPAC [Tien, 1930]

ชนิดที่ 1 (Type I) เรียกว่าไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) สำหรับการดูดซับที่ถือว่าเป็นชั้นเดียว ตามสมการของแลงเมียร์ (Langmuir equation) ไอโซเทอร์มแบบนี้มักจะพบในวัสดุที่มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ เช่น ซีโอไลต์ หรือ ถ่านกัมมันต์บางชนิด ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่กรณีเช่นนี้ปริมาตรของรูพรุนจะมีค่ามากกว่าปริมาตรที่ทำให้เกิดการดูดซับชั้นเดียวมาก การดูดซับแบบนี้จะพบได้ในการดูดซับที่ย้อนกลับได้

ชนิดที่ 2 (Type II) บางครั้งจะเรียกว่า Sigmoid หรือไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่หรือมาโครพอร์ส (Macroporous) ตำแหน่ง B ซึ่งเป็นคล้ายหัวเข่าเป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวแล้ว หลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น ดังนั้นปริมาณการดูดซับที่จุด B จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ การดูดซับแบบนี้ย้อนกลับได้

ชนิดที่ 3 (Type III) มีรูปร่างเหมือนกระจกเงา และไม่มีตำแหน่งที่เหมือนหัวเข่า ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อย จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อน เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ เช่น การดูดซับของสารที่มีขั้วบนวัสดุที่ไม่มีขั้ว หลังจากผิวหน้าถูกคลุมหมดแล้ว การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงแรงดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกันเองมีสูง ตัวอย่างการดูดซับแบบนี้ได้แก่ การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์

ชนิดที่ 4 (Type IV) มักจะพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบมีโซพอร์ส (Mesopore) คือมีขนาดของรูพรุนระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร การดูดซับในช่วงแรกซึ่งมีค่า P/P_0 ต่ำจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า P/P_0 มาก ซึ่งเกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบกะปิลารี ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส ซึ่งเกิดจากเส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายไม่ทับกัน เพราะการคายเกิดได้ยากกว่า เพราะต้องเอาชนะแรงกะปิลารีขนาดของการเกิดการควบแน่นในรูขนาดเล็กสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายของขนาดรูพรุน (Pore-size distribution) ได้

ชนิดที่ 5 (Type V) เหมือนกับชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุนในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า P/P_0 สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ ส่วนฮิสเทอรีซิสจากการดูดซับและการคาย ก็เกิดจากการเอาชนะแรงกะปิลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ไอโซเทอร์มชนิดนี้พบบ่อยนัก

ไอโซเทอร์มของการดูดซับมีค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องคือ

- 1) V คือปริมาตรการดูดซับ (ส่วนใหญ่จะเป็น cm^3 ณ สภาวะมาตรฐาน)
- 2) V_m คือปริมาณของตัวถูกดูดซับที่น้อยที่สุดที่คลุมผิวหน้าแบบชั้นเดียวพอดี
- 3) θ คือสัดส่วนของการคลุมผิวหน้าที่ความดันเมื่อเกิดสมดุล

4) P และ Po คือความดันย่อยของตัวถูกละลายและความดันไอ ณ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับตามลำดับ

ปริมาณของสารที่ดูดซับอยู่บนผิวหน้าหาได้จากไอโซเทอร์มซึ่งเป็นการพล็อตระหว่าง θ กับความดันย่อยเมื่ออุณหภูมิคงที่ โดย θ คือสัดส่วนของผิวหน้าที่ถูกคลุมด้วยอะตอมหรือโมเลกุลที่มาดูดซับที่ผิวหน้า ไอโซเทอร์มเป็นตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ผิวหน้าซึ่งไม่สามารถวัดได้ กับความเข้มข้นของแก๊สซึ่งสามารถวัดได้ คำจำกัดความของสัดส่วนของการคลุม (θ) คือ ปริมาณที่ดูดซับต่อปริมาณที่ต้องการในการทำให้เกิดการคลุมแบบชั้นเดียว (V/Vm) โดยทั่วไปค่า θ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดัน นั่นคือ θ เป็นฟังก์ชันกับความดันเมื่ออุณหภูมิคงที่ การขึ้นกับอุณหภูมิจะเกี่ยวข้องกับค่าเอนทัลปีของการดูดซับ

2.3.4.1 ไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง (Linear Isotherm)

Linear Isotherm แสดงถึงความสามารถการดูดซับของของแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นกับความเข้มข้นในของไหล ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการดังนี้ $q = Kc$; K คือค่าคงที่และหาได้จากการทดลอง เห็นได้ว่าสมการดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายกับกฎของเฮนรี มักพบในระบบที่มีความเข้มข้นค่อนข้างเจือจางมาก

เมื่อ q คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ

c คือ ความเข้มข้นของสารละลาย

K คือ ค่าคงที่สมดุล

2.3.4.2 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

ใช้สำหรับการดูดซับบนผิวหน้าอุดมคติ เป็นไอโซเทอร์มที่ง่ายที่สุดใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งหลักการเกิดการดูดซับมากจากสมมุติฐานต่อไปนี้

- 1) การดูดซับ เป็นการดูดซับที่แข็งแรงและเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer)
- 2) สารหนึ่งตัวจะดูดซับบนหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น (เป็นค่าคงที่และต้องปรับถ้าปริมาณสัมพันธ์ไม่เท่ากับ 1:1)
- 3) เอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH_A) ไม่ขึ้นกับ θ ซึ่งหมายความว่าแต่ละตำแหน่งมีพลังงานเท่า ๆ กัน และไม่มีอันตรกิริยาระหว่างตำแหน่ง และ/หรือ ระหว่างตัวถูกละลายด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็แรงผลักหรือแรงดึงดูด
- 4) มีสมดุลเกิดขึ้นระหว่างการดูดซับและการคาย นั่นคืออัตราเร็วของการดูดซับเท่ากับอัตราเร็วของการคายจากผิวหน้า

เมื่อแก๊ส A ที่ความดัน Pa มาดูดซับบนผิวหน้าโดยไม่มีการแตกของพันธะเคมี



เมื่อ θ_A คือสัดส่วนของผิวหน้าที่ถูกคลุมด้วยอะตอมหรือโมเลกุลที่มาดูดซับที่ผิวหน้า อัตราเร็วของการดูดซับ (dn_A/dt) จะแปรตามอัตราของการชนของโมเลกุลซึ่งแปรตามค่าความดันของแก๊สนั้น กับตำแหน่งที่ว่างอยู่ ($1 - \theta$) ดังสมการ 2.2 และอัตราของการคายแปรตามจำนวนของโมเลกุลดูดซับบนผิวหน้า ดังสมการ 2.3

$$\left(\frac{dn_A}{dt} \right)_{ads} = k(1 - \theta_A)P_A \quad (2.2)$$

$$\left(\frac{dn_A}{dt} \right)_{des} = k'\theta_A \quad (2.3)$$

ที่สภาวะสมดุลอัตราของการดูดซับเท่ากับอัตราของการคาย นั่นคืออัตราเร็วของสมการ 2.2 เท่ากับอัตราเร็วของสมการ 2.3

$$k(1 - \theta_A)P_A = k'\theta_A$$

ดังนั้นสามารถหาค่าสัดส่วนของผิวหน้าที่ถูกจับอยู่ได้ดังนี้

$$\theta_A = \frac{kP_A}{k' + kP_A}$$

$$\text{เมื่อ} \quad K_A = \frac{k}{k'} = Ae^{+\lambda/RT}$$

$$\lambda = -\Delta H \quad \text{คือค่าความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption)}$$

เมื่อแทนค่า K_A ลงไปจะได้ว่า

$$\theta_A = \frac{V}{V_m} = \frac{K_A P_A}{1 + K_A P_A} \quad (2.4)$$

$$\text{or} = \frac{q}{q_m} = \frac{K_A C_A}{1 + K_A C_A}$$

โดยที่ q, V = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
 C_A, P_A = ความเข้มข้นหรือความดันของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุล
 q_m, V_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่
 ต้องการสำหรับความสามารถในการเกิดเป็น Monolayer
 K_A = ค่าคงที่ของระบบ

ซึ่งค่า K_A จะบอกถึงความแข็งแรงของการดูดซับ ถ้าค่า K_A มากแสดงว่าพันธะแข็งแรงและ
 สัดส่วนของผิวหน้าที่ถูกคลุมมีค่ามากที่อุณหภูมิและความดันคงที่ เมื่อค่า P_A ต่ำ ค่าสัดส่วนจะแปร
 ผันโดยตรงกับ P_A แต่เมื่อค่า P_A สูง (กล่าวคือ $1 \ll K_A P_A$ ทำให้สมการ 2.2 กลายเป็น $\theta = 1$) ค่า
 สัดส่วนจะมีค่าใกล้ 1 และไม่ขึ้นกับความดันอีกต่อไป

ข้อเสียของแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม คือความร้อนของการดูดซับจะลดลงเมื่อผิวหน้าถูกคลุม
 มากขึ้น ซึ่งขัดกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ เนื่องจากมีแรงผลักระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ใกล้
 กันความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของผิวหน้า เนื่องจากการเกิดพันธะระหว่างตัวดูดซับซึ่งเป็นโมเลกุลที่
 ผิวหน้าของของแข็งกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับซึ่งเป็นสารที่มาดูดซับที่ผิวหน้าของของแข็งอาจเป็นได้
 หลายแบบ

2.3.4.3 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

ไอโซเทอร์มแบบนี้ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ มักอธิบายการ
 ดูดซับของสารประกอบประเภทอินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์ และเรซิน
 สังเคราะห์ เป็นต้น ฟรุนดิชไอโซเทอร์มเป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนาจากแลงเมียร์ไอโซเทอร์มที่เกิดบน
 ผิวหน้าวิวิธพันธุ์ ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว โดยกำหนดให้การกระจายตัวของพลังงานมีลักษณะแบบเลขชี้
 กำลัง (Exponential)

$$F_{(E)} = A \exp(-\Delta H/RT) \quad (2.5)$$

ΔH เป็นค่าความร้อนของการดูดซับ ส่วน A เป็นค่าคงที่จากฟังก์ชันการกระจาย
 ตัวของพลังงานความร้อน

แม้ว่าสมการที่กล่าวนี้จะใช้สถานะแก๊ส แต่สามารถกระจายต่อให้ใช้งานได้กับสถานะของเหลวได้เช่นกัน กล่าวคือ ความดันในสถานะแก๊สจะถูกแทนที่ด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นที่สมดุลของตัวถูกละลายในน้ำกับค่าการละลายของสารถูกละลายในน้ำ C_e/C_s

$$\frac{q_e}{q_s} = \frac{A_a k_a \left(\frac{C_e}{C_s} \right)^{-\Delta H/RT}}{A_d k_d}$$

เมื่อ k_a และ k_d เป็นค่าคงที่การดูดซับและการคายออก q_e และ q_s คือปริมาณการดูดซับ ณ สถานะสมดุลและที่สถานะอิ่มตัว ตามลำดับสมการข้างบนจึงสามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{q_e}{q_s} = K \left(\frac{C_e}{C_s} \right)^{1/n}$$

เมื่อ $1/n = \alpha RT$ และ $\theta = q_e/q_s$

$$\theta = K \left(\frac{C_e}{C_s} \right)^{1/n} \text{ กรณีของสารละลาย} \quad (2.6)$$

$$\theta = K (P_A)^{1/n} \text{ กรณีของแก๊ส} \quad (2.7)$$

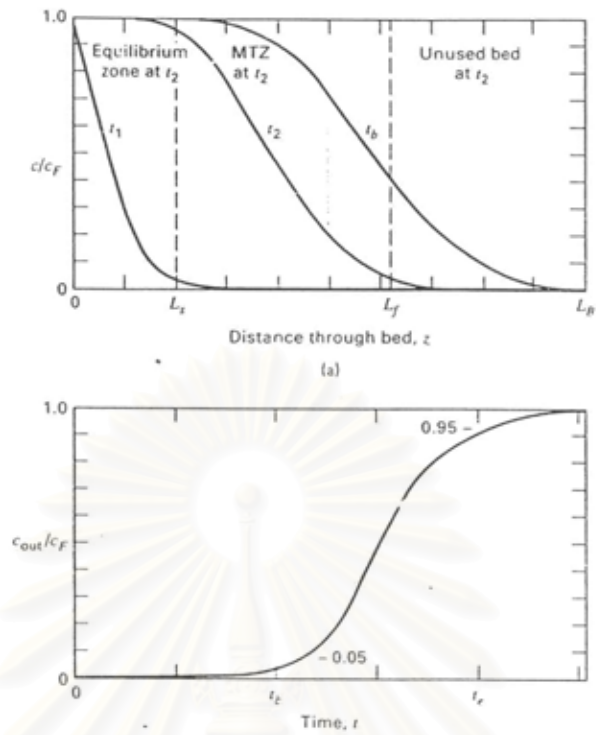
ค่า K และค่า C ส่วนใหญ่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า n ที่มากกว่า 1 หมายถึงการที่โมเลกุลที่มาดูดซับบนผิวหน้ามีแรงผลักร่วมกัน

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มชนิดต่าง ๆ [จตุพร และนุรักษ์, 2547]

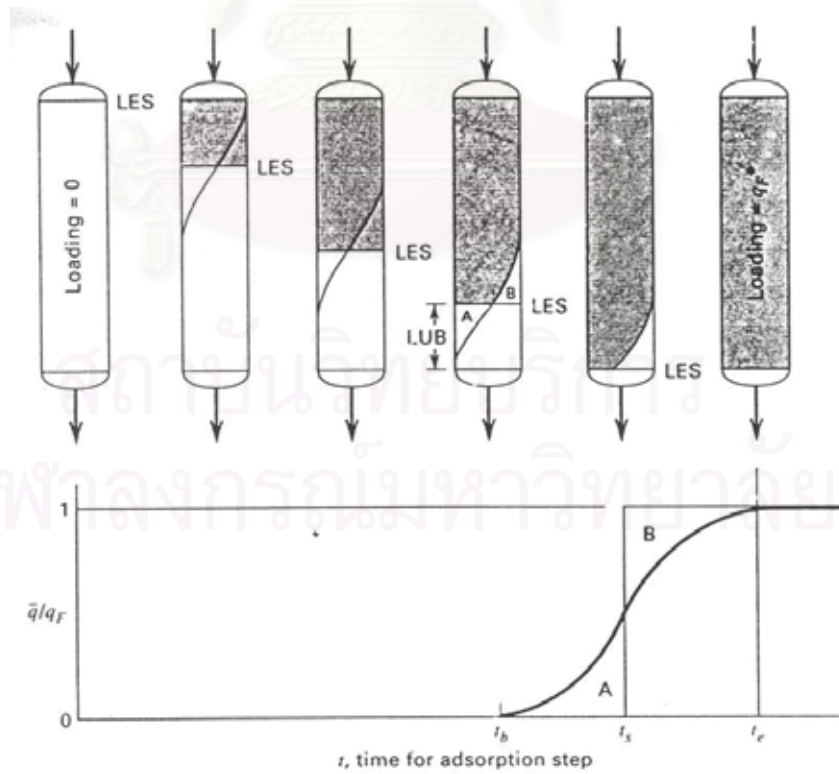
ชนิดของไอโซเทอร์ม	ข้อดี	ข้อเสีย
ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์	เป็นไอโซเทอร์มที่ดีที่สุดเหมาะกับตัวแปรเดียว	ไม่สนใจแรงกระทำระหว่างตัวถูกละลายกับตัวถูกละลายข้างๆ
ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช	เหมาะกับ Low Coverage	ไม่สนใจสภาวะกายภาพที่พื้นผิว

2.3.5 การดูดซับแบบเบตนิ่ง (Fixed bed adsorption)

ระบบการดูดซับแบบนี้ของไหลความเข้มข้น C_0 ไหลลงผ่านชั้นของตัวดูดซับซึ่งอยู่กับที่ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง ลักษณะการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบและบริเวณของการดูดซับค่อยๆ เคลื่อนลงเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของชั้น จนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนบนของชั้น ปริมาณสารถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในของไหลที่ไหลออกในช่วงแรกมีค่าน้อยมาก หรือเท่ากับศูนย์ ในเวลาต่อมาสารดูดซับที่อยู่ส่วนบนของคอลัมน์เกิดการอิ่มตัว แต่สารถูกดูดซับยังคงถูกดูดซับโดยสารดูดซับที่อยู่ในช่วงถัดมาของคอลัมน์ ส่งผลให้ปริมาณสารถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในของไหลที่ไหลออกยังคงมีน้อยมาก จนกระทั่งเมื่อการดูดซับเกิดขึ้นบริเวณส่วนล่างของคอลัมน์ใกล้ทางออก ปริมาณของสารถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในของไหลมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดที่ยอมให้สารถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในของไหลที่ไหลออก เรียกจุดนี้ว่า จุดเบรคทรู (Breakthrough point) หรือใช้เวลา t_b ซึ่งหลังจากนั้นปริมาณของสารถูกดูดซับที่เหลือออกมาเกิดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีค่าเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นในขาเข้าเมื่อสารดูดซับที่อยู่ภายในคอลัมน์เกิดการอิ่มตัวทั้งหมดแนวซึ่งใช้เวลา t_e ส่วนโค้งของความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่มีค่าระหว่าง t_b กับ t_e เรียกว่า เส้นโค้งเบรคทรู (Breakthrough curve) การดูดซับของตัวดูดซับในหอดูดซับขณะที่ของไหลซึ่งประกอบด้วยสารถูกดูดซับไหลผ่าน ซึ่งขอบเขตของการดูดซับนี้เรียกว่า ขอบเขตการถ่ายเทมวล (Mass transfer Zone, MTZ) มีลักษณะคล้ายตัว S ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และสามารถแบ่งขอบเขตภายในคอลัมน์ดูดซับได้ 2 เขต คือ ขอบเขตสมดุล (Equilibrium zone) และ ส่วนที่ตัวดูดซับยังไม่เกิดการใช้งาน (Unused bed) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และสามารถคำนวณหาความยาวของทั้ง 2 ขอบเขตได้จากสมการที่ 2.11 และ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 ขอบเขตการถ่ายเทมวล (Mass transfer Zone, MTZ) [Seader, 1998]



รูปที่ 2.17 การดูดซับในหลอดดูดซับ [Seader, 1998]

จากการทำสมมูลมวลจะได้

$$Q_F c_F t_b = (q_{ref} S) \quad (2.8)$$

$$Q_F c_F t_b = q_{ref} (\rho_B V_B) \quad (2.9)$$

$$Q_F c_F t_b = q_{ref} \rho_B \frac{\pi D^2}{4} (LES) \quad (2.10)$$

$$LES = \left(\frac{Q_F c_F t_b}{q_{ref} \rho_B \frac{\pi D^2}{4}} \right) \quad (2.11)$$

- โดยที่ Q_F = อัตราการป้อนของสารละลายเอทานอล (กรัมต่อวินาที)
 c_F = ความเข้มข้นน้ำในสารป้อน (กรัมของน้ำต่อกรัมของสารละลาย)
 t_b = เวลาที่เกิดเบรคทู (วินาที)
 q_{ref} = ปริมาณตัวดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (กรัมของน้ำต่อกรัมของตัวดูดซับ)
 S = น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)
 ρ_B = ความหนาแน่นเบด (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 V_B = ปริมาตรเบด (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 L_B = ความยาวเบด (เซนติเมตร)

และหาค่า LUB ได้จาก

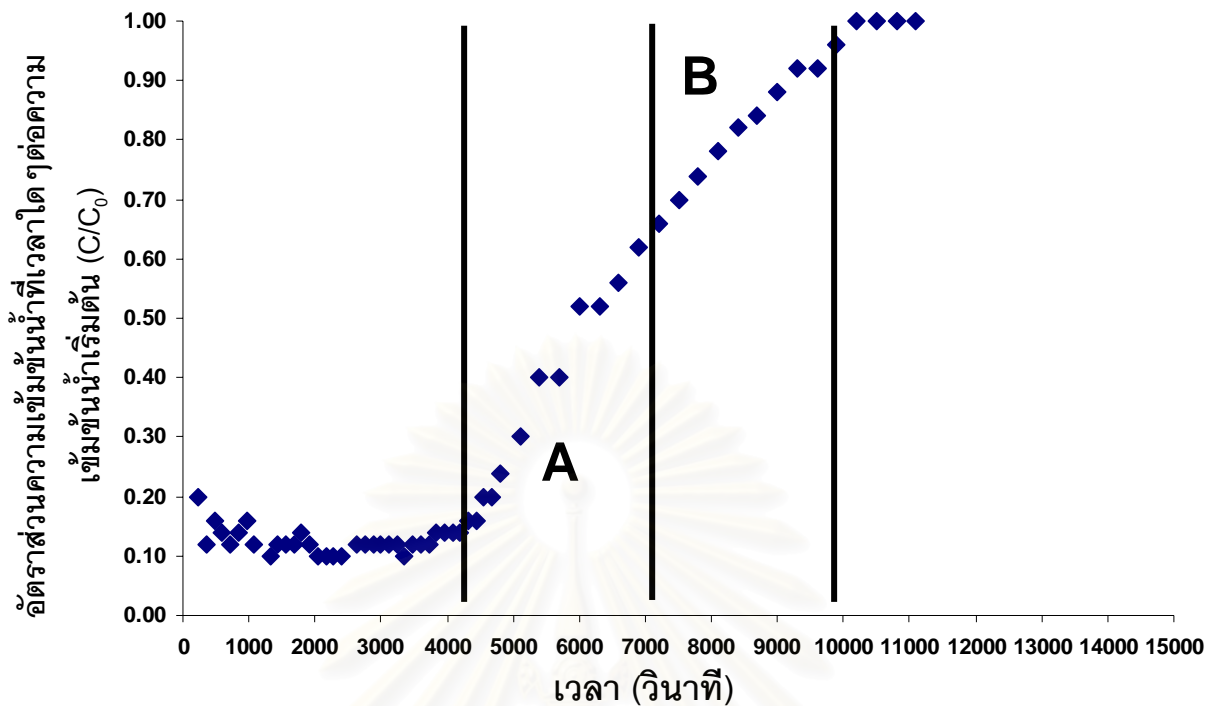
$$LUB = L_B - LES \quad (2.12)$$

ค่า LUB สามารถคำนวณได้อีกวิธีโดยสมการที่ 2.11

$$LUB = L_B \frac{t_s - t_b}{t_s} \quad (2.13)$$

โดยที่ t_s คือ เวลาที่ตัวดูดซับเกิดการอิ่มตัวสามารถหาได้จากกราฟ ซึ่งคือเวลาที่ทำให้พื้นที่ A เท่ากับ B ดังแสดงในรูปที่ 2.18

t_b คือ เวลาเบรคทู



รูปที่ 2.18 การหาค่า t_s จาก เส้นโค้งเบรคทู

2.4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลถือได้ว่าเป็นการออกแบบการทดลองที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรหลายๆปัจจัย ซึ่งการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k มักจะใช้ในช่วงต้นของการทดลอง เนื่องจากมีประโยชน์ในการกรองตัวแปรทั้งหมดเพื่อเลือกตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบเท่านั้นมาทำการทดลองโดยละเอียดต่อไป

สำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k นั้นจะประกอบด้วยตัวแปรหรือปัจจัยที่จะศึกษาจำนวนทั้งหมดเท่ากับ k ตัวแปร โดยแต่ละตัวแปรจะแบ่งออกเป็น 2 ระดับคือระดับสูง และระดับต่ำ โดยที่ระดับของตัวแปรอาจหมายถึงค่าในเชิงปริมาณของตัวแปรนั้นๆ เช่น อุณหภูมิ หรือ ความดัน หรืออาจหมายถึงค่าในเชิงคุณภาพของตัวแปรนั้นๆ เช่น ชนิดของอุปกรณ์ หรือ เครื่องมือ นอกจากนี้ยังอาจแสดงถึงการมีอยู่ของตัวแปรนั้นๆก็ได้ ดังนั้นการออกแบบการทดลองนี้จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $2 \times 2 \times \dots \times 2$ หรือเท่ากับ 2^k นั่นเอง สำหรับในทีนี้จะขอยกตัวอย่างมาเพียงแค่การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 มาเท่านั้น

2.4.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2²

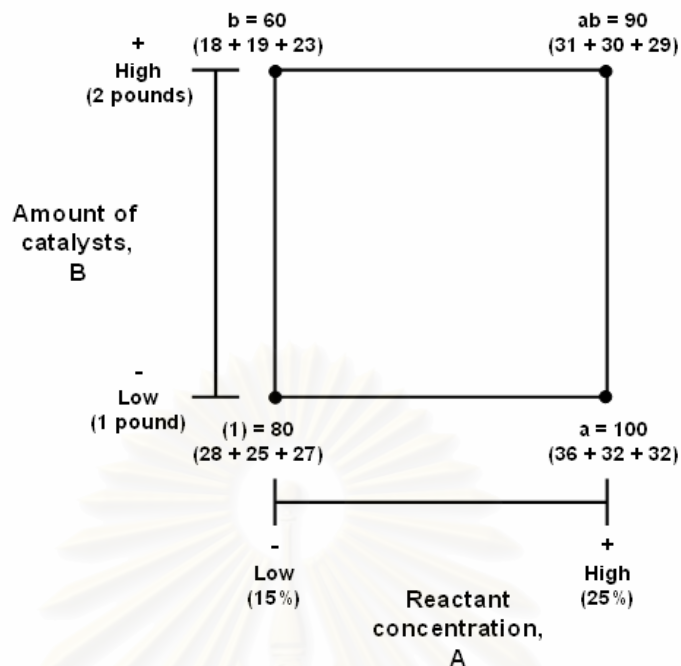
การออกแบบการทดลองนี้จะประกอบไปด้วยตัวแปรเพียงสองตัวเท่านั้น ซึ่งในที่นี้จะเรียกแทนด้วย ตัวแปร A และ ตัวแปร B และระดับของตัวแปรจะเรียกแทนด้วย ระดับสูง (High) และระดับต่ำ (Low) เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายจะขอยกตัวอย่างเป็นการทดลองที่ศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ที่มีต่อผลผลิตที่ได้จากกระบวนการทางเคมี โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นแทนด้วยตัวแปร A มีค่า 2 ระดับที่สนใจคือที่ ร้อยละ 15 และ 25 และ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแทนด้วยตัวแปร B มีค่า 2 ระดับที่สนใจคือ 1 ปอนด์ และ 2 ปอนด์ จากการทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 รอบ ได้ข้อมูลดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลอง [Douglas, 2001]

Factor		Treatment Combination	Replicate			Total
A	B		1	2	3	
-	-	A low, B low	28	25	27	80
+	-	A high, B low	36	32	32	100
-	+	A low, B high	18	19	23	60
+	+	A high, B high	31	30	29	90

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ การจับคู่ของระดับของตัวแปร (Treatment combination) จะแสดงอยู่ในรูปของกราฟที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.19 ซึ่งโดยปกติแล้วตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่จะแสดงถึงผลของตัวแปรนั้นๆ เช่น ตัวอักษร A จะแสดงถึงผลของตัวแปร A หรือความเข้มข้นของสารตั้งต้นและ ในทำนองเดียวกัน ตัวอักษร B จะแสดงถึงผลของตัวแปร B หรือปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่ตัวอักษร AB จะแสดงถึงผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร A กับ B

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.19 แสดงการจับคู่ของระดับของตัวแปรในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2

[Douglas, 2001]

ในการออกแบบการทดลองแบบนี้มักจะกำหนดให้ระดับของตัวแปรคือ ระดับสูง และระดับต่ำ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ + และ - ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าสัญลักษณ์ + และ - ปรากฏอยู่บนเส้นแกนของตัวแปร A และ B ซึ่งสัญลักษณ์ + บนแกนของตัวแปร A จะแสดงถึงความเข้มข้นของสารตั้งต้นระดับสูง (25%) และสัญลักษณ์ - บนแกนของตัวแปร A จะแสดงถึงความเข้มข้นของสารตั้งต้นระดับต่ำ (15%) และบนแกนของตัวแปร B ก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน

จากการจับคู่ของระดับของตัวแปรทั้ง 4 แบบที่ได้ จะเขียนอยู่ในรูปของตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ระดับสูงของแต่ละตัวแปร การจับคู่ที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปของตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กตัวเดียวกับตัวแปรนั้นๆ เพียงแต่อยู่ในรูปของตัวพิมพ์เล็ก ในทางกลับกันก็ไม่ปรากฏตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ระดับต่ำของแต่ละตัวแปรเลย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวอักษร a จะแสดงถึงการจับคู่ระหว่างตัวแปร A ระดับสูง กับตัวแปร B ระดับต่ำ ตัวอักษร b จะแสดงถึงการจับคู่ระหว่างตัวแปร A ระดับต่ำ กับตัวแปร B ระดับสูง และตัวอักษร ab จะแสดงถึงการจับคู่ระหว่างตัวแปร A ระดับสูง กับตัวแปร B ระดับสูง แต่ในกรณีที่เป็นการจับคู่ของตัวแปรระดับต่ำทั้งหมดจะเขียนแทนด้วย (1) ซึ่งการกำหนด

สัญลักษณ์ต่างๆเหล่านี้จะนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่เป็นแบบ 2^k ทุกครั้ง

ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่มี 2 ระดับ จะสามารถกำหนดให้ผลกระทบบที่มีต่อระบบโดยเฉลี่ยของแต่ละตัวแปร เท่ากับการเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของระดับของตัวแปรนั้นๆ บนตัวแปรอื่นๆโดยเฉลี่ย และสัญลักษณ์ a b ab และ (1) จะหมายถึงผลรวมของทุกการทดลองที่ทำซ้ำทั้งหมด n รอบ ในแต่ละแบบของการจับคู่ของระดับของตัวแปร ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 2.19 ดังนั้นผลกระทบของตัวแปร A ที่ระดับต่ำของตัวแปร B จะเท่ากับ $[a - (1)]/n$ และผลกระทบของตัวแปร A ที่ระดับสูงของตัวแปร B จะเท่ากับ $[ab - b]/n$ ซึ่งค่าเฉลี่ยระหว่างค่า 2 ค่านี้จะแสดงถึงผลกระทบหลัก (Main effect) ของตัวแปร A ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2n} \{ [ab - b] + [a - (1)] \} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \end{aligned} \quad (2.14)$$

สำหรับผลกระทบหลักของตัวแปร B ก็สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{2n} \{ [ab - a] + [b - (1)] \} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \end{aligned} \quad (2.15)$$

ในส่วนของผลกระทบที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร A กับ B นั้นจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของตัวแปร A ที่ระดับสูงของตัวแปร B กับผลของตัวแปร A ที่ระดับต่ำของตัวแปร B ดังแสดงในสมการที่ 2.14

$$\begin{aligned} AB &= \frac{1}{2n} \{ [ab - b] - [a - (1)] \} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] \end{aligned} \quad (2.16)$$

โดยในทางกลับกันก็สามารถหาผลกระทบที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร A กับ B ได้จากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของตัวแปร B ที่ระดับสูงของตัวแปร A กับผลของตัวแปร B ที่ระดับต่ำของตัวแปร A ซึ่งจะให้คำตอบเช่นเดียวกับสมการที่ 2.14

ดังนั้นจากตัวอย่างการทดลองที่ยกมาก็จะสามารถหาผลกระทบของแต่ละตัวแปรได้ดังนี้

$$A = \frac{1}{2(3)}(90 + 100 - 60 - 80) = 8.33$$

$$B = \frac{1}{2(3)}(90 + 60 - 100 - 80) = -5.00$$

$$AB = \frac{1}{2(3)}(90 + 80 - 100 - 60) = 1.67$$

จะเห็นได้ว่าผลกระทบหลักของตัวแปร A เป็นค่าบวก หรืออาจพูดได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นจากระดับต่ำ (15%) ไปเป็นระดับสูง (25%) จะส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามการที่ผลกระทบหลักของตัวแปร B เป็นค่าลบนั้นจะหมายถึงการที่ผลผลิตที่ได้ลดลงเมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจะพบว่ามีย่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลกระทบหลักค่าอื่น

ในการทดลองที่ใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k นั้นจะเน้นไปที่การตรวจสอบขนาดและทิศทางของผลกระทบของแต่ละตัวแปร เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกตัวแปรที่สำคัญออกมา และตัดตัวแปรที่ไม่สำคัญทิ้งไป ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ก็สามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจได้ โดยจะสามารถพบได้ทั่วไปตามโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณทางสถิติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ben-Shebil [Ben-Shebil, 1999] ศึกษาผลของความร้อนจากการดูดซับที่ภาวะสมดุลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง การทดลองใช้ซีโอไลต์ชนิด 3 เอ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 24 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นเริ่มต้นมีปริมาณน้ำอยู่ร้อยละ 6.6 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อการดูดซับคือ ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอลที่มีอยู่ในสารป้อน โดยปกติกระบวนการดูดซับจะมีการคายความร้อนอย่างมาก ซึ่งคลื่นความร้อนจะถูกปล่อยออกมาในเวลาเดียวกับที่เส้นโค้งแสดงการถ่ายโอนมวลในระหว่างการดูดซับ (Breakthrough curves) เกิดขึ้น และสามารถควบคุมความเข้มข้นน้ำในสารละลายเอทานอลขาออกได้โดยการลดความเร็วในการผ่านคอลัมน์ และจากผลการทดลองได้ลักษณะของไอโซเทอร์มใกล้เคียงกับโมเดลของ Langmuir และ Freundlich

Carmo และ Gubulin [Carmo และ Gubulin, 1997] ศึกษาการดูดซับของน้ำในสารละลายเอทานอลบนตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด 3เอ ที่ใช้ในทางการค้า โดยใช้โอไลต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดทรงกลมและทรงกระบอก วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์เทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ ผลของอุณหภูมิในการดูดซับ และขนาดของตัวดูดซับ ผลการทดลองพบว่า ทั้งตัวดูดซับทรงกลมและทรงกระบอกมีปริมาณความจุใกล้เคียงกันและค่าความจุจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความสามารถในการแพร่สูงขึ้นด้วย ค่าความสามารถในการแพร่จากการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.67×10^{-5} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

Chang [Chang และคณะ, 2006] และคณะศึกษาการดูดซับไอน้ำโดยใช้แป้งข้าวโพดเป็นตัวดูดซับ การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง และสามารถคำนวณหาไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) กับ เส้นโค้งเบรคทรูได้ จากการทดลองพบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับของน้ำที่อุณหภูมิ 82-100 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นเส้นตรง และนำไปทำนายหา เส้นโค้งเบรคทรู โดยการนำไปเทียบกับผลการทดลองของ Klinkenberg และค่าการถ่ายโอนมวลรวมมีค่าเท่ากับ $2.7813 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

Ladisich [Ladisich และคณะ, 1984] และคณะศึกษาการดูดซับน้ำของผสมเอทานอลและน้ำ โดยใช้แป้งข้าวโพดเป็นตัวดูดซับ ภาวะที่ทำการทดลองคือ ที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของเอทานอลในไอของของผสมอยู่ในช่วงร้อยละโดยน้ำหนัก 49.1-98.4 จากการทดลองพบว่า แป้งข้าวโพดสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าเอทานอล เมื่อผ่านตัวดูดซับจะได้ความเข้มข้นที่สูงกว่าร้อยละ 99.6 นอกจากนี้จากการทดลองยังสามารถใช้แป้งข้าวโพดในการดูดซับน้ำออกจากของผสมอินทรีย์อื่นได้

Teo และ Ruthven [Teo และ Ruthven, 1986] ศึกษาการดูดซับของน้ำจากสารละลายเอทานอลโดยใช้ตัวดูดซับชนิด โมเลกุลาร์ซีฟ 3 อังสตรอม การทดลองทำโดยการผ่านไอของสารละลายเข้าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาดเล็ก จากการทดลองพบว่า อัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับความต้านทานการแพร่ภายในรูพรุน และความต้านทานในชั้นฟิล์ม โดยที่ Breakthrough curves ทำนายโดยการใช้โมเดลของ Weber และ Chakravorti

จากงานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นศึกษาการดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอล-น้ำบนตัวดูดซับที่เป็นซีโอไลต์ 3เอ และตัวดูดซับที่เป็นแป้งข้าวโพด ซึ่งจากการศึกษาพบว่าแป้งข้าวโพดมีความสามารถในการดูดซับได้น้อยกว่าซีโอไลต์ 3เอ งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาการดูดซับสารละลายเอทานอล-น้ำ บนตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด 3เอ และ 4เอ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.3. รูปแบบการศึกษา

เป็นงานวิจัยเชิงการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาการแยกของผสมเอทานอล-น้ำ โดยตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งสามารถหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับและสามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาการผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป

3.4. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเตรียมสารละลายเอทานอล

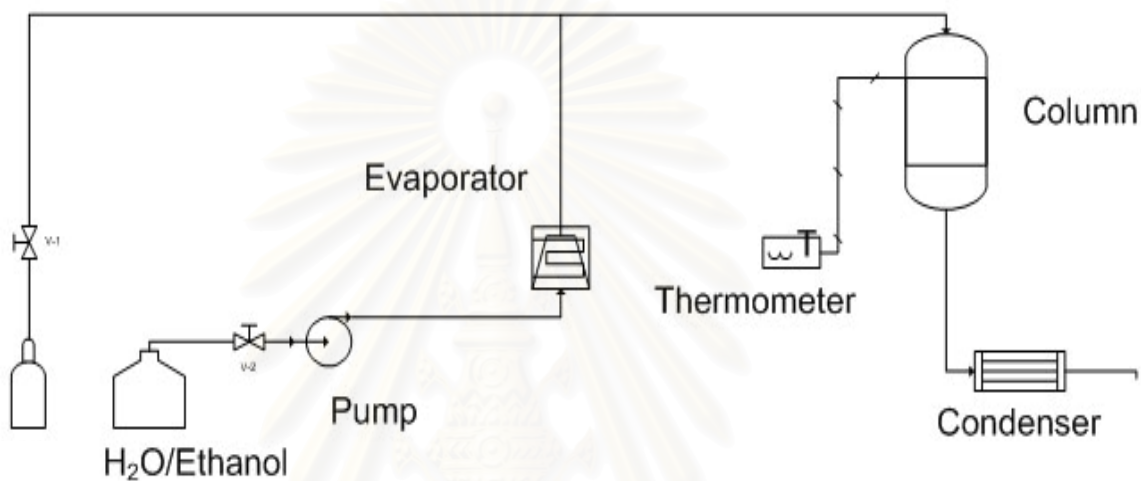
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการงานวิจัยสำหรับศึกษาการดูดซับเอทานอล-น้ำ ประกอบด้วย

1. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 10 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
2. ขวดเตรียมสารละลาย (Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. กระจกตวง (Cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร
4. ขวดน้ำกลั่น

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในศึกษาการดูดซับ

1. ท่อสแตนเลส
2. คอลัมน์สแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5875 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร
3. เครื่องควบแน่น (Condenser)
4. ฮีตเตอร์ (Heater)
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
6. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

7. เครื่องผลิตไอ (Evaporator)
8. เตาเผา (Tubular furnace)
9. เตาอบ (Oven)
10. โรตاميเตอร์ (Rotameter)
11. ปั๊ม (Peristaltic pump)



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.3 สารเคมีที่ใช้

1. เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.7-100 โดยน้ำหนัก Lab grade จากบริษัท BDH
2. ซีโอไลต์ 3เอ ขนาด 4-8 เมช จากบริษัท Tosoh
3. ซีโอไลต์ 4เอ ขนาด 4-8 เมช จากบริษัท Tosoh
3. น้ำกลั่น
4. แก๊สไนโตรเจน (gas N_2) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร



รูปที่ 3.2 ซีโอไลต์ 3เอ ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวดูดซับ

1) เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface area and porosity analyzer)

เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน แสดงดังรูปที่ 3.3 เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area) ขนาดรูพรุน (Pore diameter) และปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption measurement) โดยอาศัยหลักการวิธีของ Brunauer Emmett Teller (BET)



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน รุ่น FlowSorb II 2300 ยี่ห้อ Micromeritics

2) เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal analyzer)

เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่อง TGA/SDTA รุ่น 851° ของ Mettler Toledo แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยใช้เทคนิคเทอร์โมแกลวิเมตริก/ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์โมออลอนาลิซิส (Thermal Gravimetric/Differential Thermal Analysis : TG/DTA) ซึ่งวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนและวัดน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิ เครื่องประกอบด้วยเตาเผา (Furnace) ที่มีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ (Temperature programmer) และมีระบบการชั่งน้ำหนักเข้ามาประกอบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างที่ทดสอบ เช่น อุณหภูมิในการสลายตัว



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนรุ่น TGA/SDTA 851° ของ Mettler Toledo

3) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ C, H, N, (CHN Element Analysis)

เครื่อง CHN Element Analysis ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น CHN-2000 ของ LECO แสดงดังรูปที่ 3.5 CHN Element Analysis เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน ที่ได้จากการเผาไหม้ของตัวอย่าง



รูปที่ 3.5 เครื่อง CHN Element analysis รุ่น CHN-2000 ของ LECO

3.2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นเอทานอล

เครื่องวัดความหนาแน่น (Density meter) ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็นรุ่น DMA 35N ยี่ห้อ Anton Paar โดยสามารถวัดค่าความหนาแน่น ค่าความถ่วงจำเพาะ และ ร้อยละความเข้มข้นของเอทานอลได้ในเครื่องเดียวกัน โดยใช้หลักการการสั่นสะเทือนของ Oscillation Tube โดยคุณสมบัติของเครื่องวัดความหนาแน่นแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของเครื่องวัดความหนาแน่น

Specifications	
Measuring range	Density: 0 to 1.999 g/cm ³ Temperature: 0 to 40 °C (32 to 104 °F), filling at higher temperatures possible
Accuracy	Density: ±0.001 g/cm ³ Temperature: ±0.2 °C
Repeatability, s.d.	Density: 0.0005 g/cm ³ Temperature: 0.1 °C
Resolution	Density: 0.0001 g/cm ³ Temperature: 0.1 °C or 0.1 °F
Permanently stored tables and customer functions	°Brix, % Alcohol, Proof, °Baumé, °Plato, API gravity, API SG, API density, SG at ref.temp., %H ₂ SO ₄ , programmable customer functions
Data memory	1024 measuring values
Power supply	Two 1.5 V alkaline batteries (Micro LR03 AAA)
Sample volume	Approx. 2 ml
Dimensions	140 x 130 x 25 mm (5.5 x 5.1 x 1 inches)
Weight	275 g (10 ounces)
Interface	Optional RS 232 interface with infrared data port

ที่มา: บริษัท Anton Paar



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความหนาแน่นรุ่น DMA 35N ของ Anton Paar

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.4.1 การเตรียมตัวดูดซับและการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration)

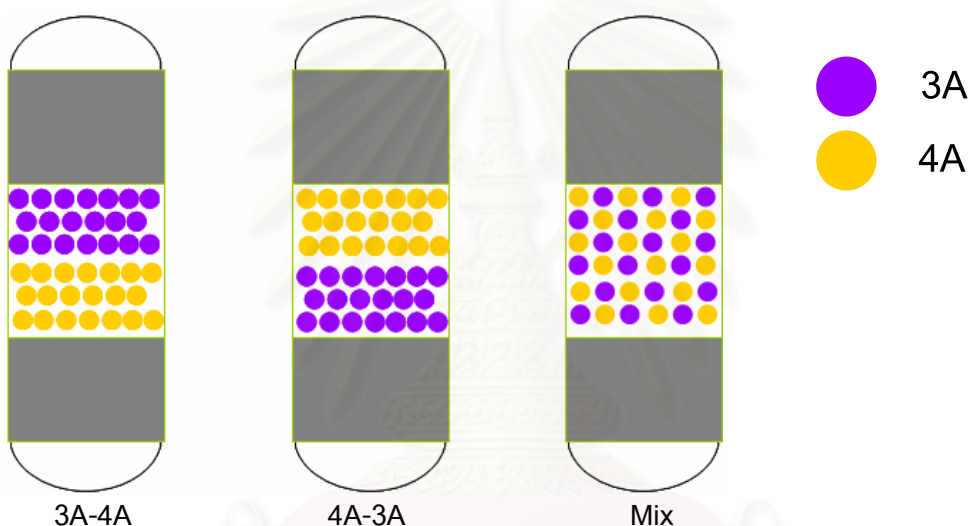
นำตัวดูดซับไปอบที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ด้วยอากาศในเตาอบ ประมาณ 6 ชั่วโมงจากนั้นนำไปเก็บในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน

3.4.2 การทดลองศึกษาการดูดซับ

- 1) บรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์ดูดซับ (น้ำหนักที่ใช้ในการทดลองประมาณ 30 กรัม)
- 2) อบตัวดูดซับโดยการผ่านแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3) อบคอลัมน์โดยการผ่านแก๊สไนโตรเจนให้ได้ที่อุณหภูมิที่จะทำการทดลอง เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง
- 4) เตรียมสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้น 95% โดยน้ำหนัก ปริมาณ 250 มิลลิลิตร
- 5) บำรุงสารละลายเอทานอลผ่านเครื่องผลิตไอและชุดควบคุม เป็นเวลา 15 นาที
- 6) ปิดแก๊สไนโตรเจนแล้วป้อนไอเอทานอลเข้าสู่คอลัมน์ทางด้านบน
- 7) เก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์โดยการควบแน่น ทุกๆ 2 นาที
- 8) ทำการทดลองจนความเข้มข้นเอทานอลขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า
- 9) ทำการทดลองซ้ำโดยการเปลี่ยนค่าปัจจัยที่ศึกษา

3.4.3 การทดลองการผสมกันของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟทั้ง 2 ชนิด

- 1) ทำการทดลองที่อุณหภูมิเบด 90 องศาเซลเซียส, อัตราการป้อนสารละลาย 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และ ความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก
- 2) อัตราส่วนตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ ต่อ 4เอ เท่ากับ 1 ต่อ 1
- 3) ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง 30 กรัม
- 4) ศึกษาการผสมตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟแบบ 3เอ ก่อน 4เอ (3A-4A), 4เอ ก่อน 3เอ (4A-3A) และแบบผสมกัน (Mix) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การบรรจุตัวดูดซับแบบผสม

3.4.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นเอทานอล

- 1) ดูดสารละลายเอทานอลที่ควบแน่นปริมาณ 2 มิลลิลิตร
- 2) อ่านค่าความหนาแน่นหรือความเข้มข้น
- 3) บันทึกข้อมูลความเข้มข้นและอุณหภูมิสารละลาย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำ โดยกระบวนการดูดซับเป็นการศึกษาการดูดซับน้ำออกจากสารละลายในสถานะแก๊สด้วยโมเลกุลาร์ซีฟ (ซีโอไลต์) ชนิด 3เอ และ 4เอ เพื่อให้ความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากเดิมเอทานอลที่ได้จากการกลั่นซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ

4.1. สมบัติของตัวดูดซับ

4.1.1 สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ ของบริษัท Tosoh โดยผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับที่ได้จากทางบริษัทซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ ขนาด 4-8 เมช (mesh)

สมบัติ	หน่วย	3เอ	4เอ
ขนาดตัวดูดซับ (2.36~4.75 มม.)	ร้อยละ		
น้อยกว่า 4.75 มม.		100	100
น้อยกว่า 2.36 มม.		<1	<1
ความหนาแน่น (ขณะเท)	กิโลกรัมต่อลิตร	0.82	.80
(ขณะตริง)	กิโลกรัมต่อลิตร	0.84	.82
ความจุการดูดซับของน้ำ	ร้อยละโดย น้ำหนัก	22	23

ที่มา: บริษัท Tosoh

จากตารางที่ 4.1 พบว่าโมเลกุลาร์ซีฟทั้งชนิด 3เอ และ 4เอ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 2.36 ถึง 4.75 มิลลิเมตร และจากความหนาแน่นในการบรรจุ (Bulk density) ขณะเทและขณะตั้งตึ่งมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.8 ถึง 0.84 กิโลกรัมต่อลิตร และเมื่อพิจารณาความจุของน้ำในตัวดูดซับ พบว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ มีความจุของน้ำมากกว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ อยู่เล็กน้อยโดยมีความจุของน้ำประมาณร้อยละ 22 ถึง 23 โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer Emmett-Teller adsorption: BET) เพื่อหาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ ขนาด 4-8 เมช (mesh)

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (ตารางเมตร/กรัม)
3เอ Tosoh	12.67 ± 0.01
4เอ Tosoh	13.86 ± 0.02

โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 13.86 ตารางเมตรต่อกรัมตัวดูดซับ ซึ่งมากกว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ ที่มีค่าเท่ากับ 12.67 ตารางเมตรต่อกรัมตัวดูดซับ

4.2 การทำ 2^k แฟกทอเรียล

การทดลองนี้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อเวลาเบรคทรู (Breakthrough time) คือ คุณหมุมิเริ่มต้นของเบด ความเข้มข้นของสารป้อน อัตราการป้อนของสารป้อน และชนิดของตัวดูดซับ โดยการกำหนดค่าสูง-ต่ำของแต่ละปัจจัย โดยในที่นี้ให้ค่าสูงเป็น + และค่าต่ำเป็น - ซึ่งค่าของปัจจัยต่างๆมีแสดงในตารางที่ 4.3 และจำนวนการทดลองที่ภาวะที่กำหนดมีแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ปัจจัยที่ศึกษา

ปัจจัย		-	+
A	คุณหมุมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	90	110
B	อัตราการป้อนสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (มิลลิลิตรต่อวินาที)	0.0166	0.033
C	ความเข้มข้นสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (ร้อยละเอทานอลโดยน้ำหนัก)	90	95
D	ชนิดซีโอไลต์	3เอ	4เอ

ตารางที่ 4.4 การทดลอง 2^k แฟกทอเรียล

3เอ			4เอ		
อุณหภูมิเบด เริ่มต้น (องศา เซลเซียส)	อัตราการป้อน สารละลายเอทา นอล(ม.ล.ต่อวินาที)	ความเข้มข้น (ร้อยละเอทา นอลโดย น้ำหนัก)	อุณหภูมิเบด เริ่มต้น (องศา เซลเซียส)	อัตราการป้อน สารละลายเอทา นอล(ม.ล.ต่อวินาที)	ความเข้มข้น (ร้อยละเอทา นอลโดย น้ำหนัก)
90	0.0166	95	90	0.0166	95
110	0.0166	95	110	0.0166	95
90	0.033	95	90	0.033	95
110	0.033	95	110	0.033	95
90	0.0166	90	90	0.0166	90
110	0.0166	90	110	0.0166	90
90	0.033	90	90	0.033	90
110	0.033	90	110	0.033	90

4.2.1 ผลการทดลอง 2^k แฟกทอเรียล

การทดลองดูผลเป็นเวลาเบรคทู (Breakthrough time, t_b) เวลาเบรคทู คือเวลาที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับมีค่ามากกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก หรือความเข้มข้นขาออกของของผสมเอทานอล-น้ำน้อยกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งถ้าเวลาเบรคทูมากแสดงการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ดี ทำให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายที่สูงเป็นเวลานาน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าซีโอไลต์ 3เอ ให้เวลาเบรคทูมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 4200 วินาที ที่ภาวะอุณหภูมิเบดเริ่มต้น 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารป้อนเท่ากับร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ส่วนซีโอไลต์ 4เอ พบว่าให้เวลาเบรคทูมากที่สุดเท่ากับ 2820 วินาที ที่ภาวะอุณหภูมิเบดเริ่มต้น 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารป้อนเท่ากับร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert โดยการเขียนกราฟ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเวลาเบรคทูมากที่สุด คือ อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล และความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยสมการความสัมพันธ์ คือ

$$\text{Breakthrough times} = 23.4375 - 14.3125 * B + 6.9375C$$

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ

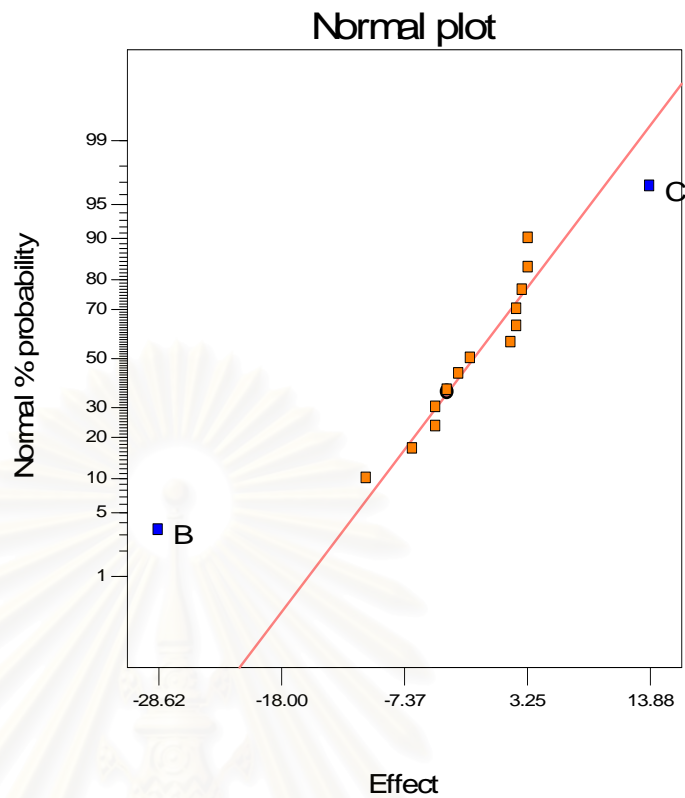
การทดลอง	อุณหภูมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อัตราการป้อน (มล.ต่อวินาที)	ความเข้มข้น (ร้อยละเอทานอลโดยน้ำหนัก)	เวลาเบรคทฤษฎี (วินาที)
1	90	0.0166	95	4200
2	90	0.033	95	840
3	90	0.0166	90	1740
4	90	0.033	90	600
5	110	0.0166	95	2580
6	110	0.033	95	660
7	110	0.0166	90	1680
8	110	0.033	90	540

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ

การทดลอง	อุณหภูมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อัตราการป้อน (มล.ต่อวินาที)	ความเข้มข้น (ร้อยละเอทานอลโดยน้ำหนัก)	เวลาเบรคทฤษฎี (วินาที)
1	90	0.0166	95	2820
2	90	0.033	95	660
3	90	0.0166	90	1260
4	90	0.033	90	360
5	110	0.0166	95	2280
6	110	0.033	95	420
7	110	0.0166	90	1440
8	110	0.033	90	-

DESIGN-EXPERT Plot
Break times

A: Temp.
B: Flow rate
C: Conc.
D: zeolite



รูปที่ 4.1 กราฟ Designs-Expert

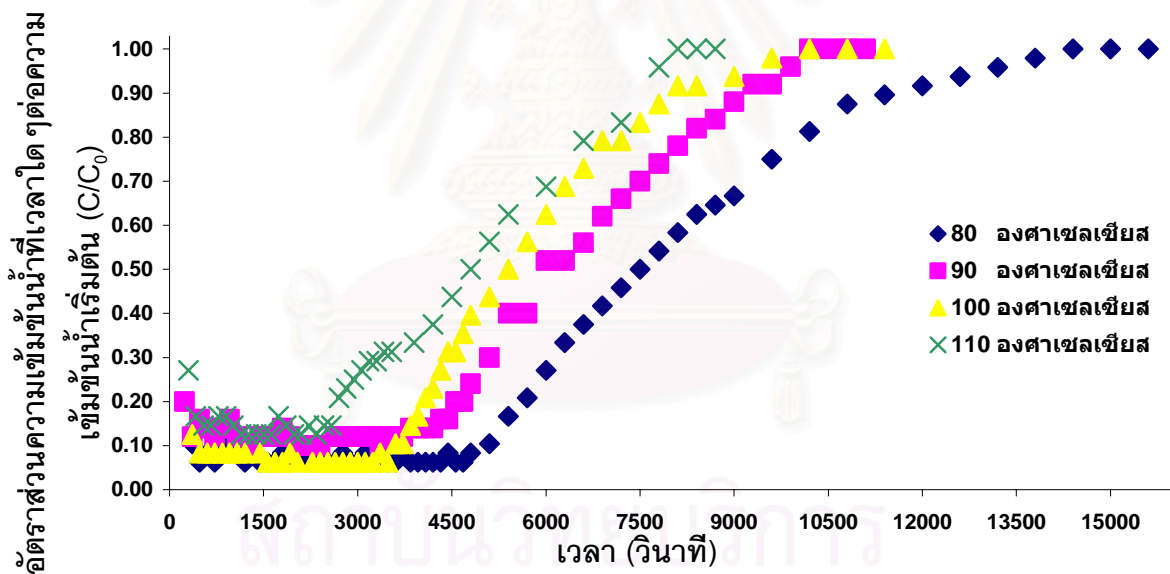
4.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับในการแยกน้ำออกจากเอทานอล ทำการทดลองโดยใช้ซีโอไลต์ชนิด 3เอ เป็นตัวดูดซับ ที่ความสูงเบด 0.22 เมตร ซึ่งเป็นปริมาณมากที่สุดที่สามารถบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิเบดเริ่มต้น อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล ความเข้มข้นของสารป้อน และความสูงเบด โดยผลการทดลองที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปของเส้นโค้งเบรคทูร์ (Breakthrough curve) และ เวลาเบรคทูร์ (Breakthrough time) ซึ่งเวลาเบรคทูร์ แสดงถึงเวลาที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอลที่ผ่านการดูดซับมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะหนึ่ง และเมื่อเวลาในการทดลองมากกว่าเวลาเบรคทูร์ จะไม่สามารถทำการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลด้วยตัวดูดซับได้มากเท่าที่กำหนดไว้ และเส้นโค้งเบรคทูร์เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำขณะนั้นๆกับความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นก่อนถูกดูดซับ (C/C_0) ที่ ณ. เวลาใดๆ โดยกราฟจะแสดงเป็นลักษณะรูปตัวเอส (S-curve)

4.3.1 ผลของอุณหภูมิเบดเริ่มต้นที่มีต่อเวลาเบรคทฐ

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิเบดทำการทดลองที่ อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยมีความสูงเบด 0.22 เมตร และความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก โดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิเบดแตกต่างกันคือ 80 90 100 และ 110 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเบดเริ่มต้นมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้เวลาเบรคทฐ มีค่าลดลง เนื่องจากความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง [Sowerby, 1988] นอกจากนี้อุณหภูมิของเบดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้โมเลกุลของน้ำมีพลังงานสูงมากพอที่สามารถเอาชนะแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับโมเลกุลของน้ำได้ [Lalik และคณะ, 2006] อีกทั้งในระบบการดูดซับอย่างต่อเนื่องจะเกิดการพาความร้อนของเอทานอลทำให้บริเวณส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ที่ยังไม่มีการดูดซับมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิเบดเริ่มต้นที่มีต่อเวลาเบรคทฐ

ซึ่งเวลาเบรคทฐ ที่อุณหภูมิเบดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยที่อุณหภูมิเบดเริ่มต้นเท่ากับ 80 องศาเซลเซียสตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด 3เอ สามารถดูดซับได้ดีที่สุดซึ่งให้เวลาเบรคทฐ ที่ประมาณ 5,100 วินาที และเมื่ออุณหภูมิเบดเพิ่มสูงถึง 110 องศาเซลเซียส เวลาเบรคทฐที่ได้จะลดลงเท่ากับ 2,580 วินาที และเนื่องจากในการแยกน้ำออกจากเอทานอลโดยใช้ตัวดูดซับในคอลัมน์ดูดซับจำเป็นต้องอยู่ในสถานะที่เป็นแก๊ส อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับจึงต้องสูงกว่าจุด

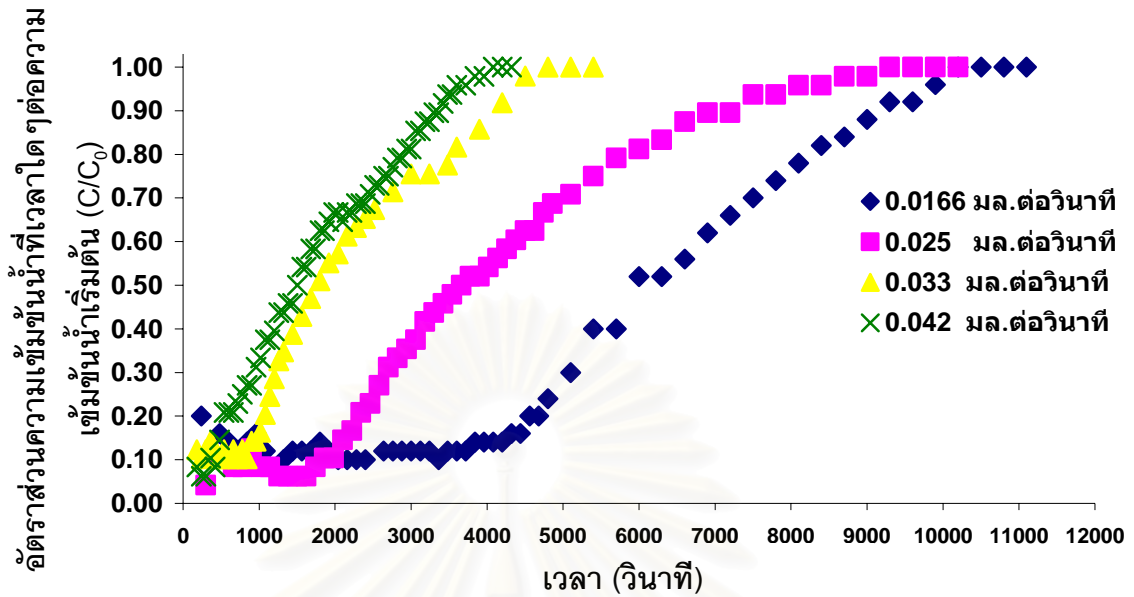
เดือดของสารละลายเอทานอลเพื่อป้องกันไม่ให้สารละลายเอทานอลเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวในคอลัมน์ดูดซับ เนื่องจากการสัมผัสระหว่างตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลวกับตัวดูดซับจะลดลง และจากจุดเดือดของสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 78.2 องศาเซลเซียส ดังนั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จึงเป็นอุณหภูมิเบดที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นอุณหภูมิต่ำที่สุดที่มากกว่าจุดเดือดของสารละลายเอทานอล แต่เนื่องจากอุณหภูมิเบดเริ่มต้นที่ 80 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกับจุดเดือดของสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักมาก การควบคุมสถานะของเอทานอลในการทดลองจึงทำได้ยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกน้ำออกจากเอทานอลโดยใช้ซีโอไลต์ชนิด 3เอ เป็นตัวดูดซับต่อไป

ตารางที่ 4.7 เวลาเบรคทறுที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	เวลาเบรคทறு (วินาที)
80	5,100
90	4,200
100	3,720
110	2,580

4.3.2 ผลของอัตราการป้อนสารละลายเอทานอลเริ่มต้นที่มีต่อเวลาเบรคทறு

ในการศึกษาผลของอัตราการป้อนสารละลายเอทานอลที่มีต่อเวลาเบรคทறு โดยการทดลองถูกทำขึ้นที่ อุณหภูมิเบดเริ่มต้น 90 องศาเซลเซียส ความสูงเบด 0.22 เมตร และความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบอัตราการป้อนของสารละลายเอทานอลที่แตกต่างกันคือ 0.0166 0.025 0.033 และ 0.042 มิลลิลิตรต่อวินาที ซึ่งผลของอัตราการป้อนสารละลายเอทานอลที่มีต่อเวลาเบรคทறு แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า เวลาเบรคทறுจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารละลายเอทานอลสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารละลายเอทานอลสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเวลาในการสัมผัส (Contact time) ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารละลายเอทานอลเพิ่มสูงขึ้น การลดลงของเวลาในการสัมผัสจะส่งผลต่อการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งแบบต่อเนื่อง เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนของสารละลายเอทานอลต่ำจะทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสของน้ำในสารละลายเอทานอลกับตัวดูดซับมีมากขึ้น การดูดซับของน้ำจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่อัตราการป้อนของสารละลายเอทานอลสูง [Sowerby, 1988]



รูปที่ 4.3 ผลของอัตราการปนสารละลายเอทานอลเริ่มต้นที่มีต่อเวลาเบรคทู

เวลาเบรคทูที่อัตราการปนสารละลายเอทานอลต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยที่อัตรา การปนสารละลายเอทานอลเท่ากับ 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที ตัวดูดซับซีโอไลต์ 3เอ สามารถ ดูดซับได้ดีที่สุด ซึ่งให้เวลาเบรคทูที่ประมาณ 4,200 วินาที และเมื่ออัตราการปนสารละลาย เอทานอลเริ่มต้นสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะลดลง

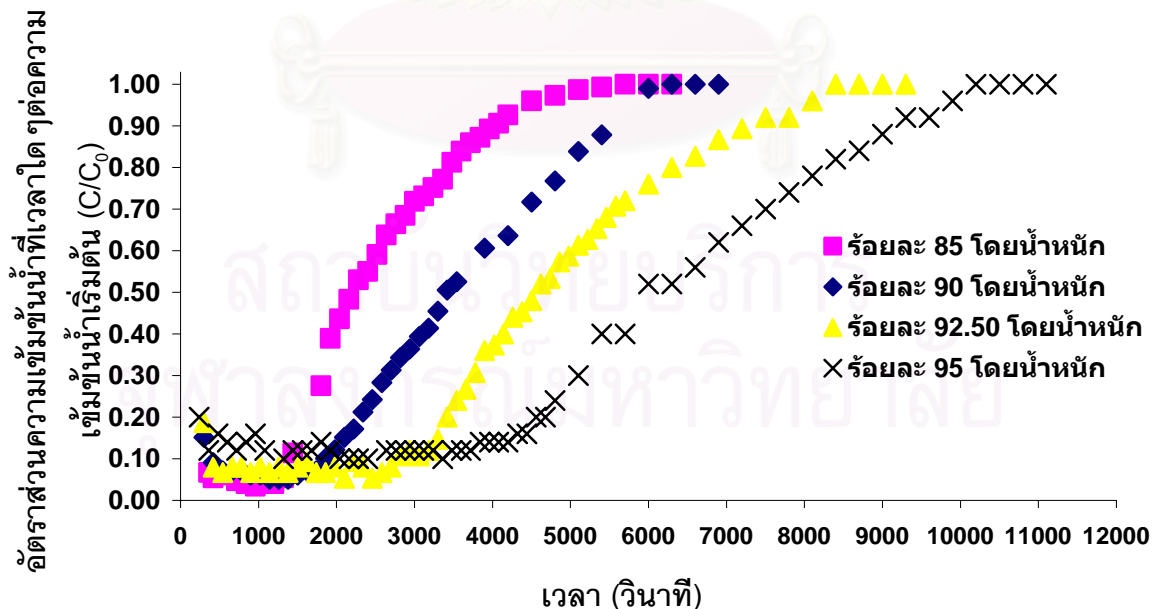
ตารางที่ 4.8 เวลาเบรคทูที่อัตราการปนสารละลายเอทานอลเริ่มต้นต่างๆ

อัตราการปนสารละลายเอทานอล (มิลลิลิตรต่อวินาที)	เวลาเบรคทู (วินาที)
0.0166	4,200
0.025	1,980
0.033	840
0.042	420

4.3.3 ผลของความเข้มข้นสารป้อนที่มีต่อเวลาเบรคทฐ

ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อเวลาเบรคทฐ ทำการทดลองที่ อุณหภูมิเบตเริ่มต้น 90 องศาเซลเซียส ความสูงเบต 0.22 เมตร และอัตราการป้อนสารละลาย เอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยศึกษาความเข้มข้นของสารป้อนตั้งแต่ร้อยละ 85 ถึงร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อเวลาเบรคทฐ แสดงในรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเวลาเบรคทฐจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนมีค่าสูงขึ้น โดยเวลาเบรคทฐที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.9 โดยเวลาเบรคทฐจะมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเท่ากับร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นของสูงจะมีปริมาณน้ำในสารละลายน้อย ส่งผลให้ตัวดูดซับอิมตัวข้าง ตัวดูดซับสามารถดูดซับน้ำได้นานขึ้น จึงทำให้เวลาเบรคทฐมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้มีปริมาณของเอทานอลที่มีอยู่มากในสารละลายจะไปขัดขวางการดูดซับของโมเลกุลน้ำบนตัวดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ตัวดูดซับสามารถดูดซับน้ำได้นานขึ้น [AL-Asheh และคณะ, 2004] ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ใช้เป็นสารป้อนเท่ากับร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก จึงเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลด้วยตัวดูดซับ เนื่องจากมีความเข้มข้นมากที่สุดของสารละลายเอทานอลที่ได้จากการกลั่น



รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายเอทานอลเริ่มต้นที่มีต่อเวลาเบรคทฐ

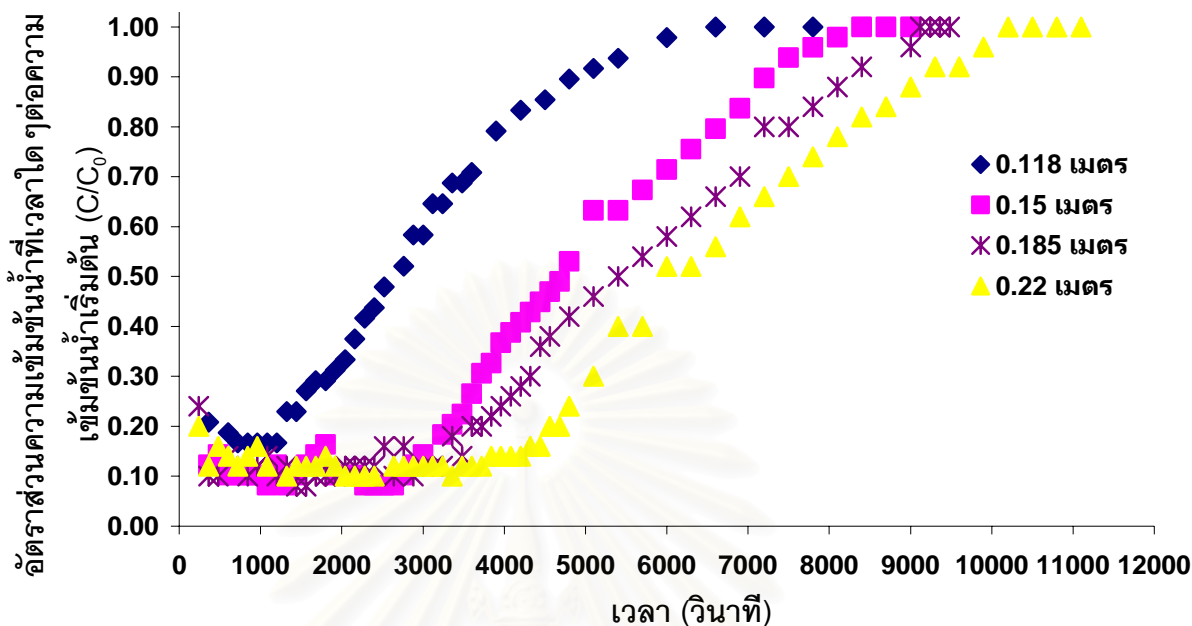
ตารางที่ 4.9 เวลาเบรคทฤษฎีที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เวลาเบรคทฤษฎี (วินาที)
85	960
90	1,740
92.5	2,580
95	4,200

4.3.4 ผลของความสูงเบดที่มีต่อเวลาเบรคทฤษฎี

การศึกษาผลของความสูงเบดที่มีต่อเวลาเบรคทฤษฎี ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลด้วยตัวดูดซับ ได้ถูกทำขึ้นที่อุณหภูมิเบดเริ่มต้นเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก โดยความสูงเบดที่แตกต่างกัน คือ 0.118 0.15 0.185 และ 0.22 เมตร ซึ่งผลของความสูงเบดที่มีต่อเวลาเบรคทฤษฎี แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเวลาเบรคทฤษฎี จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความสูงเบดเพิ่มมากขึ้น เนื่องปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ตัวดูดซับดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่มากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับยังเป็นการเพิ่มความยาวของเบดทำให้ตัวดูดซับมีเวลาในการสัมผัสกับตัวถูกดูดซับนานขึ้น การดูดซับจึงเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีปริมาณตัวดูดซับมาก [Chang และคณะ, 2006]

เวลาเบรคทฤษฎีที่ความสูงเบดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.10 โดยที่ความสูงเบดซีไอไลต์ชนิด 3เอ เท่ากับ 0.22 เมตร ให้เวลาเบรคทฤษฎีมากที่สุด โดยประมาณ 4,200 วินาที และเมื่อความสูงเบดมีปริมาณลดลงครึ่งหนึ่งหรือเท่ากับ 0.188 เมตร เวลาเบรคทฤษฎีที่ได้มีค่าลดลงเหลือ 480 วินาทีหรือประมาณ 9 เท่า



รูปที่ 4.5 ผลของความสูงเบตที่มีต่อเวลาเบรคทฐ

ตารางที่ 4.10 เวลาเบรคทฐที่ความสูงเบตต่างๆ

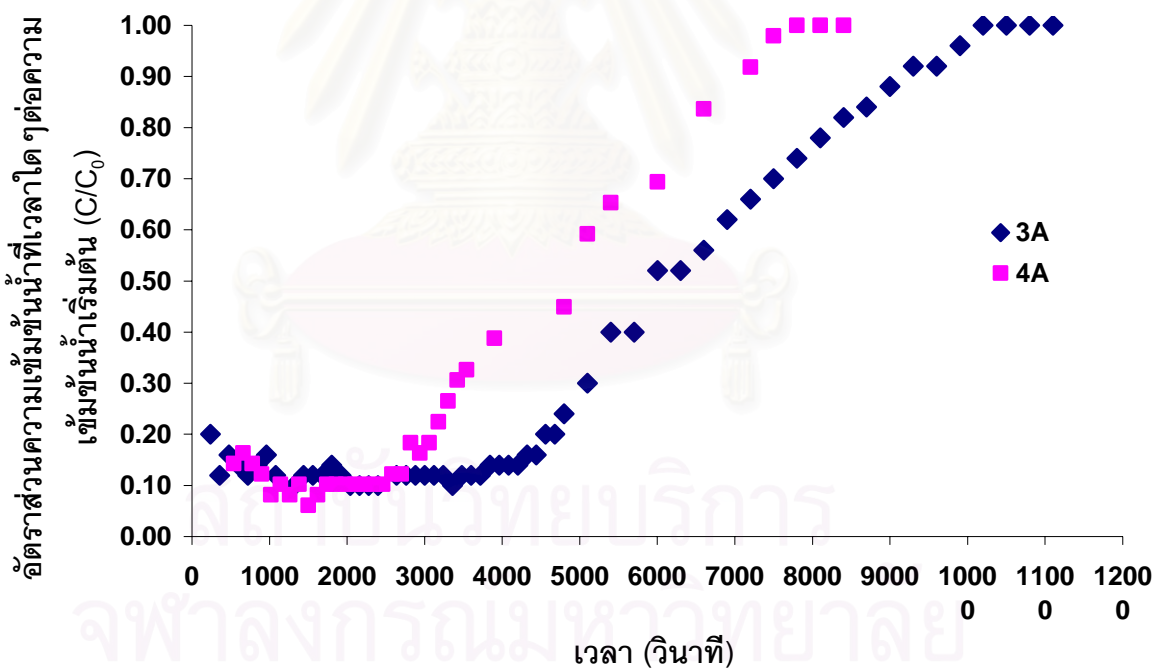
ความสูงเบต (เมตร)	เวลาเบรคทฐ (วันาที)
0.118	480
0.15	1,440
0.185	2,880
0.22	4,200

4.4 ศึกษาการผสมกันของตัวดูดซับ 2 ชนิด

การศึกษาผลของชนิดของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับของสารละลายเอทานอล-น้ำด้วยตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ และ 4เอ ของบริษัท Tosoh ได้ถูกทำขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับในคอลัมน์ดูดซับ การศึกษาผลของชนิดของตัวดูดซับทำขึ้นที่อุณหภูมิเบตเริ่มต้นเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอลเท่ากับ 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก และความสูงเบตในคอลัมน์ดูดซับเท่ากับ 0.22 เมตร ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอลด้วยตัวดูดซับที่ได้จาก

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับในการแยกน้ำออกจากเอทานอลข้างต้น โดยผลการทดลองแสดงในรูปของ เส้นโค้งเบรคทลูซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 กับเวลาเบรคทลู เมื่อ C/C_0 คือ อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำที่เวลาใดๆกับความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นก่อนถูกดูดซับ และ เวลาเบรคทลู คือเวลาที่ความเข้มข้นของน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อผ่านกระบวนการดูดซับมีค่าสูงขึ้นไปอย่างรวดเร็วในขณะหนึ่ง

จากการศึกษาผลของชนิดของตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอลด้วยตัวดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับที่แตกต่างกันคือโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ พบว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ ให้เวลาเบรคทลูมากกว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ดังนั้นโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ จึงสามารถดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอลได้ดีกว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ โดยเวลาเบรคทลูที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ เท่ากับ 4,200 วินาที และ 2,820 วินาที ตามลำดับ

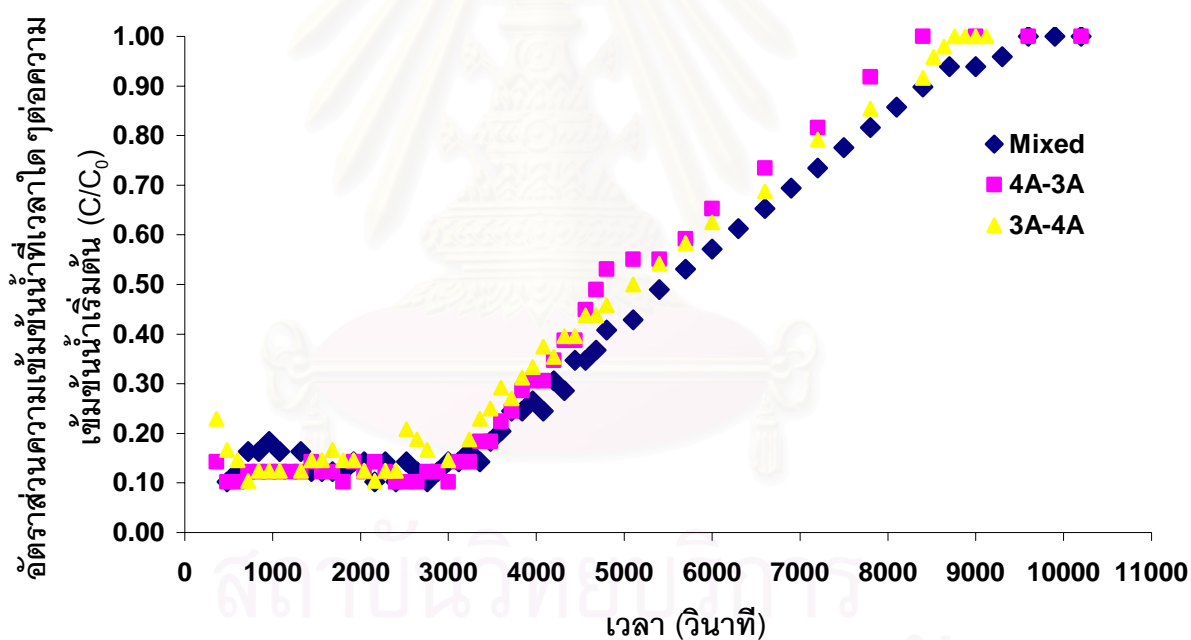


รูปที่ 4.6 ผลของการดูดซับโดยโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ และ 4เอ

และเมื่อนำตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด คือโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ และ โมเลกุลาร์ซีฟ 4เอ มาผสมกัน โดยมีอัตราส่วนของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ ต่อโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ เท่ากับ 1 ต่อ 1 โดยความสูงเบรคทลูทั้งหมดเท่ากับ 0.22 เมตร โดยมีรูปแบบในการบรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์ดูดซับที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ

1. การบรรจุตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ อยู่ด้านบนและโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ ด้านล่างคอลัมน์ (3A-4A)
2. การบรรจุตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ อยู่ด้านบนโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ ด้านล่างคอลัมน์ (4A-3A)
3. การบรรจุตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟผสมกันทั้ง 2 ชนิด (Mixed)

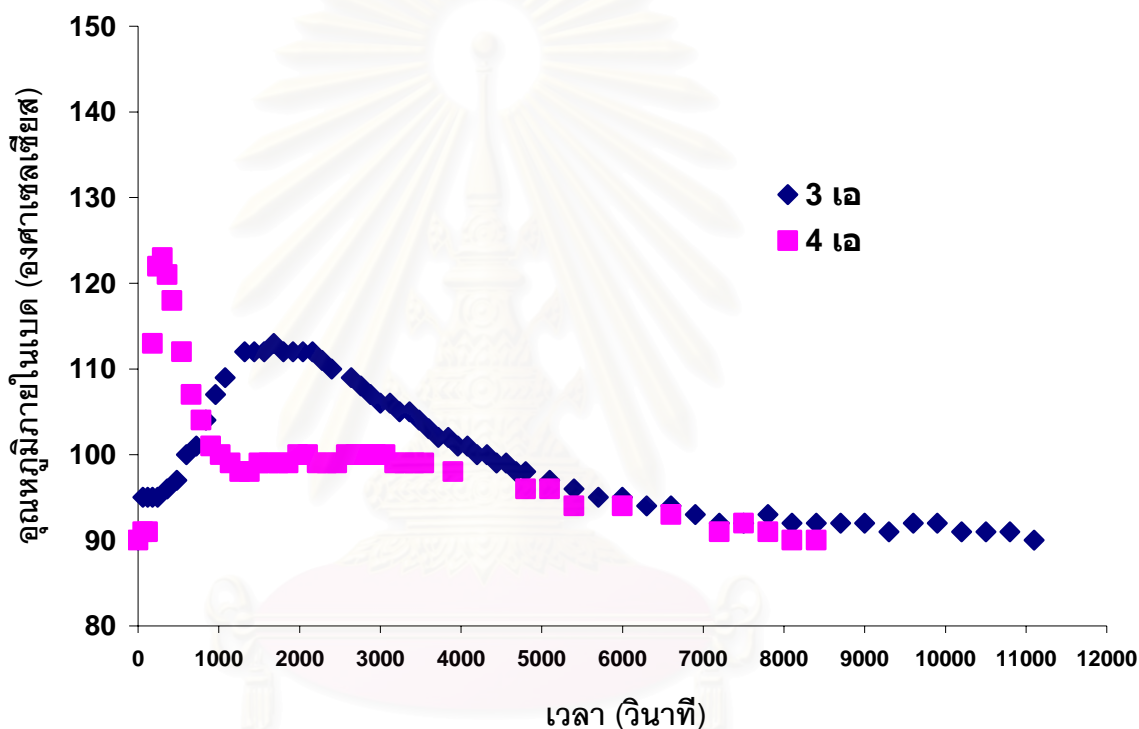
จากผลการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเวลาเบรคทูที่ได้จากโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการผสมกันของโมเลกุลาร์ซีฟทั้ง 3 รูปแบบไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอล โดยเวลาเบรคทูที่ได้จากการผสมกันของโมเลกุลาร์ซีฟมีค่าอยู่ระหว่างเวลาเบรคทูที่ได้จากโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ



รูปที่ 4.7 ผลของการผสมกันของโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ

สาเหตุที่การผสมกันของโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ ทั้ง 3 รูปแบบไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอลสามารถอธิบายได้จากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของเบตทั้ง 2 ชนิดเมื่อเกิดการดูดซับกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยอุณหภูมิของเบตเริ่มต้นเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิภายในของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการดูดซับ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ ซึ่งแสดงว่าการดูดซับน้ำออกจากสารละลาย

เอทานอลด้วยตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ จะเกิดการคายความร้อนมากกว่าการดูดซับด้วยตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับของโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ (4 อังสตรอม) ที่มากกว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ (3 อังสตรอม) จึงเกิดการดูดซับของโมเลกุลเอทานอลบางส่วนเข้าไปในตัวดูดซับของโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ ซึ่งส่งผลให้เกิดการคายความร้อนอย่างมาก ในขณะที่โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ เกิดการดูดซับของโมเลกุลน้ำเพียงอย่างเดียวจึงเกิดการคายความร้อนต่ำกว่า [Lalik และคณะ, 2006]



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิภายในเบดของโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ และ 4เอ

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่มีการคายความร้อน ดังนั้นการดูดซับจึงเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ มีการดูดซับโมเลกุลของเอทานอลเข้าไปบางส่วนจึงทำให้อุณหภูมิเบดมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลงเวลาเบรคทรีที่ได้จึงมีค่าลดลงด้วย ซึ่งเวลาเบรคทรีที่ได้จากการผสมตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 เวลาเบรคทูล์ของการผสมกันของตัวดูดซับ

การผสมกัน	เวลาเบรคทูล์ (วินาที)
3A-4A	2,160
4A-3A	2640
Mixed	2,760

4.5 ความยาวสมดุล (Length of equilibrium zone, LES)

ในเครื่องปฏิกรณ์ของกระบวนการดูดซับแบบเบดนิ่ง เมื่อผ่านสารผสมที่มีสารที่ต้องการดูดซับ และเมื่อตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับแล้ว ตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในช่วงต้นของคอลัมน์ดูดซับจะเข้าสู่การอิ่มตัวของสารที่ต้องการดูดซับก่อนตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในช่วงปลายของคอลัมน์ โดยการอิ่มตัวของสารที่ต้องการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้เกิดขอบเขตของการอิ่มตัวของสารที่ต้องการดูดซับ ขอบเขตของการอิ่มตัวของสารที่ต้องการดูดซับนี้คือชั้นของตัวดูดซับหรือบริเวณของคอลัมน์ดูดซับที่ไม่มีการดูดซับเกิดขึ้น ในขณะที่บริเวณที่นอกเหนือจากขอบเขตของการอิ่มตัวของสารที่ต้องการดูดซับยังมีการดูดซับเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับบริเวณที่ยังมีการดูดซับเกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ขอบเขตสมดุล (Equilibrium Zone) โดยปัจจัยในการดูดซับที่มีผลต่อความยาวสมดุล แสดงดังตารางที่ 4.12 และ 4.13

การทดลองเพื่อหาความยาวสมดุลของทั้งตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ ถูกทำขึ้นที่อุณหภูมิเบดเริ่มต้นเท่ากับ 90 และ 110 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอลเท่ากับ 0.0166 และ 0.033 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารป้อนเท่ากับร้อยละ 90 และ 95 โดยน้ำหนัก พบว่าความยาวสมดุลจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิหรืออัตราการป้อนสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ความยาวสมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นลดลง [Sowerby, 1988] และเมื่อคำนวณหาความจุของปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เวลาเบรคทูล์พบว่าที่อุณหภูมิเบดเริ่มต้นเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอลเท่ากับ 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารป้อนเท่ากับร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก จะให้เวลาเบรคทูล์มากที่สุด โดยตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ มีความจุการดูดซับน้ำเท่ากับ 0.21 กรัมของน้ำต่อกรัมของตัวดูดซับ หรือเท่ากับ ร้อยละ 21 โดยน้ำหนัก และตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ มีความจุเท่ากับ 0.18 กรัมของน้ำต่อกรัมของตัวดูดซับหรือเท่ากับร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.12 ความยาวสมมูลของโมเลกุลารซีฟ 3เอ ที่ภาวะต่างๆ

การทดลอง	อุณหภูมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล (มล.ต่อวินาที)	ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เวลาเบรคทรู (วินาที)	LES (ชม.)	LUB (ชม.)	ความจุการดูดซับน้ำที่ t_b (กรัมน้ำต่อกรัมตัวดูดซับ)
1	90	0.0166	95	4200	12.63	9.37	0.18
2	90	0.033	95	840	7.35	14.65	0.12
3	90	0.0166	90	1740	9.20	12.80	0.21
4	90	0.033	90	600	7.04	14.96	0.19
5	110	0.0166	95	2580	10.61	11.39	0.12
6	110	0.033	95	660	6.86	15.14	0.09
7	110	0.0166	90	1680	9.80	12.20	0.18
8	110	0.033	90	540	7.30	14.70	0.19

ตารางที่ 4.13 ความยาวสมมูลของโมเลกุลารซีฟ 4เอ ที่ภาวะต่างๆ

การทดลอง	อุณหภูมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล (มล.ต่อวินาที)	ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เวลาเบรคทรู (วินาที)	LES (ชม.)	LUB (ชม.)	ความจุการดูดซับน้ำที่ t_b (กรัมน้ำต่อกรัมตัวดูดซับ)
1	90	0.0166	95	2820	11.66	10.34	0.13
2	90	0.033	95	660	6.01	15.99	0.11
3	90	0.0166	90	1260	7.79	14.21	0.18
4	90	0.033	90	360	4.37	17.63	0.17
5	110	0.0166	95	2280	11.51	10.49	0.10
6	110	0.033	95	420	5.49	16.51	0.07
7	110	0.0166	90	1440	9.95	12.05	0.16
8	110	0.033	90	-	-	-	-

4.6 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับหรือตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลกับความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่อุณหภูมิหนึ่งเรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) โดยที่ไอโซเทอร์มของการดูดซับสามารถบอกได้ถึงกลไกการดูดซับของตัวดูดซับ คือ การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนไอโซเทอร์มของการดูดซับจากข้อมูลการทดลอง 3 แบบ คือ ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear Isotherm) ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ ที่อุณหภูมิเบดเริ่มต้นเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอลเท่ากับ 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความสูงเบด 0.22 เมตร โดยที่ความเข้มข้นของสารป้อนเท่ากับร้อยละ 85 ถึง 95 โดยน้ำหนัก ผลความจุการดูดซับน้ำและความเข้มข้นน้ำมีแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ความจุการดูดซับน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ

การทดลอง	อุณหภูมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความจุการดูดซับน้ำที่สมดุล (กรัมน้ำต่อกรัมตัวดูดซับ)	ลอการิทึมของความจุการดูดซับน้ำ	ลอการิทึมของความเข้มข้น	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำต่อความจุการดูดซับน้ำ
1	90	0.15	0.16	-0.71	-0.82	0.77
2	90	0.1	0.11	-0.74	-1.00	0.54
3	90	0.075	0.18	-0.76	-1.12	0.43
4	90	0.05	0.19	-0.79	-1.30	0.31

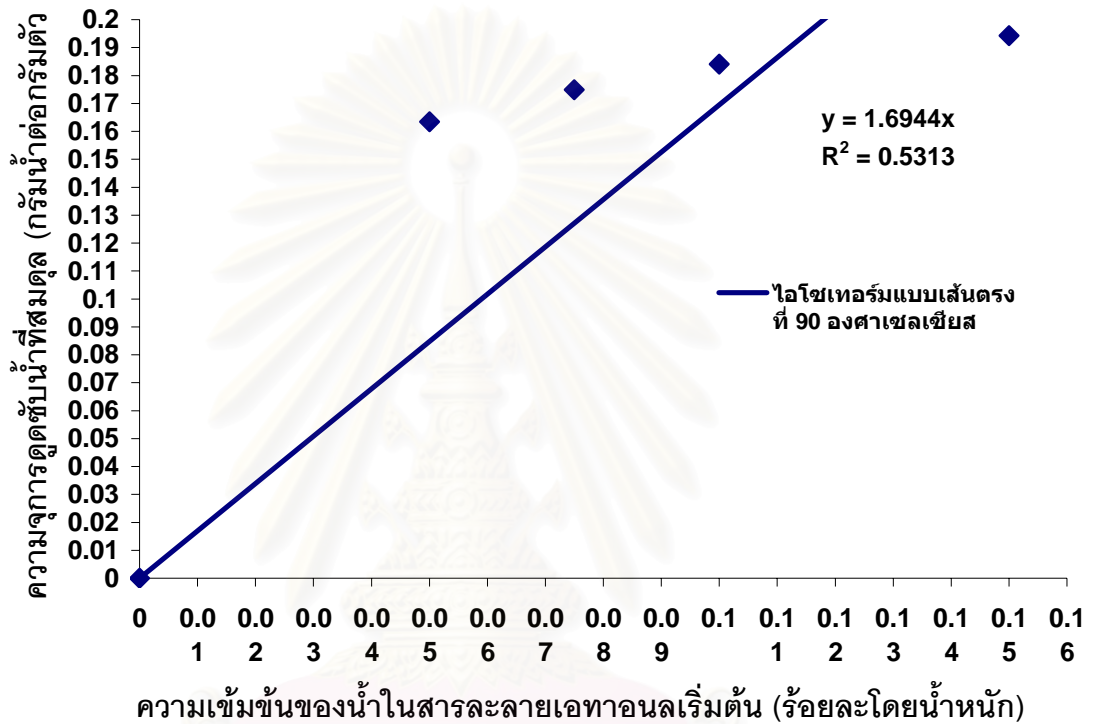
4.6.1 ไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง (Linear Isotherm)

ไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง คือ ไอโซเทอร์มที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับของของแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นกับความเข้มข้นในของไหล ซึ่งในงานวิจัยนี้หมายถึงความสามารถในการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอลของโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ ซึ่งสามารถแสดงดังสมการ

$$q = Kc$$

เมื่อ q คือความจุของตัวดูดซับที่สมดุล คัดได้จากน้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ K คือค่าคงที่ของการดูดซับ และ c คือความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอล ซึ่งค่าคงที่ของการดูดซับหาได้จากการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุของตัวดูดซับกับ

ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอล จากสมการดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับกฎของเฮนรีซึ่งไอโซเทอร์มแบบเส้นตรงนี้มักพบในระบบที่มีความเข้มข้นของของไหลเจือจางมาก จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโดยไอโซเทอร์มแบบเส้นตรงของการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอลของโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งให้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง $q = 1.6944c$



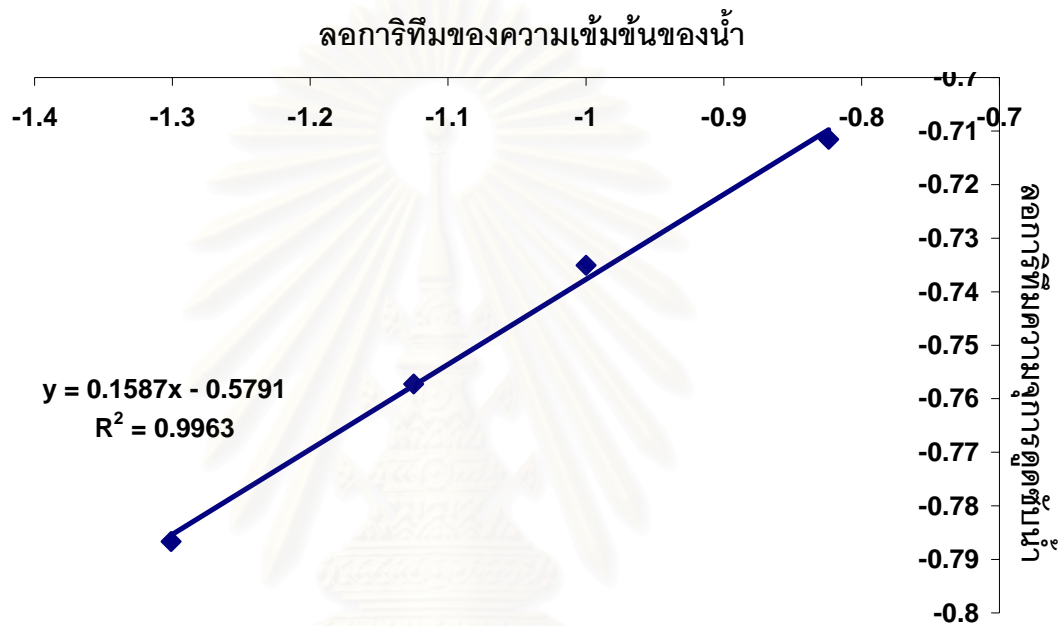
รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง (Linear Isotherm)

4.6.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช(Freundlich isotherm) ถูกเขียนขึ้นโดยมีสมมุติฐานว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ใช้กับการดูดซับทั้งการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชสามารถอธิบายกลไกการดูดซับของตัวดูดซับซึ่งแบ่งเป็นสองช่วงคือ ในช่วงแรกเป็นการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และเมื่อการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกิดขึ้นจนเต็ม การดูดซับในขั้นต่อไปเป็นการดูดซับด้วยแรงอ่อนๆ ระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยกัน เกิดเป็นการเติมเต็มภายในรูพรุน (pore filling) สมการไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชแสดงได้ดังสมการ

$$q = K_f C^{1/n}$$

เมื่อ q คือความจุของตัวดูดซับ เท่ากับน้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ K_f คือค่าคงที่ของการดูดซับของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชซึ่งหาได้จากจุดตัดแกน y ของกราฟ ลอการิทึมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอลโดยมีส่วนกลับของค่าคงที่ของฟรุนดิชเป็นเลขชี้กำลัง และ n คือค่าคงที่ของฟรุนดิชหาได้จากส่วนกลับของความชัน ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชของการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอลของโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

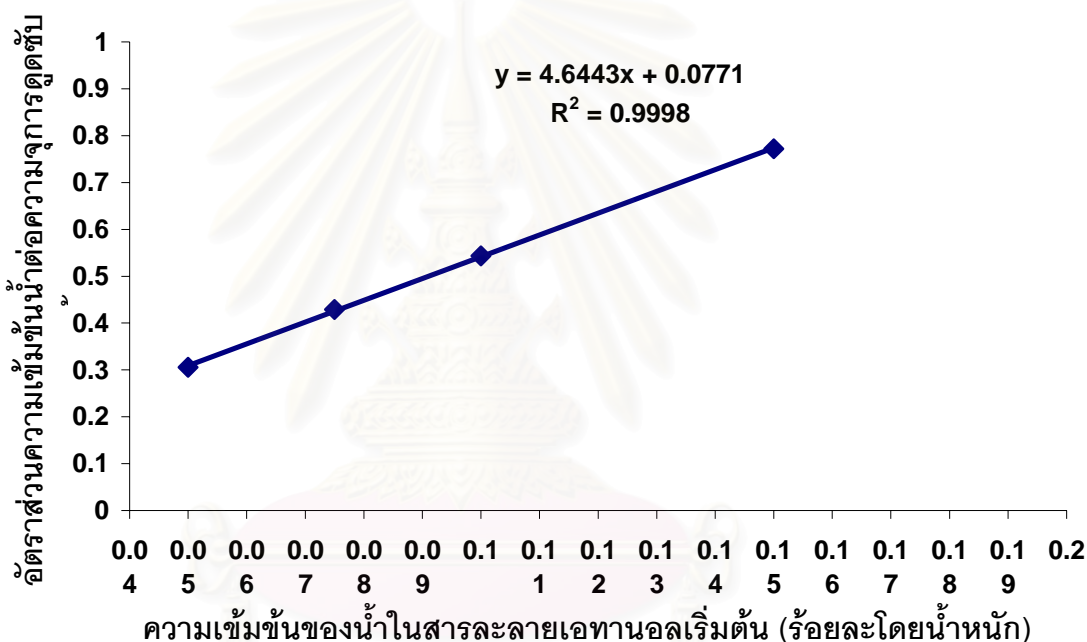
จากรูปที่ 4.10 สามารถเขียนสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิชได้ดังนี้ $q=0.264c^{0.1587}$ โดยค่าคงที่ของการดูดซับของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (K_f) เท่ากับ 0.264 และค่าคงที่ของฟรุนดิช (n) เท่ากับ 6.3

4.6.3 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ได้อธิบายกลไกการดูดซับโดยสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) ไม่มีการเคลื่อนที่อิสระของตัวถูกดูดซับบนผิวของวัสดุดูดซับ สมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์แสดงได้ดังสมการ

$$q = \frac{K_1 q_m C}{1 + K_1 C}$$

เมื่อ q คือความจุของตัวดูดซับ เท่ากับน้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ K_L คือค่าคงที่ของการดูดซับของไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์ q_m คือ ความจุมากที่สุดของการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งเท่ากับส่วนกลับของความชัน จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความจุของน้ำต่อความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอลกับความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอลดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยค่าคงที่ไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์คือความชันของกราฟต่อจุดตัดแกน y ซึ่งสามารถเขียนไอโซเทอรัมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลได้ดังนี้ $q = (12.97c)/(1+60.24c)$ โดยค่าคงที่ของแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 60.24 และความจุมากที่สุด (q_m) เท่ากับ 0.22



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

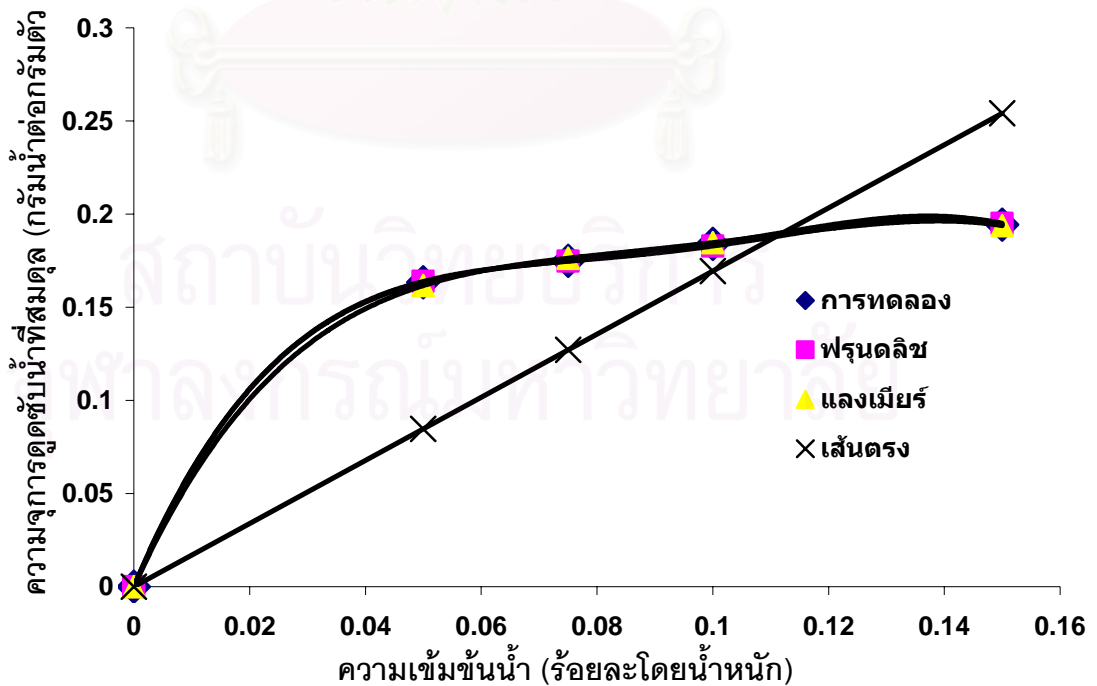
เมื่อพิจารณาค่า R^2 ดังแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่าไอโซเทอรัมการดูดซับแบบเส้นตรงมีค่า $R^2=0.5313$ ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบฟรุนดิชมีค่า $R^2=0.9963$ และไอโซเทอรัมการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่า $R^2=0.9998$ ซึ่งจะเห็นว่าไอโซเทอรัมการดูดซับแบบฟรุนดิชและแบบแลงเมียร์มีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 แสดงว่าไอโซเทอรัมการดูดซับแบบฟรุนดิชและแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมในการอธิบายการดูดซับน้ำของโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล แต่จากการพิจารณาไอโซเทอรัมการดูดซับแบบฟรุนดิชและแบบแลงเมียร์ จะเห็นว่าไอโซเทอรัมการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากกว่าไอโซเทอรัมการดูดซับแบบฟรุนดิชดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าไอโซเทอรัมการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมที่สุดในการ

อธิบายกลไกการดูดซับน้ำโดยโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ ในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอล ดังนั้นกลไกการดูดซับในการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลนี้มีกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer)

ตารางที่ 4.15 ค่า R^2 ของไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ

ไอโซเทอร์ม	R^2
ไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง	0.5313
ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช	0.9963
ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์	0.9998

และเมื่อนำไอโซเทอร์มของการดูดซับทั้ง 3 ไอโซเทอร์มเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าสมการของฟรุนดลิชและแลงเมียร์ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.12 แสดงว่าการดูดซับโดยโมเลกุลาร์ซีฟเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับไอโซเทอร์ม

4.7 การเกิดคาร์บอน (Coke Formation) บนตัวดูดซับ

ในการทำการทดลองหลังจากการดูดซับ (Adsorption) แล้วตัวดูดซับจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการคายการดูดซับ (Desorption) โดยในตอนต้นของการทดลองได้มีการใช้วิธีการฟื้นฟูตัวดูดซับ (Regenerate) ในกระบวนการคายการดูดซับภายในคอลัมน์ดูดซับที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ด้วยแก๊สไนโตรเจน พบว่ามีคาร์บอนเกิดขึ้นบนตัวดูดซับภายหลังกระบวนการฟื้นฟูตัวดูดซับ ดังรูปที่ 4.13 เนื่องจากการแปรสภาพของคาร์บอนจากเอทานอลภายใต้ความร้อนสูงและปราศจากแก๊สออกซิเจน ซึ่งคาร์บอนที่เกิดขึ้นจะติดอยู่ที่ผิวบนของตัวดูดซับและทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของโมเลกุลาร์ซีฟ 3เอ ลดลง ซึ่งภายหลังได้มีการเปลี่ยนวิธีการฟื้นฟูตัวดูดซับเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดคาร์บอน ซึ่งทำได้โดยการนำตัวดูดซับไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เพื่อให้เอทานอลที่อยู่บนผิวของซีโอไลต์ถูกคายออกเหลือเพียงแต่น้ำเป็นส่วนใหญ่ จากนั้นจึงนำตัวดูดซับเข้ามาอบในคอลัมน์ด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เพื่อไล่น้ำออกจากตัวดูดซับอีกครั้งด้วยแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 4.13 โมเลกุลาร์ซีฟภายหลังการใช้งาน

และเมื่อนำโมเลกุลาร์ซีฟไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวดูดซับพบว่า มีพื้นที่ผิวตัวดูดซับลดลงจาก 12.67 ตารางเมตรต่อกรัมตัวดูดซับเป็น 12.26 ตารางเมตรต่อกรัมตัวดูดซับ และเมื่อนำตัวดูดซับไปทดสอบด้วยวิธี Thermogravimetric Analysis (TGA) พบว่ามีการสลายตัวประมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก โดยสอดคล้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยวิธี CHN Element Analysis โดยพบว่ามีปริมาณคาร์บอนสะสมประมาณร้อยละ 3.72

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการดูดซับน้ำในของผสมเอทานอล-น้ำโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ ที่ภาวะอุณหภูมิเบดเริ่มต้นระหว่าง 80 ถึง 110 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 ถึง 0.042 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลร้อยละ 85 ถึง 95 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 30 กรัม สามารถสรุปได้ดังนี้

1) โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ มีความเหมาะสมสำหรับการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลมากกว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ เนื่องจากโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ ให้ความเบรคทูลที่มากกว่าชนิด 4เอ และจากการทดลองพบว่าโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4เอ มีการดูดซับเอทานอลเข้าไปบางส่วนซึ่งสามารถดูได้จากอุณหภูมิที่สูงขึ้นมากอันเนื่องมาจากการคายความร้อนอย่างมากในขณะที่มีการดูดซับเอทานอล

2) เวลาเบรคทูลและความยาวสมดุลงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเบด และอัตราการป้อนสารละลายเอทานอลลดลง

3) เวลาเบรคทูลและความยาวสมดุลงจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลลดลง

4) การผสมกันของตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ และ 4เอ ไม่ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำดีขึ้น

5) ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์เหมาะสมสำหรับการทำนายกลไกการดูดซับน้ำด้วยโมเลกุลาร์ซีฟมากที่สุด แสดงว่าการดูดซับน้ำด้วยโมเลกุลาร์ซีฟเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

6) ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำจากสารละลายเอทานอล คือ

- อุณหภูมิเบด 90 องศาเซลเซียส
- อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที
- ความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 90 ถึง 95 โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาผลของความดันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับและการคายการดูดซับ

5.2.2 นำผลที่ได้ไปศึกษาต่อในการดูดซับแบบความดันสลับ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมธุรกิจพลังงาน. รายละเอียดแนบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของเอทานอลแปลงสภาพ พ.ศ. 2548 ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 122 ตอนพิเศษ 70 ง หน้า 8-10. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.doeb.go.th>. [2549, กรกฎาคม 2].

จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.

นิรนาม. การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงผสมเอทานอล. 2550. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://vcharkarn.com>. [2550, เมษายน 2].

เลิศ รักสันติชาติ. การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอกซ์ที่ใช้แล้วสำหรับดูดซับเอทีเอ็นไคคอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545. หน้า 3-20.

ภาษาอังกฤษ

AL-Asheh, S., Banat, F., and AL-Lagtah, N., Separation of ethanol-water mixtures using molecular sieves and biobased adsorption. Chemical Engineering Research and Design. 82 (2004): 855-864.

Beery, K.E., and Ladisch, M.R., Adsorption of Water from Liquid-Phase Ethanol-water Mixtures at Room Temperature Using Starch-Based Adsorbents. Industrial Engineering Chemical Research. 40 (2001): 2212-2215.

Ben-Shebil, S.M., Effect of heat of adsorption on the adsorptive drying of solvents at equilibrium in a packed bed of zeolite. Chemical Engineering and Processing. 74 (1999): 197-204.

Breck, D.W. 1984, Zeolite Molecular Sieves : Structure, Chemistry and Use. Malabar, Florida: Robert E. Krieger, Publishing Company.

Carmo, M.J., and Gubulin, J.C., Ethanol-Water Adsorption on Commercial 3A Zeolites: Kinetic and Thermodynamic Data. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 14 (1997): 217-224.

Chang, H., Yuan, X., Tian, H., and Zeng A., Experiment and Prediction of Breakthrough Curves for Packed Bed Adsorption of Water Vapor on Cornmeal. Chemical Engineering and Processing. 45 (2006): 747-754.

- Douglas, C.M., 2001. Design and analysis of experiment 5th ed. New York: John Wiley & Son.
- Jacques, K.A., Lyons, T.P. and Kelsall, D.R., 2003. The Alcohol Textbook 4th ed. Nottingham: Nottingham University Press.
- Ladisich, M.R., Voloch, M., Hong, J., Bienkowski, P., and Tsao, T., Cornmeal adsorber for Dehydrating Ethanol Vapors. Industrial Engineering Chemical Process Design Development, 23 (1984): 437-443
- Lalik, E., Mirek, R., Rakoczy, J., and Groszek, A., Microcalorimetric study of sorption of water and ethanol in zeolites 3A and 5A. Catalysis Today, 114 (2006): 242-247.
- Rakshit, S.K., Ghosh, P., and Bisaria, V.S., Ethanol separation by selective adsorption of water. Bioprocess Engineering, 8 (1993): 279-282.
- Robert, H.P., and Don, W.G. 1999, Perry's chemical engineers' handbook, 7th ed. New York: The McGraw-Hill Companies.
- Ruthven, D.M., 1984, Principles of adsorption and adsorption processes. New York: John Wiley & Son.
- Seader, J.D. and Ernest, J.H. 1998, Separation process principles, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Son.
- Southridgeethanol. Ethanol Process. 2007 [online].
Address: <http://www.southridgeethanol.com> [2007, April 2].
- Sowerby, B., and Crittenden, B.D., An experimental comparison of type A molecular sieves for drying the ethanol-water azeotrope. Gas Separation & Purification, 2 (1988): 77-83.
- Thomas, W.J., 1998, Adsorption technology and design. Oxford, Boston: Butterworth-Heinemann.
- Tien, C., 1930, Adsorption calculations and modeling. Boston: Butterworth-Heinemann.
- Toe, W.K., and Ruthven, D.M., Adsorption of Water from Aqueous Ethanol Using 3-A Molecular Sieves. Industrial Engineering Chemical Process Design Development, 25 (1986): 17-21.
- UOP. Gas Processing. [online]. address: <http://www.UOP.com>. [2007, April 2].
- Yang, R.T., 1987, Gas Separation by Adsorption Process. Boston: Butterworths.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิเบด 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล
0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นเอทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นน้ำ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่เวลา ใดๆต่อความเข้มข้นน้ำเริ่มต้น
0	90	95	5	1.00
240	95	99	1	0.20
360	96	99.4	0.6	0.12
480	97	99.2	0.8	0.16
600	100	99.3	0.7	0.14
720	101	99.4	0.6	0.12
840	104	99.3	0.7	0.14
960	107	99.2	0.8	0.16
1080	109	99.4	0.6	0.12
1320	112	99.5	0.5	0.10
1440	112	99.4	0.6	0.12
1560	112	99.4	0.6	0.12
1680	113	99.4	0.6	0.12
1800	112	99.3	0.7	0.14
1920	112	99.4	0.6	0.12
1980	112	99.5	0.5	0.10
2100	112	99.5	0.5	0.10
2220	111	99.5	0.5	0.10
2340	110	99.5	0.5	0.10
2460	109	99.4	0.6	0.12
2700	108	99.4	0.6	0.12
2820	107	99.4	0.6	0.12
2940	106	99.4	0.6	0.12
3060	106	99.4	0.6	0.12
3180	105	99.4	0.6	0.12
3300	105	99.5	0.5	0.10
3420	104	99.4	0.6	0.12

ตารางที่ ก1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิเบด 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก (ต่อ)

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิเบด เริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นเอทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นน้ำเริ่มต้น
3540	103	99.4	0.6	0.12
3720	102	99.4	0.6	0.12
3840	102	99.3	0.7	0.14
3960	101	99.3	0.7	0.14
4080	101	99.3	0.7	0.14
4200	100	99.3	0.7	0.14
4320	100	99.2	0.8	0.16
4440	99	99.2	0.8	0.16
4560	99	99	1	0.20
4680	98	99	1	0.20
4800	98	98.8	1.2	0.24
5100	97	98.5	1.5	0.30
5400	96	98	2	0.40
5700	95	98	2	0.40
6000	95	97.4	2.6	0.52
6300	94	97.4	2.6	0.52
6600	94	97.2	2.8	0.56
6900	93	96.9	3.1	0.62
7200	92	96.7	3.3	0.66
7500	92	96.5	3.5	0.70
7800	93	96.3	3.7	0.74
8100	92	96.1	3.9	0.78
8400	92	95.9	4.1	0.82
8700	92	95.8	4.2	0.84
9000	92	95.6	4.4	0.88
9300	91	95.4	4.6	0.92
9600	92	95.4	4.6	0.92
9900	92	95.2	4.8	0.96
10200	91	95	5	1.00
10500	91	95	5	1.00
10800	91	95	5	1.00
11100	90	95	5	1.00

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาปริมาณน้ำในตัวดูดซับ

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณน้ำในตัวดูดซับที่ภาวะ อุณหภูมิเบดเริ่มต้น 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำในตัวดูดซับ} &= \text{ผลรวมของปริมาณน้ำ ณ เวลาต่างๆ} \\ &= \sum [(C_0 - C) * Q * t] \end{aligned}$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้น
 C คือ ความเข้มข้นของน้ำ ณ เวลาใดๆ
 Q คือ อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล
 t คือ เวลาที่ใช้ในการเก็บสารตัวอย่าง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำในตัวดูดซับ} &= [(0.05 - 0.01) * 0.0166 * 240] + [(0.05 - 0.006) * 0.0166 * 120] \\ &\quad + [(0.05 - 0.008) * 0.0166 * 120] + [(0.05 - 0.007) * 0.0166 * 120] \\ &\quad + [(0.05 - 0.006) * 0.0166 * 120] + [(0.05 - 0.007) * 0.0166 * 120] \dots \\ &\quad + [(0.05 - 0.05) * 0.0166 * 300] \\ &= 4.91 \text{ กรัมของน้ำ} \\ &= 4.91 \text{ กรัมของน้ำ} / 30 \text{ กรัมของตัวดูดซับ} \\ &= 0.16 \text{ กรัมของน้ำ/กรัมของตัวดูดซับ} \end{aligned}$$

ความจุการดูดซับน้ำเท่ากับ 0.16 กรัมของน้ำ/กรัมของตัวดูดซับ หรือร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข1 ผลการคำนวณปริมาณน้ำในตัวดูดซับ

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิเบด เริ่มต้น (องศา เซลเซียส)	ความเข้มข้นของ เอทานอล (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นของ น้ำ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่ เวลาใดๆต่อความเข้มข้น น้ำเริ่มต้น	ความจุการดูดซับ น้ำที่สมดุล (กรัมน้ำ ต่อกรัมตัวดูดซับ)
0	90	95	5	1.00	0.00
240	95	99	1	0.20	0.16
360	96	99.4	0.6	0.12	0.09
480	97	99.2	0.8	0.16	0.08
600	100	99.3	0.7	0.14	0.09
720	101	99.4	0.6	0.12	0.09
840	104	99.3	0.7	0.14	0.09
960	107	99.2	0.8	0.16	0.08
1080	109	99.4	0.6	0.12	0.09
1320	112	99.5	0.5	0.10	0.18
1440	112	99.4	0.6	0.12	0.09
1560	112	99.4	0.6	0.12	0.09
1680	113	99.4	0.6	0.12	0.09
1800	112	99.3	0.7	0.14	0.09
1920	112	99.4	0.6	0.12	0.09
2040	112	99.5	0.5	0.10	0.09
2160	112	99.5	0.5	0.10	0.09
2280	111	99.5	0.5	0.10	0.09
2400	110	99.5	0.5	0.10	0.09
2640	109	99.4	0.6	0.12	0.18
2760	108	99.4	0.6	0.12	0.09
2880	107	99.4	0.6	0.12	0.09
3000	106	99.4	0.6	0.12	0.09
3120	106	99.4	0.6	0.12	0.09
3240	105	99.4	0.6	0.12	0.09
3360	105	99.5	0.5	0.10	0.09
3480	104	99.4	0.6	0.12	0.09
3600	103	99.4	0.6	0.12	0.09
3720	102	99.4	0.6	0.12	0.18
3840	102	99.3	0.7	0.14	0.09
3960	101	99.3	0.7	0.14	0.09
4080	101	99.3	0.7	0.14	0.09
4200	100	99.3	0.7	0.14	0.09
4320	100	99.2	0.8	0.16	0.08

ตารางที่ ข1 ผลการคำนวณปริมาณน้ำในตัวดูดซับ (ต่อ)

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิเบด เริ่มต้น (องศา เซลเซียส)	ความเข้มข้นของ เอทานอล (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นของ น้ำ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำที่ เวลาใดๆต่อความเข้มข้น น้ำเริ่มต้น	ความจุการดูดซับ น้ำที่สมดุล (กรัมน้ำ ต่อกรัมตัวดูดซับ)
4440	99	99.2	0.8	0.16	0.08
4560	99	99	1	0.20	0.08
4680	98	99	1	0.20	0.08
4800	98	98.8	1.2	0.24	0.08
5100	97	98.5	1.5	0.30	0.18
5400	96	98	2	0.40	0.15
5700	95	98	2	0.40	0.15
6000	95	97.4	2.6	0.52	0.12
6300	94	97.4	2.6	0.52	0.12
6600	94	97.2	2.8	0.56	0.11
6900	93	96.9	3.1	0.62	0.10
7200	92	96.7	3.3	0.66	0.09
7500	92	96.5	3.5	0.70	0.08
7800	93	96.3	3.7	0.74	0.06
8100	92	96.1	3.9	0.78	0.05
8400	92	95.9	4.1	0.82	0.05
8700	92	95.8	4.2	0.84	0.04
9000	92	95.6	4.4	0.88	0.03
9300	91	95.4	4.6	0.92	0.02
9600	92	95.4	4.6	0.92	0.02
9900	92	95.2	4.8	0.96	0.01
10200	91	95	5	1.00	0.00
10500	91	95	5	1.00	0.00
10800	91	95	5	1.00	0.00
11100	90	95	5	1.00	0.00
				รวม	4.91

ภาคผนวก ค

การสมดุลของการดูดซับ

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิเบดคงที่ที่ 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลแตกต่างกันคือร้อยละ 85 90 92.5 และ 95 ตามลำดับ สามารถนำไปคำนวณหาค่าความจุของน้ำต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่ความเข้มข้นแตกต่างกันได้ดังแสดงในตารางที่ ค1 และหาสมดุลของการดูดซับได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับน้ำกับความเข้มข้นของน้ำ

ตารางที่ ค1 ความจุการดูดซับน้ำที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลต่างๆ

การทดลอง	อุณหภูมิ เบดเริ่มต้น (องศา เซลเซียส)	ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นของน้ำ (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	ความจุการดูดซับน้ำ (กรัมน้ำต่อกรัมตัวดูด ซับ)
1	90	85	0.15	0.19
2	90	90	0.1	0.18
3	90	92.5	0.075	0.17
4	90	95	0.05	0.16
5	90	100	0	0.00

1. ไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง (Linear Isotherm)

สมการแบบเส้นตรง $q = KC$ สามารถหาค่าคงที่ K ได้จากการเขียนกราฟระหว่าง q กับ C ดังแสดงในตารางที่ ค1 และได้ค่าคงที่ $K = 1.6944$ และได้สมการเส้นตรงคือ

$$q = 1.6944C \quad (ค1)$$

2. ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

สมการแบบเส้นตรง $q = KC^{1/n}$ สามารถหาค่าคงที่ K , n ได้จากการคำนวณและการเขียนกราฟระหว่างลอการิทึมของความจุการดูดซับน้ำกับลอการิทึมของความเข้มข้นน้ำ ดังแสดงในตารางที่

ค2 และสามารถหาได้ค่าคงที่ K ได้จากการถอดลอการิทึมของจุดตัดแกน y และสามารถหาค่า 1/n ได้จากค่าความชันของกราฟ

ตารางที่ ค2 ลอการิทึมของความจุการดูดซับน้ำและความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอล

การทดลอง	อุณหภูมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้น		ความจุการดูดซับน้ำ (กรัม/น้ำหนัก)	ลอการิทึมของความจุการดูดซับน้ำ	ลอการิทึมของความเข้มข้นของน้ำ
		ของเอทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นของน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
1	90	85	0.15	0.19	-0.71	-0.82
2	90	90	0.1	0.18	-0.74	-1.00
3	90	92.5	0.075	0.17	-0.76	-1.12
4	90	95	0.05	0.16	-0.79	-1.30
5	90	100	0	0.00	-	-

จากค่าคงที่ $K = 0.264$, $1/n = 0.1587$ ได้สมการความสัมพันธ์คือ

$$q = 0.264C^{0.1587} \quad (\text{ค2})$$

3. ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

สมการแบบเส้นตรง $q = \frac{Kq_m C}{1 + KC}$ สามารถหาค่าคงที่ K, q_m ได้จากการคำนวณและการเขียนกราฟระหว่าง C/q กับ C ดังแสดงในตารางที่ ค3

ตารางที่ ค3 อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำต่อความจุการดูดซับน้ำที่ความเข้มข้นสารละลายเอทานอลต่างๆ

การทดลอง	อุณหภูมิเบดเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นของน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความจุการดูดซับน้ำ (กรัม/น้ำตอกกรัม/ดูดซับ)	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำต่อความจุการดูดซับน้ำ
1	90	85	0.15	0.19	0.77
2	90	90	0.1	0.18	0.54
3	90	92.5	0.075	0.17	0.43
4	90	95	0.05	0.16	0.31
5	90	100	0	0.00	-

โดยสามารถหาได้ค่าคงที่ K ได้จากอัตราส่วนของค่าความชันของกราฟกับจุดตัดแกน y ซึ่งได้ค่า $K = 60.24$ และสามารถหาค่า q_m ได้จากค่าส่วนกลับของความชันกราฟโดยได้ค่า $q_m = 0.215$ และได้สมการความสัมพันธ์คือ

$$q = \frac{12.97C}{1+60.24C} \quad (\text{ค3})$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การคำนวณหาความยาวสมดุล

1. การคำนวณหาความยาวสมดุล (Length of equilibrium zone, LES)

การคำนวณใช้ที่ภาวะอุณหภูมิเบด 90 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารละลายเอทานอล 0.0166 มิลลิลิตรต่อวินาที และความเข้มข้นสารป้อนร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

วิธีที่ 1 จากสูตร

$$LES = \left(\frac{Q_F c_F t_b}{q_{ref} \rho_B \frac{\pi D^2}{4}} \right)$$

โดยที่ Q_F = อัตราการป้อนของสารละลายเอทานอล 0.0134 กรัมต่อวินาที

c_F = ความเข้มข้นน้ำในสารละลายเอทานอล 0.05 กรัมของน้ำต่อกรัมของสารละลาย

t_b = เวลาที่เกิดเบรคทู 4,200 วินาที

q_{ref} = ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ 0.163 กรัมของน้ำต่อกรัมของตัวดูดซับ

S = น้ำหนักตัวดูดซับ 30 กรัม

ρ_B = ความหนาแน่นเบด 0.689 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1.588 เซนติเมตร

L_B = ความยาวเบด 22 เซนติเมตร

$$LES = \frac{0.0134 * 0.05 * 4200}{0.163 * 0.689 * \left(\frac{\pi (1.588)^2}{4} \right)}$$

$$LES = 12.651 \text{ เซนติเมตร}$$

$$LUB = L_B - LES$$

$$= 22 - 12.651$$

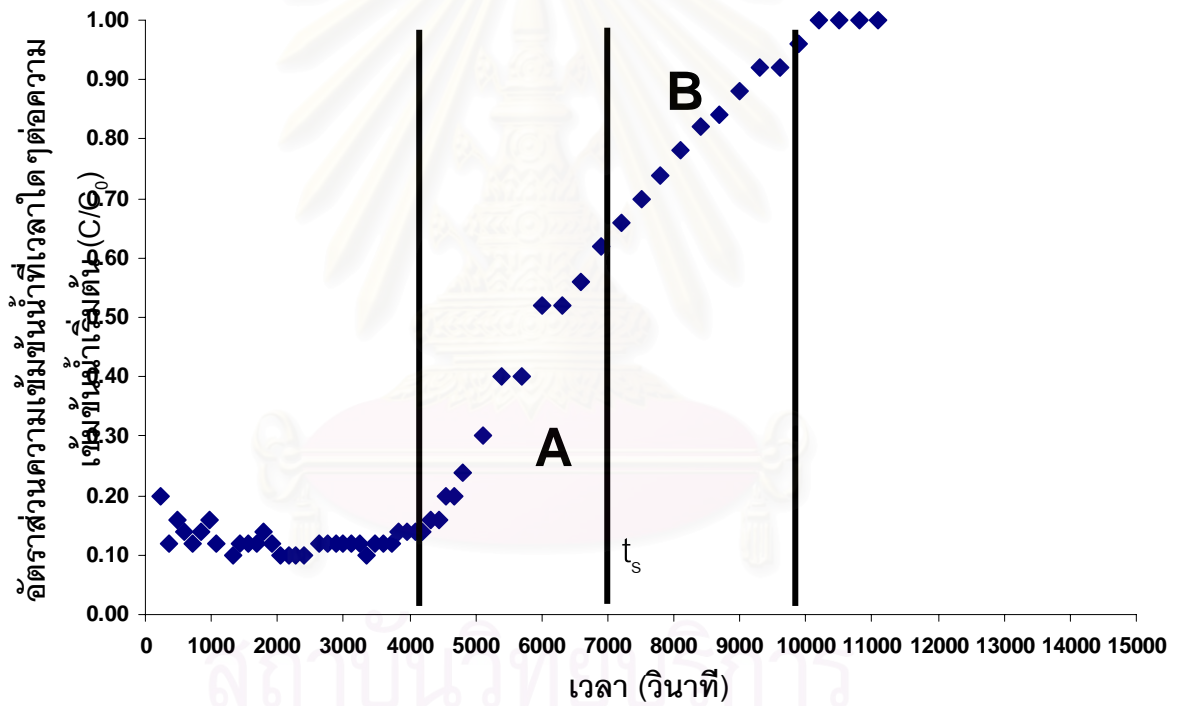
$$= 9.349 \text{ เซนติเมตร}$$

$$= 0.09349 \text{ เมตร}$$

วิธีที่ 2 จากรูปที่ ง1 ได้ค่า $t_s = 7200$ วินาที, $t_b = 4200$ วินาที

$$\begin{aligned}
 LUB &= L_B \left(\frac{t_s - t_b}{t_s} \right) \\
 &= 22 \left(\frac{7200 - 4200}{7200} \right) \\
 &= 9.167 \text{ เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 LES &= L_B - LUB \\
 &= 22 - 9.167 \\
 &= 12.833 \text{ เซนติเมตร} \\
 &= 0.12833 \text{ เมตร}
 \end{aligned}$$



รูปที่ ง1 การหาค่า t_s

ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับ

1. การหาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

การหาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับหาได้จากวิธี BET surface area ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Micromeritics รุ่น FlowSorb II 2300 ทำการ Degas ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ ๑1



METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE
RESEARCH INSTITUTE CHULALONGKORN UNIVERSITY

Metallurgy and Materials Science Research Institute Building, Chulalongkorn University Phayathai Rd., Bangkok, THAILAND 10330
Tel. (662) 2184210-12 Fax. (662) 6117586 http://www.material.chula.ac.th

เลขที่ บขก. 035/2551

รายงานผลการวิเคราะห์ทดสอบ

ตัวอย่าง	:	Zeolite
เจ้าของตัวอย่าง	:	ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ
วัตถุประสงค์	:	ทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะ
เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบ	:	SURFACE AREA ANALYZER ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น FlowSorb II 2300
อุณหภูมิที่ใช้ในการ Degas	:	150°C
เวลาที่ใช้ในการ Degas	:	60 นาที
มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ	:	ISO 9277
วันที่ทำการวิเคราะห์ทดสอบ	:	6 ธันวาคม 2550

ผลการทดสอบ

จากการทดสอบหา SPECIFIC SURFACE AREA ของตัวอย่าง Zeolite ให้ผลการทดสอบดังนี้

SAMPLE	SPECIFIC SURFACE AREA (m ² /g)
3A ZeOChem coke	20.63 ± 0.01
3A ZeOChem before	25.71 ± 0.02
3A ZeOChem after	22.96 ± 0.03
3A Tosoh before	12.67 ± 0.01
3A Tosoh after	12.26 ± 0.03
New 3A Tosoh before	25.46 ± 0.03
New 3A Tosoh after	24.34 ± 0.04
4A Tosoh before	13.86 ± 0.02
4A Tosoh after	13.87 ± 0.02

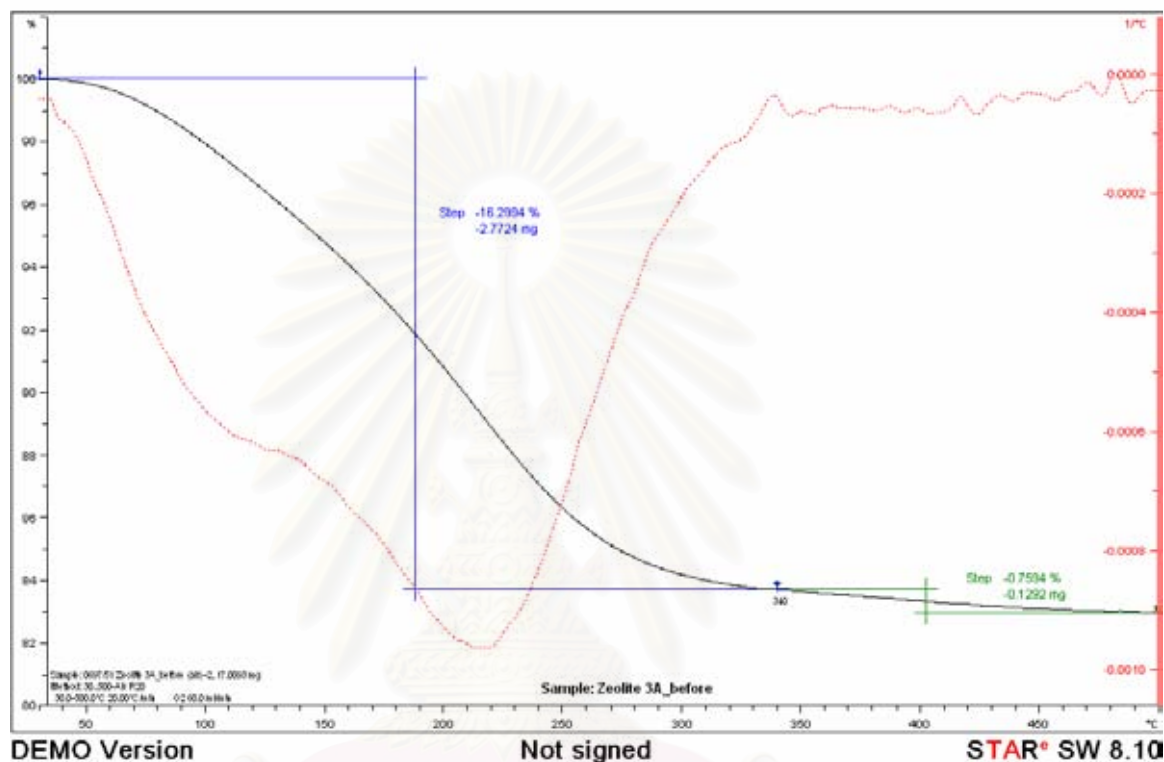
ลงชื่อ (นางสาวสวลี เสนาพิทักษ์) ผู้วิเคราะห์ทดสอบ	ลงชื่อ (ดร. กวีพรหม นิกไพรัช) ผู้รับรองผล
---	---

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ / ทดสอบ รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการวิเคราะห์ทดสอบโดย
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เท่านั้น

รูปที่ ๑1 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ

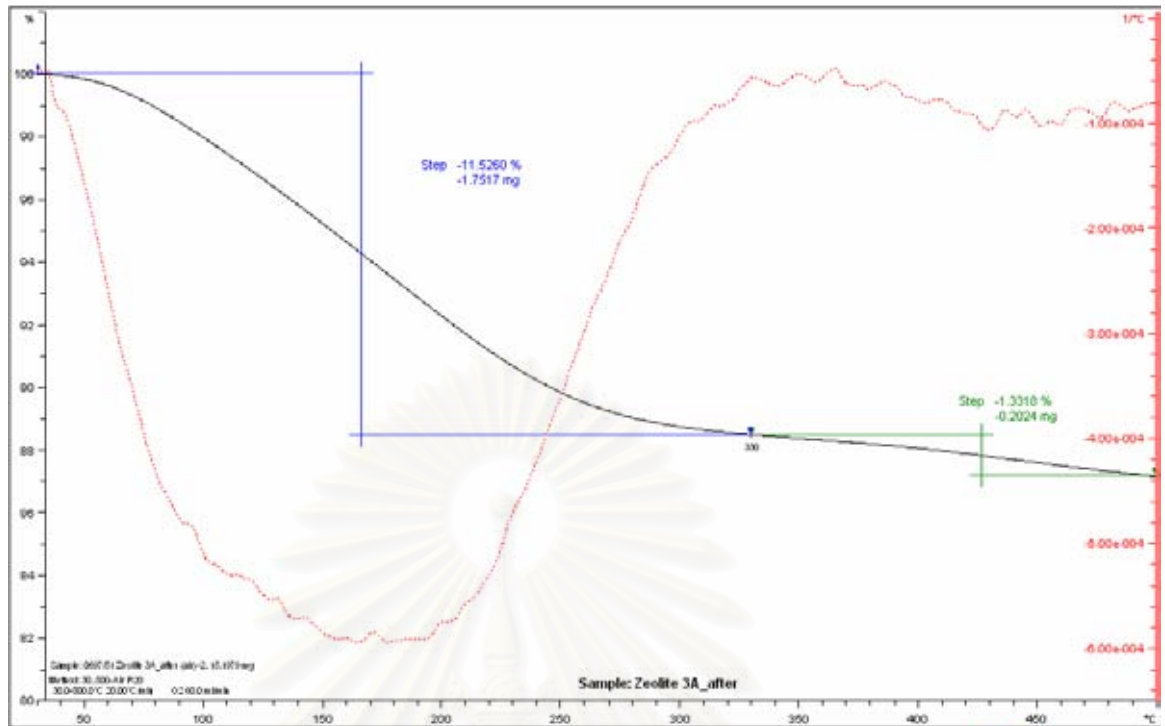
2. การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค Thermalgravimetric Analysis (TGA)

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนทำเพื่อดูการสลายตัวของสารที่อยู่บนตัวดูดซับ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA/SDTA รุ่น 851° ของ Mettler Toledo ทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 0-500 องศาเซลเซียส และมีการผ่านอากาศด้วยอัตรา 260 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการวิเคราะห์ที่ตัวดูดซับก่อนการใช้งานแสดงในรูปที่ ๑2 และหลังการใช้งานแสดงในรูปที่ ๑3



รูปที่ ๑๒ ผลทดสอบสมบัติเชิงความร้อนทำเพื่อดูการสลายตัวของสารที่อยู่บนตัวดูดซับเมื่อก่อนการใช้งาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๑3 ผลทดสอบสมบัติเชิงความร้อนตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3เอ หลังการใช้งาน

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ตารางเปรียบเทียบความหนาแน่นกับความเข้มข้นสารละลายเอทานอล

ตารางที่ จ1 ความหนาแน่นของสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ [Robert, 1999]

%	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	%	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C
0	0.99973	0.99913	0.99823	0.99708	0.99568	0.99406	0.99225	50	0.92126	0.91776	0.91384	0.90955	0.90550	0.90166	0.89750
1	785	725	636	520	379	217	034	51	91943	555	160	760	353	59940	519
2	602	542	453	336	194	031	99546	52	723	333	90936	534	125	710	258
3	426	365	275	157	014	98849	663	53	502	110	711	307	80896	479	056
4	258	195	103	99994	99539	672	455	54	279	90885	485	079	667	248	58823
5	098	032	08038	817	670	501	311	55	055	680	258	80850	437	016	580
6	98946	98577	780	656	507	335	142	56	90831	433	031	621	206	88784	356
7	801	729	627	500	347	172	07975	57	607	207	80803	392	88075	552	122
8	660	584	478	346	180	009	808	58	381	80680	574	162	744	319	87888
9	524	442	331	193	031	97846	641	50	154	732	344	89031	512	085	653
10	383	304	157	043	97875	685	475	60	99927	523	113	069	278	87851	417
11	267	171	047	07897	723	527	312	61	698	293	88882	446	044	615	180
12	145	041	97910	753	573	371	150	62	469	062	650	233	87809	379	86913
13	026	97914	775	611	424	216	99899	63	237	89830	417	87998	574	142	705
14	97911	790	643	472	278	063	829	64	006	597	183	763	337	86905	466
15	800	669	514	334	133	96911	670	65	85774	364	87945	527	100	667	227
16	692	552	357	199	96990	760	512	66	541	130	713	291	86863	429	85967
17	583	433	259	062	844	607	352	67	308	87895	477	054	625	190	747
18	473	313	129	96923	697	452	189	68	074	660	241	86817	387	85950	407
19	363	191	96997	782	547	294	023	69	87839	424	004	579	148	710	266
20	252	068	864	639	395	134	95856	70	602	187	86766	340	85906	470	025
21	139	96044	729	495	242	09073	687	71	385	86040	527	100	667	228	84783
22	024	818	592	348	087	509	516	72	127	710	287	85859	426	84966	540
23	96907	689	453	190	99029	643	343	73	86888	470	047	618	184	743	297
24	787	588	312	048	789	476	168	74	648	229	85806	376	84941	500	053
25	665	424	168	05805	607	306	94991	75	406	85988	564	134	698	257	83809
26	539	287	020	738	442	133	810	76	188	747	322	84891	455	013	564
27	406	144	95867	576	272	94055	625	77	85027	505	079	647	211	83768	319
28	268	95066	710	410	068	774	438	78	685	562	84835	403	83966	523	074
29	125	844	548	241	94922	590	248	79	442	018	590	138	720	277	82827
30	95977	686	382	067	741	403	055	80	197	84772	344	83911	473	029	578
31	823	524	212	94890	557	214	93860	81	84950	525	096	664	224	82780	329
32	665	357	038	709	370	021	662	82	702	277	83848	415	82974	530	079
33	502	186	94860	525	180	83825	461	83	453	028	589	164	724	279	81828
34	334	011	679	337	93996	626	257	84	203	83777	348	82913	473	027	576
35	162	94832	494	146	790	425	051	85	83951	525	095	660	220	81774	322
36	94986	650	306	93952	591	221	92843	86	697	271	82840	405	81965	519	067
37	805	464	114	756	390	016	634	87	441	014	583	148	708	262	80811
38	620	273	90919	556	186	92808	422	88	181	82754	323	81888	448	003	552
39	431	079	720	353	92979	597	208	89	82919	492	062	626	186	80742	291
40	236	90852	518	148	770	385	91992	90	654	227	81797	362	80922	476	026
41	042	682	314	92940	558	170	774	91	386	81059	529	094	655	211	79761
42	93842	478	167	729	344	91952	554	92	114	688	287	80823	384	79941	401
43	639	271	92897	516	128	733	332	93	81839	413	80983	549	111	689	220
44	433	082	685	301	91910	513	168	94	561	134	705	272	79835	383	78947
45	236	92852	472	085	692	291	90884	95	278	80852	424	79691	555	114	670
46	017	640	257	91868	472	069	660	96	80691	566	138	706	271	78831	388
47	92806	429	041	649	250	80845	434	97	698	274	79846	415	78981	542	100
48	803	311	91823	429	028	621	207	98	399	79978	547	117	684	347	77806
49	379	91965	604	208	90805	386	88679	99	094	670	243	78814	382	77946	507
								100	79784	360	78934	506	075	641	293

ภาคผนวก ช
เครื่องมือทดลอง



รูปที่ ช1 อุปกรณ์เครื่องมือทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฐิติ เลิศวรสิริกุล เกิดเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย