

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วยซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และ ซีโอไลต์ชนิด HY



นางสาวคณิศจิรัตน์ ทุงสงค์
นางสาวสุชาดา วิโรจน์ยืนยง

ภก.
ศ.ดร.
รศ.ดร.



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42390
วัน, เดือน, ปี ๒๐ พ.ศ. 2545

b.....
i.....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Adsorption of Ethylene by Silica Gel HZSM-5 and HY Zeolites



A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
For the Degree of Bachelor of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วยซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และ ซีโอไลต์ชนิด HY

โดย นางสาวคณิงรัตน์ พุ่งสงค์
นางสาวสุชาดา วิโรจน์ยืนยง

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา¹

1. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

..... กรรมการ
(ผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา)

..... กรรมการ
(อ.บุญชัย โชติวิริยวานิชย์)

..... กรรมการ
(อ.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒน์วงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วยซีลีกาเจล ซีโอไลต์ HZSM-5 และ ซีโอไลต์ HY
โดย นางสาวคณิงรัตน์ ทุ่งสงค์
นางสาวสุชาดา วิโรจน์ยืนยง
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา¹

1. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนของซีลีกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY ที่อุณหภูมิ 0, 30 และ 50 องศาเซลเซียส โดยวิธี Step response ก่อนทำการทดลองจะต้องทำการปรับสภาพเบื้องต้นของตัวดูดซับ หลังจากนั้นผ่านก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นที่ต้องการศึกษา คือ 5, 10, 15 และ 20 % โดยปริมาตร เข้าคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ และวิเคราะห์ก๊าซที่ออกจากคอลัมน์นี้ด้วย Thermal Conductivity Detector, TCD

จากผลการทดลองพบว่าสำหรับช่วงอุณหภูมิในการดูดซับต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 มีความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนสูงกว่า ซีโอไลต์ชนิด HY และซีลีกาเจล ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส ปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนของทั้งซีลีกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY จะลดลง ลักษณะการดูดซับก๊าซเอทิลีนของซีลีกาเจล ที่อุณหภูมิ 0, 30 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นแบบ Freundlich isotherm สำหรับลักษณะการดูดซับก๊าซเอทิลีนของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นแบบ Langmuir isotherm

Report Title Adsorption of Ethylene by Silica Gel HZSM-5 and HY Zeolites

By Miss Kanuengrat Tungsong

Miss Suchada Virojyuenyong

Advisor Asst. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum

Asst. Prof. Dr. Somchai Akaratiwa¹

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang

Abstract

This project studied the adsorption of ethylene on silica gel, HZSM-5 and HY zeolites at the temperatures of 0, 30 and 50 °C by step response method. Before starting the experiments, the adsorbents were preheated. The ethylene with concentrations of 5, 10, 15 and 20 percent by volume were flowed through the fixed-bed column with pretreatment adsorbents. The outlet gas from the adsorption column was characterized by the Thermal Conductivity Detector, TCD.

For the adsorption at the temperatures below 50 °C, HZSM-5 zeolite adsorbed ethylene more than HY zeolite and silica gel, respectively. The amount of ethylene adsorbed on these adsorbents decreased with an increase in adsorption temperature. The adsorption isotherm of ethylene on silica gel at 0, 30 and 50 °C agreed with the Freundlich isotherm, and those on HZSM-5 and HY zeolites at the same temperatures agreed with the Langmuir isotherm.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
มหานคร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ช่วยเหลือในด้านการให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำโครงการ
ผศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย อ.ธรรมบุญ อุดมมัน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการปรับปรุงชุดอุปกรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
มหานครที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการทดลอง และสุดท้าย
ผศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ
ด้านต่าง ๆ ตลอดจนตรวจแก้ไขปริญญาบัตร

คณิศร์รัตน์ ทุ่งสงค์
สุชาดา วิโรจน์ยืนยง

12 เมษายน 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและแนวคิดของโครงการ	1
วัตถุประสงค์	1
ขอบเขตของโครงการ	1
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีการดูดซับ	3
2.1 การดูดซับ	3
2.2 แบบจำลองของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่	4
2.3 การเคลื่อนที่ของตัวดูดซับ การดูดซับ และอัตราเร็วในการดูดซับ	8
บทที่ 3 ซีโอไลต์	12
3.1 ซีโอไลต์	12
3.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์	13
3.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์	14
3.4 ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง	15
บทที่ 4 ลักษณะและหลักการทำงานของ การดูดซับแบบเบตนิ่ง	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ขั้นตอนการทดลอง	22
5.1 การสอบเทียบอัตราการใช้	22
5.2 การทำ Blank ของการดูดซับก๊าซเอทิลีน	22
5.3 คุณลักษณะของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง	22
5.4 การเตรียมตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง	23
5.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง	23
5.6 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับก๊าซเอทิลีน	24
บทที่ 6 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	26
6.1 Breakthrough curve	26
6.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ	32
6.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ	34
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	36
7.1 สรุปผลการทดลอง	36
7.2 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	39

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลจากการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทมวลสารในเบตนึ่ง สำหรับระบบที่เป็นของเหลวและก๊าซที่มีตัวดูดซับทรงกลมและทรงกระบอก	9
ตารางที่ 7.1 ชนิดของไอโซเทอมของการดูดซับที่เหมาะสม	36



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงไอโซเทอมชนิดต่าง ๆ	7
รูปที่ 2.2 แสดงการถ่ายเทมวลในกระบวนการดูดซับ	
(a) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch) หรือ แบบต่อเนื่อง (Continuous-flow)	
(b) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	
(c) การถ่ายเทมวลสารของตัวถูกดูดซับจากวิภาคของไหลไปยัง ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ	8
รูปที่ 3.1 แสดงรูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน	12
รูปที่ 3.2 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ หรือ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ Tetrahedra	16
รูปที่ 3.3 แสดงการเชื่อมต่อกันของ Si-O-Al	
a) แสดงไดอะแกรมของ Silica layer	
b) แสดงการเชื่อมโยงกันในลักษณะเป็นลูกโซ่ของรูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 โดยมีอะตอมออกซิเจนเป็นตัวเชื่อม	16
รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด Y	17
รูปที่ 3.5 Sodalite cage structure (Y-zeolite)	18
รูปที่ 4.1 แผนผังหลักการทำงานของเครื่องดูดซับแบบเบดนิ่งที่ใช้ในการดูดซับก๊าซเอทิลีน	19
รูปที่ 4.2 หลักการทำงานของวาล์ว 4 ทิศทาง	21
รูปที่ 6.1 Breakthrough curve ของซิลิกาเจลที่ความเข้มข้นเอทิลีน 5% โดยปริมาตร	26
รูปที่ 6.2 Breakthrough curve ของซิลิกาเจลที่ความเข้มข้นเอทิลีน 10% โดยปริมาตร	27
รูปที่ 6.3 Breakthrough curve ของซิลิกาเจลที่ความเข้มข้นเอทิลีน 15% โดยปริมาตร	27
รูปที่ 6.4 Breakthrough curve ของซิลิกาเจลที่ความเข้มข้นเอทิลีน 20% โดยปริมาตร	28
รูปที่ 6.5 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 5% โดยปริมาตร	28
รูปที่ 6.6 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 10% โดยปริมาตร	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.7 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 15% โดยปริมาตร	29
รูปที่ 6.8 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 20% โดยปริมาตร	30
รูปที่ 6.9 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HY ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 5% โดยปริมาตร	30
รูปที่ 6.10 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HY ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 10% โดยปริมาตร	31
รูปที่ 6.11 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HY ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 15% โดยปริมาตร	31
รูปที่ 6.12 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HY ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 20% โดยปริมาตร	32
รูปที่ 6.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับอุณหภูมิ	33
รูปที่ 6.14 ไอโซเทอมของการดูดซับ	
(a) สำหรับซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 0, 30, 50 องศาเซลเซียส	
(b) สำหรับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 0, 30, 50 องศาเซลเซียส	
(c) สำหรับซีโอไลต์ชนิด HY ที่อุณหภูมิ 0, 30, 50 องศาเซลเซียส	34

สัญลักษณ์

C	ค่าคงที่ของสมการ BET
C_L	ความเข้มข้นของตัวดูดซับในวัฏภาคของไหล
C_s	ความเข้มข้นของตัวดูดซับในวัฏภาคของแข็ง
D_k	สัมประสิทธิ์การแพร่ของ Knudsen
D_m	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของตัวดูดซับในวัฏภาคของไหล
D_p	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของตัวดูดซับจากวัฏภาคของไหลที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ
\bar{D}_s	สัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยของโมเลกุลของตัวดูดซับจากวัฏภาคของไหลที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ
k	ค่าคงที่ของการดูดซับ
k	ค่าคงที่ของการคายซับ
K	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ มีค่าเท่ากับ k / k'
M	มวลโมเลกุล
N_{sc}	Schmidt number
P	ความดันของก๊าซ
P_0	ความดันไออิ่มตัวของก๊าซ
q_1	ค่าความร้อนของการดูดซับในขั้นแรก
q_L	ค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของก๊าซที่ถูกดูดซับ
R	ค่าคงที่ของก๊าซ
r_p	ค่าเฉลี่ยของรัศมีของรูพรุน
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์
V	ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
V_m	ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับเพื่อเกิดชั้นการดูดซับแบบชั้นเดียว
θ	เศษส่วนของผิวหน้าที่ไม่ว่าง
τ	Tortuosity factor
ε_p	ความพรุนของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและแนวคิดของโครงการ

การกำจัดก๊าซที่มีความเข้มข้นต่ำ สามารถทำได้โดยอาศัยปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) ปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยขั้นตอน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการดูดซับ และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา

โครงการนี้เลือกที่จะศึกษาในส่วนของขั้นตอนการดูดซับ โดยมีก๊าซเอทิลีนเป็นตัวถูกดูดซับ เพื่อหาแนวทางในการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่สะสมอยู่ในตู้เก็บผลไม้เพื่อป้องกันผลไม้สุก หรือเน่าเสีย ก่อนกำหนด ตลอดจนเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดก๊าซที่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซที่เป็นออกไซด์ของไนโตรเจน เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วยซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY
3. เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีน ของซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และ ซีโอไลต์ชนิด HY

ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีของการดูดซับ คุณสมบัติของซิลิกาเจลและซีโอไลต์ ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ปรับปรุงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. ทำการทดลองดูดซับเอทิลีนด้วยซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY
4. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีน ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณการดูดซับ และไอโซเทอมของการดูดซับของซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY

ประโยชน์ที่ได้รับ

เป็นแนวทางในการกำจัดก๊าซเอทิลีนที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งสะสมอยู่ในตู้เก็บผลไม้ เพื่อป้องกันผลไม้สุก หรือเน่าเสียก่อนกำหนด นอกจากนี้คาดว่าจะสามารถใช้หลักการเดียวกันนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดก๊าซที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซที่เป็นออกไซด์ของไนโตรเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการดูดซับ

2.1 การดูดซับ [1]

การดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพมีแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงในการดูดซับ ระหว่างกระบวนการดูดซับทางกายภาพตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง การดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเอง องค์ประกอบหลักของการดูดซับทางกายภาพ คือ ธรรมชาติของสาร แรงระหว่างโมเลกุล และความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ และเป็นกระบวนการคายความร้อน อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะถูกจำกัดโดยอัตราการเคลื่อนที่ของมวลในวัฏภาคก๊าซหรือในตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะสูงเมื่อก๊าซมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

2.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมี มีพันธะทางเคมีเป็นแรงในการดูดซับ แรงที่เกิดจะมากกว่าแรงในการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่สามารถทำการดูดซับได้ (Surface site)

ธรรมชาติของการดูดซับสามารถศึกษาได้จากความสามารถในการเข้าสู่สมดุลของโมเลกุลที่เกี่ยวข้อง สมดุลของการดูดซับที่อ้างอิงจากหลักการทางอุณหพลศาสตร์ คือ อัตราของโมเลกุลถูกดูดซับที่ผิวเท่ากับอัตราที่โมเลกุลนั้นถูกปลดปล่อยออกมา การอธิบายปรากฏการณ์ในการดูดซับนิยมใช้สมมติฐานเกี่ยวกับระบบสมดุลของก๊าซ - ของเหลว (Gas-liquid equilibria) เป็นพื้นฐาน

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ

1. การดูดซับทางเคมีที่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Activated chemisorption) การดูดซับลักษณะนี้ อัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามสมการของอาร์เรเนียส ($k_0 e^{-E/RT}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การดูดซับทางเคมีที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Nonactivated chemisorption) การดูดซับลักษณะนี้อัตราเร็วในการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าพลังงานกระตุ้นต่ำ

โดยทั่วไปแล้วการเกิดการดูดซับทางเคมีในช่วงเริ่มต้นมักจะเป็นการดูดซับที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น หลังจากนั้นกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลงและมักจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความสามารถของตัวดูดซับในการที่จะดูดซับสารโมเลกุลเล็กหรือตัวถูกดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ คือ

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

ซึ่งถ้าปัจจัยตัวใดตัวหนึ่งคงที่แล้วสามารถนำอีก 2 ตัวที่เหลือมาเขียนกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลได้ การดูดซับในระบบองค์ประกอบเดียว (Single component adsorption) สำหรับระบบของการดูดซับก๊าซ (Gas adsorption) อาศัยสมมติฐานเบื้องต้นดังนี้ ก๊าซในระบบจะประพฤติตัวเหมือนกับก๊าซอุดมคติ โมเลกุลที่มีความเข้มข้นต่ำจะถูกดูดซับทั่วผิวของตัวดูดซับ ไม่มีการรวมตัวกันระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับ และความเข้มข้นของวัฏภาคของไหลจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของวัฏภาคของแข็ง

2.2 แบบจำลองของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Models for adsorption isotherms) [2]

สามารถใช้อธิบายการดูดซับโดยมีข้อแม้ว่า

1. การดูดซับที่เกิดขึ้นจะต้องมีสมดุลที่แท้จริง
2. การดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถผันกลับได้ (Reversible) โดยที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

ในตัวถูกดูดซับเมื่อทำการดูดซับและการคายซับ

2.2.1 Langmuir isotherm

Langmuir isotherm เป็นแบบจำลองที่มีการนำไปประยุกต์ใช้มากที่สุดกับการดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิคงที่ เนื่องจากเข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อน อาศัยข้อสมมติฐานว่า

1. การดูดซับโมเลกุลของก๊าซจะเกิดขึ้นไปเรื่อย ๆ บนผิวหน้าจนกระทั่งเต็ม แต่จะเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) คือแต่ละตำแหน่งจะสามารถรับโมเลกุลที่มาเกาะได้เพียงโมเลกุลเดียว
2. การดูดซับจะไม่เกิดการเคลื่อนย้าย (Localize)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความร้อนของการดูดซับ (Differential energy of adsorption) ไม่ขึ้นกับเศษส่วนของผิวหน้าที่ไม่ว่าง (Surface coverage) หมายความว่าโอกาสของการดูดซับบนทุกตำแหน่งบนผิวหน้าของของแข็งจะเหมือนกันหมด ไม่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงกัน และพลังงานของโมเลกุลที่มาดูดซับ หรือโอกาสที่จะเกิดการดูดซับขึ้นบนตำแหน่งที่ว่างจะไม่ขึ้นกับว่าที่ตำแหน่งข้างเคียงจะมีโมเลกุลมาเกาะอยู่หรือไม่

อัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับ อัตราการชนของโมเลกุลของก๊าซบนผิวหน้าของของแข็ง ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันของก๊าซ และถ้าให้ θ คือเศษส่วนของผิวหน้าที่ไม่ว่าง นิยามว่าเท่ากับจำนวนตำแหน่งของตัวดูดซับที่ถูกตัวถูกดูดซับเกาะแล้วต่อจำนวนตำแหน่งทั้งหมดที่สามารถเกิดการดูดซับได้ ดังนั้นอัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนผิวหน้าของแข็งที่ยังไม่ถูกเกาะ หรือตำแหน่งที่ยังว่างอยู่ ซึ่งก็คือ $1 - \theta$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการดูดซับ} &\propto P(1-\theta) \\ &= kP(1-\theta) \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อ

P = ความดันของก๊าซ

k = ค่าคงที่ของการดูดซับ

สำหรับอัตราการคายซับจะแปรผันกับตำแหน่งของตัวดูดซับที่ถูกตัวถูกดูดซับเกาะแล้ว หรือจำนวนโมเลกุลที่เกิดการดูดซับ

$$\begin{aligned} \text{อัตราการคายซับ} &\propto \theta \\ &= k'\theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ

k' = ค่าคงที่ของการคายซับ

ที่สมดุลอัตราการดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายซับ ดังนั้น

$$kP(1-\theta) = k'\theta$$

$$\theta = \frac{KP}{1+KP} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$K =$ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ มีค่าเท่ากับ k / k'

แบบจำลอง Langmuir isotherm ยังมีข้อบกพร่อง เนื่องจากในการดูดซับที่เกิดขึ้นจริง เกิดแรงผลักรันระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียง และการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นไม่ได้เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียวตลอดช่วงของการดูดซับทั้งหมด

2.2.2 The BET isotherm

ทฤษฎีของ BET คือ ชั้นของการดูดซับ (Adsorbed layer) สามารถก่อตัวแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ สามารถเกิดการดูดซับได้มากกว่าชั้นเดียว และมีการพิจารณาถึงแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลด้วย นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานเพิ่มเติม คือ จำนวนพื้นที่ผิวที่ว่างจะคงที่ในแต่ละสถานะสมดุล และอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความถี่ของการกระทบระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

สำหรับการดูดซับในชั้นแรก อัตราการระเหยกลายเป็นไอมีค่าเท่ากับอัตราการควบแน่น และความร้อนของการดูดซับไม่ขึ้นอยู่กับผิวหน้าที่ไม่ว่าง

สำหรับการดูดซับบนชั้นอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ชั้นแรกนั้น อัตราการดูดซับจะแปรผันโดยตรงกับเศษส่วนผิวหน้าที่ว่าง อัตราการคายซับจะแปรผันตรงกับปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้ในชั้นนั้น และค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าเท่ากับค่าความร้อนในการกลายเป็นของเหลวของก๊าซที่ถูกดูดซับดังกล่าว

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$V =$ ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับที่ความดัน P

$V_m =$ ปริมาตรของก๊าซที่ถูกดูดซับเพื่อเกิดชั้นการดูดซับแบบชั้นเดียว

$P_0 =$ ความดันไออิ่มตัวของก๊าซที่อุณหภูมิที่ทำการศึกษา

$C =$ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $\exp [(q_1 - q_L)/RT]$ โดยที่ q_1 คือค่าความร้อนของการดูดซับในชั้นแรก และ q_L คือค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของก๊าซที่ถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 Freundlich isotherm

ทฤษฎีของ Freundlich มีสมมติฐานดังนี้

1. ความร้อนของการดูดซับจะมีค่าลดลงเป็นลักษณะเส้นโค้งเมื่อปริมาณผิวหน้าที่ไม่ว่างมีค่าเพิ่มขึ้น
2. ไม่มีข้อจำกัดสำหรับค่าเศษส่วนของผิวหน้าที่ไม่ว่าง

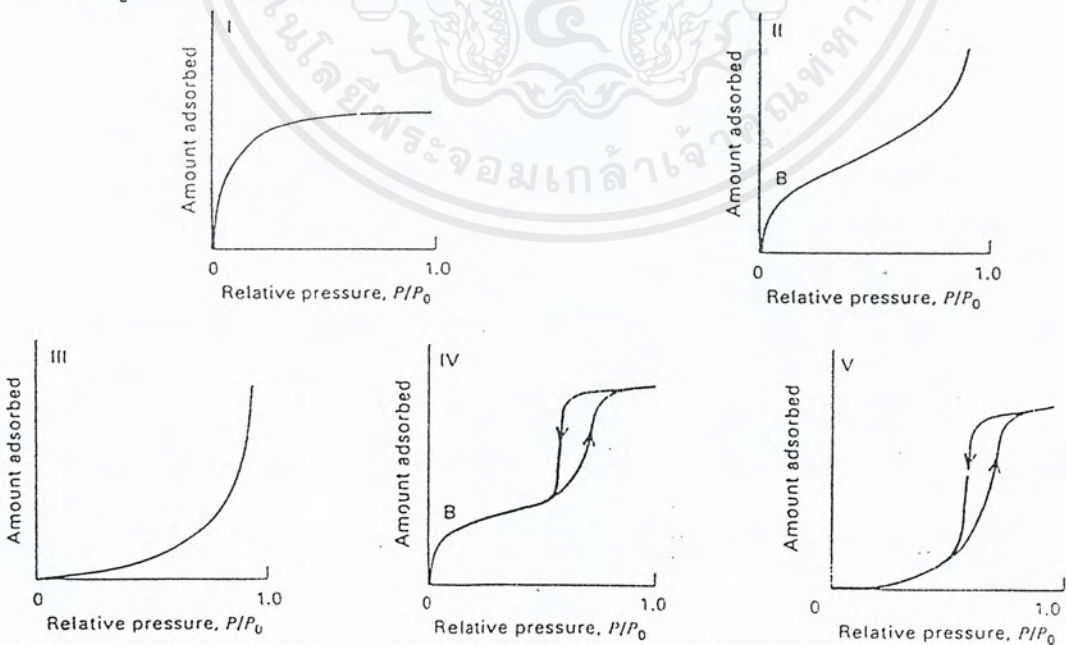
2.2.4 ชนิดของ Adsorption isotherm

Brunauer et al. (1940) แบ่งชนิดของไอโซเทอมออกเป็น 5 แบบ ด้วยกันดังรูปที่ 2.1

ชนิดที่ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับสารโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้ในการดูดซับที่ใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะต้องมีขนาดไม่ใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ)

ชนิดที่ II และ III เป็นไอโซเทอมที่ใช้อธิบายการดูดซับของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนในช่วงกว้าง โดยที่จะเกิดการดูดซับทั้งการดูดซับแบบชั้นเดียว การดูดซับหลายชั้น และตลอดจนการเกิด Capillary condensation เช่น การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนซิลิกาเจลสำหรับชนิดที่ II และการดูดซับก๊าซโบรมีนบนซิลิกาเจลสำหรับชนิดที่ III

ชนิดที่ IV และ V เป็นไอโซเทอมที่เสนอไว้สำหรับการดูดซับที่เกิดชั้นของการดูดซับ 2 ชั้น เช่น การดูดซับไอน้ำบนผิวของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 2.1 แสดงไอโซเทอมชนิดต่าง ๆ [3]

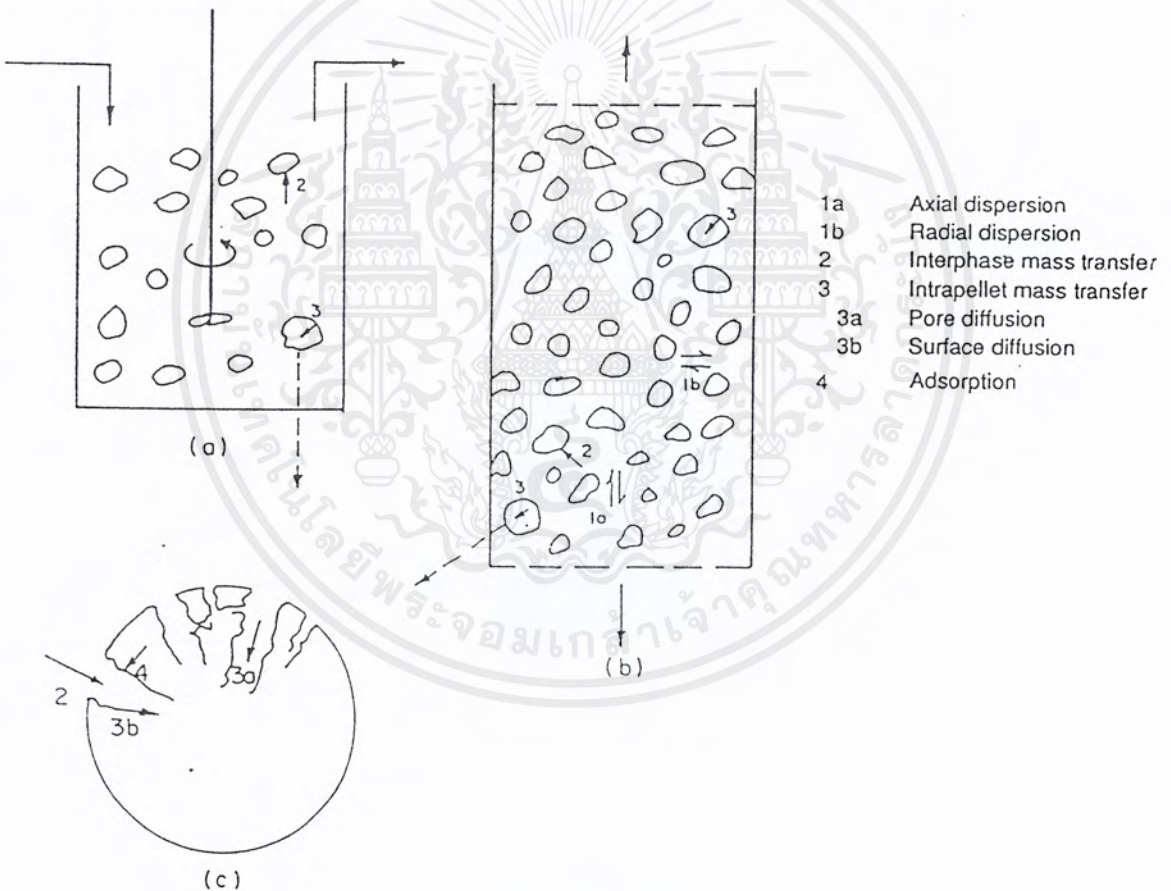
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ การดูดซับ และอัตราเร็วในการดูดซับ [4]

สิ่งสำคัญในการคำนวณเกี่ยวกับการดูดซับ และแบบจำลองของการดูดซับ คือ การทำนายหรือประมาณค่าของอัตราเร็วในการดูดซับของตัวถูกดูดซับ ในการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นมีขั้นตอนที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.3.1 การถ่ายเทมวลสารของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของไหล

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) เมื่อพิจารณาที่ของวัฏภาคของไหลที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ด้วยความเข้มข้นค่าหนึ่ง การเคลื่อนที่ของวัฏภาคของไหลทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารของตัวถูกดูดซับภายในของไหล ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 (a) และ (b)



รูปที่ 2.2 แสดงการถ่ายเทมวลสารในกระบวนการดูดซับ [4]

(a) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch) หรือ แบบต่อเนื่อง (Continuous-flow)

(b) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

(c) การถ่ายเทมวลสารของตัวถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายสามารถพิจารณาได้ใน 2 ทิศทาง คือ การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวงภาคของไหล (Axial dispersion) และการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายในทิศทางที่ตัดขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวงภาคของไหล (Radial dispersion) ซึ่งการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวงภาคของไหลไม่ต้องการให้เกิดขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทมวลประเภทนี้จะไปลดค่าประสิทธิภาพการแยก (Separation efficiency)

ได้มีผู้ทำตารางสรุปผลการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทมวลสารในเบดนิ่งสำหรับระบบที่เป็นของเหลวและระบบที่เป็นก๊าซไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทมวลสารในเบดนิ่ง สำหรับระบบที่เป็นของเหลวและก๊าซที่มีตัวถูกละลายทรงกลมและทรงกระบอก [3]

Line No.	System	d_p (cm)	N_{sc}	Investigators
Liquids				
1	Water-isobutanol	0.91	865	Hobson and Thodos (1949)
	Water-methyl ethyl ketone	0.91, 0.61	776	
2	Water-benzoic acid	0.63	18507	Williamson et al. (1963)
3	Water-benzoic acid	0.056-0.21	18507	Evans and Gerald (1953)
4	Water-2-naphthol	0.32-0.64	1189-1456	McCune and Wilhelm (1949)
5	Benzene-salicylic acid		340-434	
	<i>n</i> -Butanol-succinic acid	0.063-1.27	10,100-12,300	Gaffney and Drew (1950)
	Acetone-succinic acid		159-185	
Gases				
1	Water-air	0.23-1.9	0.61	Gamson et al. (1943)
				Wilke and Hougen (1945)
2	C ₁₀ H ₁₂ -air, He	0.64	2.7, 4.1	Falla! (1959)
3	C ₁₀ H ₁₂ -air	0.4-0.8	2.6	Bar-Ilan and Resnick (1957)
4	C ₁₀ H ₁₂ -air	0.64-1.27	2.6	Bradshaw and Bennett (1961)
5	Water-air	1.6	0.61	deAcetis and Thodos (1960)
6	Water-air	1.6	0.61	McConnachie and Thodos (1963)
7	C ₁₀ H ₁₂ -air	0.069-1.4	2.6	Chu et al. (1953)
8	Water-air	1.6	0.61	Sen Gupta and Thodos (1963)
9	Various	0.78	0.61-5.1	Hobson and Thodos (1951)

2.3.2 การถ่ายเทมวลสารระหว่างตัวถูกละลายและตัวถูกละลาย

ลักษณะสำคัญประการหนึ่งของตัวถูกละลาย คือ จะต้องมีความหนาแน่นที่ผิวจำเพาะสูง (มีความเป็นรูปทรงสูง) การดูดซับจะเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายที่อยู่ในวงภาคของไหลแพร่ไปยังตัวถูกละลาย ซึ่งการดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ผิวภายในรูปทรงของตัวถูกละลาย โดยกลไกในการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังตัวถูกละลายแบ่งได้ 3 ขั้นตอน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. การแพร่เข้าไปยังผิวภายในรูพรุน (Pore diffusion) เกิดจากการที่โมเลกุลของตัวถูกละลายที่อยู่ในวัฏภาคของไหลซึ่งอยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับ มีการเคลื่อนที่จากวัฏภาคของไหลไปยังผิวภายในรูพรุนของดูดซับ ดังรูปที่ 2.2 (c)

สำหรับกรณีง่าย ๆ ของการดูดซับขององค์ประกอบเดียว การเกิดการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคของไหลที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ขึ้นอยู่กับการชนซึ่งกันและกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายเอง และการชนกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายกับผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ ในการแพร่ที่เกิดขึ้นในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ค่าความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคของไหลที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังผิวในรูพรุนของตัวดูดซับจะมีค่าเท่ากับค่าความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายในวัฏภาคของไหล เนื่องจากจะไม่พิจารณาการชนกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายกับผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ

ส่วนกรณีของการแพร่ที่เกิดขึ้นในรูพรุนที่มีขนาดเล็ก การแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคของไหลที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ จะพิจารณาทั้งที่เกิดขึ้นจากการชนกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายที่อยู่ในวัฏภาคของไหล และที่เกิดขึ้นจากการชนกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายที่อยู่ในวัฏภาคของไหลกับผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ โดยการแพร่ที่เกิดขึ้นในกรณีหลังนี้ คือ การแพร่ที่เรียกว่า Knudsen diffusion สำหรับกรณีนี้ค่าความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคของไหลที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังผิวในรูพรุนของตัวดูดซับจะให้เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายในวัฏภาคของไหลกับสัมประสิทธิ์ในการแพร่ของ Knudsen (Knudsen diffusion coefficient) ดังสมการ

$$\frac{1}{D_p} = \frac{1}{D_p} + \frac{1}{D_k} \quad (2.5a)$$

$$D_k = 9700 r_p \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \quad (2.5b)$$

เมื่อ

$\overline{D_p}$ = สัมประสิทธิ์การแพร่เฉลี่ยของโมเลกุลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคของไหลที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D_p = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจากวิภาคของไหลที่อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับไปยังผิวในรูพรุนของตัวดูดซับ

D_k = สัมประสิทธิ์การแพร่ของ Knudsen

r_p = ค่าเฉลี่ยของรัศมีของรูพรุน (cm)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

M = มวลโมเลกุล

แต่ถ้าการแพร่ที่เกิดขึ้นเกิดในรูพรุนที่คดเคี้ยวและรูพรุนจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ค่า D_p และ D_m จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันดังสมการ

$$D_p = \frac{\epsilon_p D_m}{\tau} \quad (2.5c)$$

เมื่อ

τ = Tortuosity factor

ϵ_p = ความพรุนของตัวดูดซับ

D_m = สัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในวิภาคของไหล

ข. การแพร่ที่ผิวของตัวดูดซับ (Surface diffusion) เป็นการแพร่ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทั้งภายนอกและภายในรูพรุนของตัวดูดซับ แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะพิจารณาว่าการแพร่ที่เกิดขึ้นที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ดังรูปที่ 2.2 (c)

ค่าความสามารถในการแพร่ที่ผิวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พื้นที่ผิวที่สามารถเกิดการดูดซับได้ และชนิดของพันธะในการดูดซับของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ

ค. การแพร่ที่ผิวและการแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับ (Combined pore and surface diffusion) ในความเป็นจริงแล้วการถ่ายเทมวลสารจากวิภาคของไหลไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับจะเกิดกลไกทั้งสองนี้พร้อม ๆ กัน

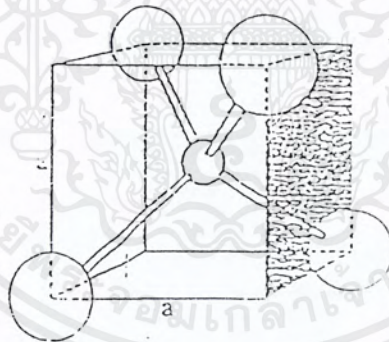
หากการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพที่อุณหภูมิต่ำ อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเร็วกว่าอัตราการถ่ายเทมวลสารภายในวิภาคของไหล ค่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวิภาคของไหล และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับจะอยู่ในสมดุลกัน

บทที่ 3

ซีโอไลต์

3.1 ซีโอไลต์ (Zeolite) [2,5-7]

ซีโอไลต์จัดเป็นสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต ที่มีโลหะอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ทอยู่ในโครงสร้างผลึก ซึ่งโดยมากแล้วจะเป็นโลหะโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) มีความเป็นผลึกสูงมาก และมีลักษณะโครงสร้างเป็นโครงข่ายสามมิติ ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อบetween SiO_4 และ AlO_4 ที่มีลักษณะเป็นทรงสี่หน้า (Tetrahedral) โดยมีอะตอมของซิลิกอน (Silicon) และอลูมิเนียม (Aluminium) อยู่ตรงกลาง ในส่วนอะตอมของออกซิเจนจะสามารถสร้างพันธะกับไฮดรอกซิลของซิลิกอน (Si^{4+}) และอลูมิเนียม (Al^{3+}) ดังรูปที่ 3.1



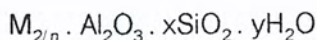
รูปที่ 3.1 แสดงรูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน [5]

โครงสร้างของซีโอไลต์จึงมีลักษณะเป็นรูพรุน มีโพรงและช่องว่างที่มีรูปแบบที่แน่นอน โดยขนาดของช่องเปิดของรูพรุนนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนของออกซิเจนในวงแหวน (Ring) ที่ต่อกันเป็นทรงสี่หน้า ซึ่งอาจจะมีจำนวนของออกซิเจนเป็น 6, 8, 10, หรือ 12 ในวงแหวน และในบางกรณีโพรงภายในอาจจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่ารูทางเข้า หรืออาจจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันตลอด สำหรับซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นผลึกที่มีความสมบูรณ์ (Ideal crystal) จะมีลักษณะโครงสร้างของรูพรุนที่เป็นระเบียบและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนต่ำสุด (Aperture)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 0.3 – 1.0 นาโนเมตร โดยขนาดของผลึกดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์ จำนวนของ แคลตไอออนที่มีอยู่ และวิธีการปรับสภาพ เช่น การชะด้วยของไหล (Leaching) การเผาด้วยความร้อนสูง (Calcination) รวมถึงการปรับสภาพทางเคมีต่างๆ

สำหรับโครงสร้างของซีโอไลต์ สามารถแสดงได้โดยสูตรทางเคมีอย่างง่าย คือ



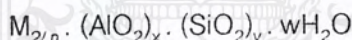
M คือ แคลตไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน

N คือ วาเลนซ์ของอิเล็คตรอน ซึ่งแสดงถึงการแลกเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้น ทั้งในขณะทำการสังเคราะห์หรือภายหลังการสังเคราะห์ซีโอไลต์

x คือ จำนวนโมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์ คือ



n คือ วาเลนซ์ของแคลตไอออน (M)

w คือ จำนวนโมลของน้ำต่อหน่วยเซลล์

x+y คือ จำนวนรูปทรงสี่หน้าทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y/x มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง

3.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ [2]

ซีโอไลต์มีทั้งที่พบในธรรมชาติ (Natural zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้น (Synthesis zeolite) ซึ่งซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาตินั้นมีอย่างน้อย 40 กว่าชนิด ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นเองนั้นพบว่ามีมากกว่า 150 ชนิด โดยแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน และซีโอไลต์ที่ใช้งานในส่วนใหญ่จะเป็นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นเอง เนื่องจากมีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างที่แน่นอน และยังมีสมบัติที่ค่อนข้างสูงอีกด้วย โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไฮเดียม และแทนที่ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลตไอออน เช่น แอมโมเนียม (NH_4^+) หรือไอออนของ

ไฮโดรเจน การสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไปจะใช้วิธี Hydrothermal treatment และวิธีการสังเคราะห์ลิแกนด์ ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ซีโอไลต์เหล่านี้จะทำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยสารตั้งต้นที่นำมาจากสารประกอบ 2 ประเภท คือ สารประกอบอลูมิเนียม เช่น โซเดียมอลูมิเนต (Sodium aluminate) หรือ อลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulfate) และสารประกอบซิลิกา เช่น Silica sol, Fumed-silica หรือ Sodium waterglass และเมื่อเติมสารอัลคาไลน์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารประกอบ Quaternary ammonium จะทำให้เกิดเจลขึ้นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และในระหว่างนั้นจะเกิดผลึกขึ้นอย่างช้า ๆ ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกจะอยู่ในช่วง 200 องศาเซลเซียส และที่ความดันไออิ่มตัวของน้ำในขณะนั้น โดยภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้มีการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเกิดขึ้น ผลึกซีโอไลต์ที่ได้จะไม่เสถียรและมีแนวโน้มที่จะเกิดโพรงที่กว้าง จึงจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ องค์ประกอบในตอนเริ่มต้น สภาวะในการเกิดปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและการเกิดนิวเคลียส จึงจะทำให้ได้ผลึกซีโอไลต์ตามที่ต้องการ หลังจากนั้นจะนำผลึกซีโอไลต์ที่ได้ไปทำการอบเพื่อระเหยน้ำออกจากผลึก แล้วจึงนำไปเผาที่ความร้อนสูงเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ยังคงตกค้างอยู่ออกไป ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำให้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น

คุณสมบัติที่แตกต่างกันของซีโอไลต์นั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่าง Si/Al ซึ่งมีผลต่อความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และความเสถียรของโครงสร้าง โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนของ Si/Al ในซีโอไลต์ที่เตรียมได้จะมีค่ามากกว่า 1 และไม่มีพันธะชนิด Al-O-Al เนื่องจากการใช้กรดจึงทำให้อลูมินาถูกกำจัดออกไป โดยซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วน Si/Al สูงขึ้นจะมีโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้น

3.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์ [2,5,9]

จากลักษณะพิเศษของซีโอไลต์ได้มีผู้นำไปใช้ประโยชน์มากมาย ซึ่งพอจะรวบรวมได้ดังนี้ คือ

1. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) อัลคิลเลชัน (Alkylation), Aromatization, isomerization เป็นต้น ตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น การเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซินโดยใช้ซีโอไลต์ เนื่องจากการได้มีการตระหนักถึงเรื่องของแหล่งพลังงานทั้งหลายที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีโอกาสจะหมดไปในอนาคต จึงได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ที่มีใช้ปิโตรเลียม และมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้ในอนาคต เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ กระบวนการ MTG (Methanol to gasoline) คือ กระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนเมทานอลให้เป็นน้ำมันเบนซินโดยใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

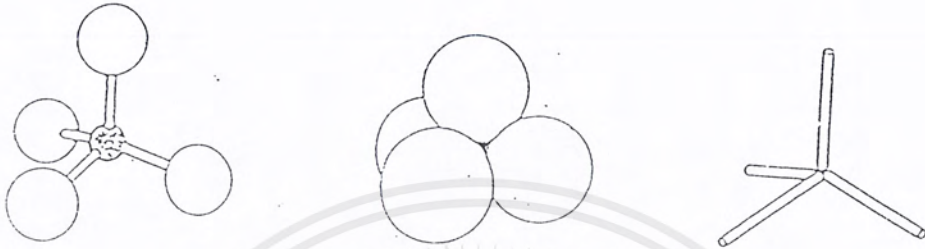
2. ใช้เป็นสารดูดซับ (Sorptions agent) เนื่องจากซีโอไลต์มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน ทำให้สามารถดูดซับสารต่าง ๆ ได้ตามขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด
3. ใช้เป็นสารลดความกระด้างของน้ำ (Water softener) ซีโอไลต์ใช้เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำได้ เนื่องจากในน้ำกระด้างจะมีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออนได้
4. ใช้เป็น Ion exchange resins เพื่อแลกเปลี่ยนกับแคลเซียมไอออนของ Univalent หรือ Divalent ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ เช่น การกำจัดแอมโมเนียมในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย พบว่าซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite และ Union Carbide's 400 สามารถกำจัดแอมโมเนียมออกไปได้มากถึง 95% หลังจากทำการทดสอบกับโรงงานต้นแบบ
5. ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผสมทำผงซักฟอก คือ มีค่า Capacity และ Kinetics สูงทำให้การแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็ว ซีโอไลต์สามารถใช้แทนฟอสเฟตในผงซักฟอกได้อีกด้วย โดยซีโอไลต์จะทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออนที่มีอยู่ในน้ำกระด้างแล้วแทนที่ด้วยเกลือโซเดียม ผงซักฟอกที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสมแทนฟอสเฟตจะช่วยลดมลภาวะทางน้ำได้ เนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอกทำให้พืชน้ำ หรือพวกสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัดเมื่อมีการตาย และเมื่อทับถมกันมากเข้าจะทำให้น้ำเน่าเสีย ปริมาณสัตว์น้ำลดลงเนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย เป็นต้น
6. ใช้ในการแยก กำจัด และนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ ซีโอไลต์หลายชนิดมีความสามารถในการคัดเลือกโลหะหนัก ทำให้สามารถนำโลหะหนักเหล่านั้นนำกลับมาใช้ใหม่ หรือกำจัดทิ้งได้ ซีโอไลต์ชนิด Clinoptilite และ Mordenite ถูกนำมาใช้ศึกษาเพื่อกำจัดโลหะหนัก โดยเฉพาะ Cd, Cu, Pb และ Zn ที่มีอยู่ในน้ำเสีย โดยจะทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักเหล่านั้น

3.4 ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1 ซีโอไลต์ชนิด ZSM (Zeolite Socony-Mobil) [10-11]

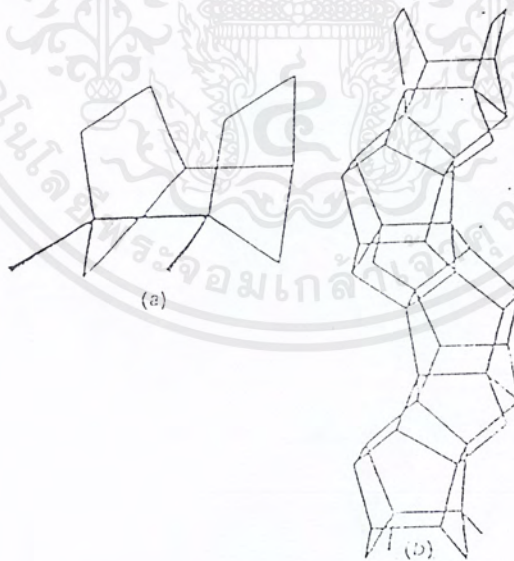
ซีโอไลต์กลุ่ม ZSM (Zeolite Socony-Mobil) มีลักษณะโครงสร้างเป็นวงแหวนต่อกันเป็นรู ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนจำนวน 10 อะตอมด้วยกัน โดยในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ได้รับความนิยมมากกว่าซีโอไลต์กลุ่ม ZSM ชนิดอื่น ๆ ซีโอไลต์ชนิด

HZSM - 5 นี้เป็นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นและจัดอยู่ในกลุ่มของ Pentasil group ซึ่งมีหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary building unit) เป็นรูปทรงสี่หน้าของ $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ หรือ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ Tetrahedra [10]

เมื่อเกิดการรวมตัวกันของหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิเป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ หรือ Secondary building unit (SBU) จะมีลักษณะเป็นแบบ 5-1 Ring ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการเชื่อมต่อกันของ Si-O-Al [10]

- a) แสดงไดอะแกรมของ Silica layer
b) แสดงการเชื่อมโยงกันในลักษณะเป็นลูกโซ่ของทรงสี่หน้า SiO_4
โดยมีอะตอมออกซิเจนเป็นตัวเชื่อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

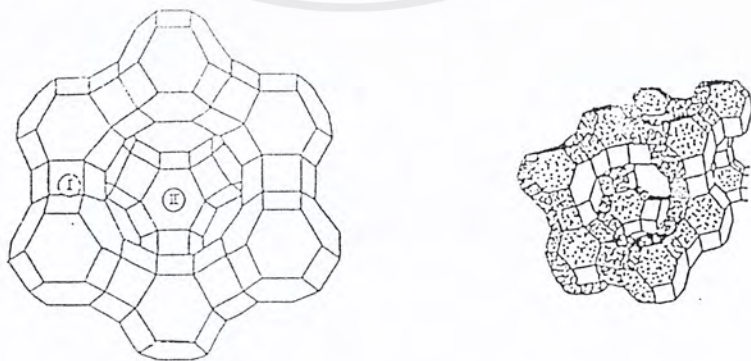
ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่ม Pentasil group เนื่องจากมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยโซ่ของวงแหวนที่มีออกซิเจนจำนวน 5 อะตอม ต่อกันเป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิซึ่งการจับตัวของ SBU 10 วง จะทำให้เกิดเป็นช่องว่างขนาดใหญ่และมีลักษณะคล้ายแผ่นบางๆ และเกิดการก่อตัวขึ้นเป็นชั้นที่ใหญ่จนเกิดเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยโพรงที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแถวของช่องว่างและมีรูปร่างเป็นแท่งกลม สำหรับโครงสร้างของโพรงมีลักษณะเป็น 2 มิติ 2 แบบ ได้แก่ แบบ Straight channel มีลักษณะเป็นแถวตรงและลักษณะของรูเปิดเป็นรูปวงรีเล็กน้อย ขนาดเท่ากับ 0.51×0.55 nm. และแบบ Sinusoidal channel system ซึ่งโพรงมีลักษณะเป็นแถวซิกแซกและมีรูเปิดเป็นรูปวงกลมขนาดเท่ากับ 0.54×0.56 nm. โดยโพรงที่เกิดขึ้นจะมีขนาดของโพรงปานกลางและมีลักษณะเป็นระเบียบ

คุณสมบัติทั่วไปของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

1. โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนของ SiO_2 ต่อ Al_2O_3 มีค่าตั้งแต่ 2.5 ถึง 50
2. ส่วนประกอบทางเคมีคือ $(\text{TPA}, \text{Na})_2 \cdot 5 - 100 \text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
3. ปริมาตรช่องว่าง (Void volume) เท่ากับ $0.32 \text{ cm}^3 \text{ liquid H}_2\text{O}/\text{cm}^3 \text{ crystal}$
4. เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 5.4 อังสตรอม
5. ขนาดของโพรงเท่ากับ 5.4×5.6 อังสตรอม และ 5.1×5.5 อังสตรอม

3.4.2 ซีโอไลต์ชนิด Y (FAU) [9-11]

ซีโอไลต์ชนิด Y เป็นซีโอไลต์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของ Faujasite ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของโพรงเป็น 3 มิติ ดังรูปที่ 3.4 และมีรูขาเข้าเกิดจากอะตอมของออกซิเจนจำนวน 12 อะตอมต่อกันเป็นวงแหวน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.74 nm



รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด Y [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด Y นั้น เกิดจากทรงสี่หน้าของซิลิกาและอลูมินาเชื่อมต่อกัน ในลักษณะของ Cubochedron ซึ่งเรียกว่า Sodalite unit หรือ Truncated octahedron ดังรูปที่ 3.5 โดย Sodalite unit เป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ชนิดนี้ และมีลักษณะของ SBU เป็นแบบ D6R ทำให้โมเลกุลสามารถแทรกผ่านหน่วยนี้ได้ โดยเข้าทางวงแหวนที่ประกอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 อังสตรอม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของปริมาตรช่องว่างซึ่งเป็นทรงกลม 6.2 อังสตรอม โดยโพรงช่องว่างแต่ละอันที่เชื่อมต่อกันนี้ประกอบด้วยไอออนของออกซิเจนจำนวน 6 อะตอม เชื่อมต่อกับด้านหน้าของรูปหกเหลี่ยมของ Sodalite unit จำนวน 2 หน่วยด้วยกัน รูปแบบของออกซิเจนที่มีลักษณะการเชื่อมต่อแบบนี้ เรียกว่า ปริซึมรูปหกเหลี่ยม ส่วนโพรงช่องว่างด้านบนของโครงสร้างจะล้อมรอบด้วย Sodalite unit จำนวน 10 หน่วย ซึ่งมีขนาดโพรงใหญ่มากพอที่จะบรรจุทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 nm ได้

คุณสมบัติทั่วไปของซีโอไลต์ชนิด Y

1. อัตราส่วนของ SiO_2 ต่อ Al_2O_3 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.5 ถึง 3
2. องค์ประกอบของ Faujasite ทั่วไปหน่วยเซลล์มีสูตรคือ $\text{Na}_j[(\text{AlO}_2)_j(\text{SiO}_2)_{192-j}]\cdot z\text{H}_2\text{O}$ โดย z มีค่าประมาณ 260 และ j มีค่าประมาณ 48 ถึง 76
3. สัดส่วนของช่องว่าง (Void volume) เท่ากับ $0.48 \text{ cm}^3 \text{ liquid H}_2\text{O}/\text{cm}^3 \text{ crystal}$
4. เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีค่าประมาณ 1.2 nm.

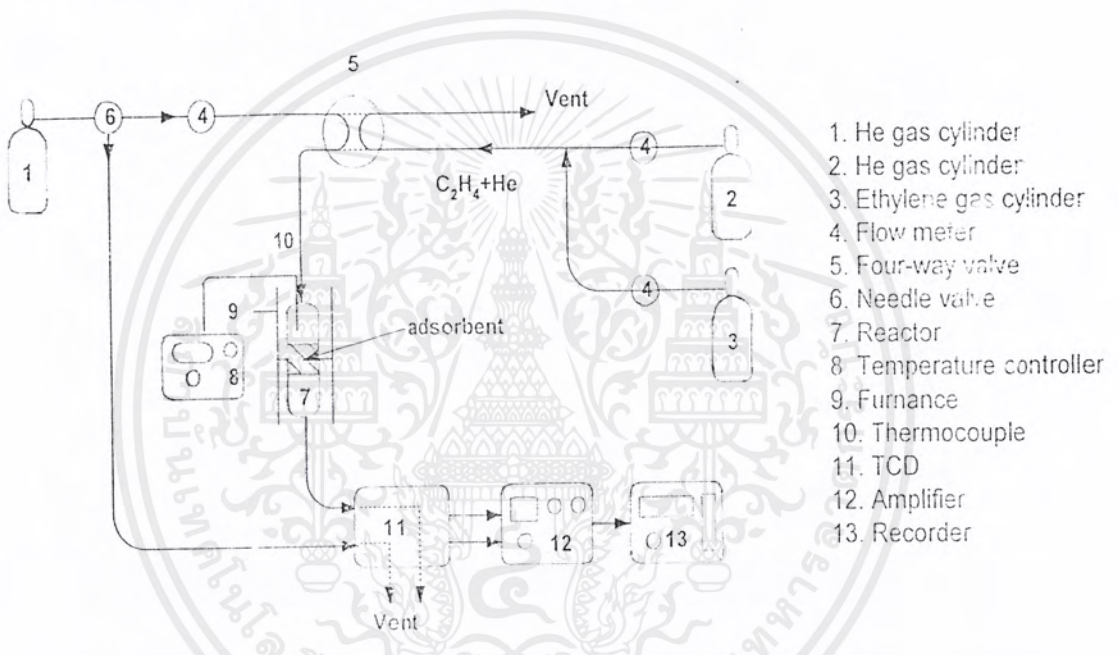


รูปที่ 3.5 Sodalite cage structure (Y-Zeolite) [7]

บทที่ 4

ลักษณะและหลักการทำงานของเครื่องดูดซับแบบเบดนิ่ง

4.1 ชุดอุปกรณ์เครื่องดูดซับแบบเบดนิ่งที่ใช้ในการดูดซับก๊าซเอทิลีน ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังหลักการทำงานของเครื่องดูดซับแบบเบดนิ่งที่ใช้ในการดูดซับก๊าซเอทิลีน

4.1.1 คอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ

ในการทำการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ นี้ใช้ท่อแก้วรูปตัวยู (U-tube) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อแก้ว 5 มิลลิเมตร ภายในท่อแก้วบรรจุตัวดูดซับที่ต้องการศึกษาความสามารถในการดูดซับเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยจะบรรจุในปริมาณที่ไม่มากนักเพื่อป้องกันการเกิดความดันลดในท่อแก้ว

4.1.2 ชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ

ถังก๊าซที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ถัง ประกอบด้วยก๊าซเอทิลีน 1 ถัง และก๊าซฮีเลียม 2 ถัง ถังก๊าซแต่ละถังจะมีวาล์วที่ใช้ในการปิดเปิด ตัวคุมค่า (Regulator) ที่ใช้ทำหน้าที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมความดันขาออกของก๊าซ นีดเดิลวาล์ว (Needle valve) และมาตรวัดอัตราการไหล (Flow meter) ดังแสดงในภาคผนวก ก

4.1.3 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบให้ความร้อน (Heater) และแบบทำความเย็น (Cooler)

ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบให้ความร้อนมีลักษณะเป็นภาชนะปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมกลวง ขนาด กว้าง 21.5 เซนติเมตร ยาว 17 เซนติเมตร สูง 28 เซนติเมตร ภายในมีขดลวดให้ความร้อน โดยมีฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่ต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องมือวัดและปรับค่าอุณหภูมิ ดังแสดงในภาคผนวก ก

ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบทำความเย็น มีลักษณะคล้ายอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ภายในบรรจุน้ำแข็ง ควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่ต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องมือวัดและปรับค่าอุณหภูมิ

4.1.4 เครื่องตรวจวัดสัญญาณ (Detector)

การทำงานของเครื่องตรวจวัดสัญญาณอาศัยหลักการที่ว่า ก๊าซต่างชนิดกันจะมีค่าความสามารถในการนำความร้อนได้ต่างกัน ซึ่งโดยหลักการนี้เองจึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการทำการทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้

ความแตกต่างของค่าการนำความร้อนของก๊าซนั้นจะอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า ส่งต่อไปยังเครื่องขยายสัญญาณ และเครื่องบันทึกและแสดงผล ตามลำดับ ลักษณะของเครื่องตรวจวัดสัญญาณแสดงไว้ในภาคผนวก ก

4.1.5 เครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier)

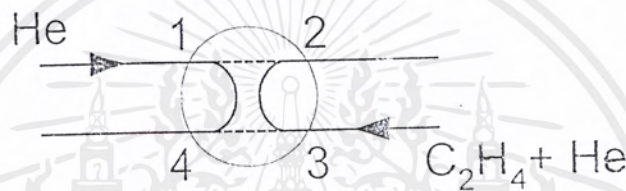
สัญญาณทางไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องวัดสัญญาณจะถูกแปลงและขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อไปยังเครื่องบันทึกและแสดงผล ลักษณะของเครื่องขยายสัญญาณแสดงไว้ในภาคผนวก ก

4.1.6 เครื่องบันทึกและแสดงผล (Recorder)

ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณที่ส่งต่อมาจากเครื่องขยายสัญญาณ โดยจะแสดงออกมาในรูปของ Breakthrough curve ลักษณะของเครื่องบันทึกและแสดงผลแสดงไว้ในภาคผนวก ก

4.1.7 วาล์ว 4 ทิศทาง (Four-way valve)

หลักการทำงานของวาล์ว 4 ทิศทางแสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 โดยปกติขณะที่ยังไม่ได้ทำการทดลองการดูดซับนั้นวาล์วจะบิดไปยังตำแหน่งที่ทำให้กระแสการไหลจากจุดที่ 1 เชื่อมต่อกับจุดที่ 4 แล้วผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ และกระแสการไหลจากจุดที่ 3 จะเชื่อมต่อกับจุดที่ 2 แล้วผ่านออกสู่ออกสู่อากาศ แต่เมื่อต้องการจะทำการทดลองการดูดซับวาล์วจะถูกบิดไปยังตำแหน่งที่ทำให้กระแสไหลจากจุดที่ 1 เชื่อมต่อกับจุดที่ 2 แล้วผ่านออกสู่ออกสู่อากาศ และกระแสไหลจากจุดที่ 3 จะเชื่อมต่อกับจุดที่ 4 แล้วผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ



รูปที่ 4.2 หลักการทำงานของวาล์ว 4 ทิศทาง

บทที่ 5

ขั้นตอนการทดลอง

5.1 การสอบเทียบอัตราการไหล (Calibration)

5.1.1 การสอบเทียบอัตราการไหลของก๊าซฮีเลียม และก๊าซเอทิลีน

การสอบเทียบอัตราการไหลของก๊าซฮีเลียมและก๊าซเอทิลีนโดยการปล่อยให้ก๊าซแต่ละชนิดที่ออกจากมาตรวัดอัตราการไหลผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับแล้วต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องสอบเทียบอัตราการไหล นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อใช้หาอัตราการไหลที่แท้จริงของก๊าซแต่ละชนิดที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ โดยผลที่ได้จากการสอบเทียบอัตราการไหลของก๊าซแต่ละชนิดแสดงไว้ในภาคผนวก ค

5.2 การทำ Blank ของการดูดซับก๊าซเอทิลีน

การทำ Blank ของการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 5, 10, 15 และ 20% โดยปริมาตร ไหลผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับที่ยังไม่ได้บรรจุตัวดูดซับเอาไว้ โดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 0, 30 และ 50 องศาเซลเซียส ข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบแสดงในรูปของ Breakthrough curve ที่ใช้สำหรับการอ้างอิงกับเมื่อทำการทดลองดูดซับที่สภาวะความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ เหล่านั้น ผลของการทำ Blank แสดงไว้ในภาคผนวก ค

5.3 คุณลักษณะของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

5.3.1 ซีโอไลต์ ชนิด HZSM-5

ซีโอไลต์ ชนิด HZSM-5 ที่ใช้ในการทดลองได้มาจาก Japan Reference Standard (HZS-820 NAA) อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 23.8 และพื้นที่ผิวเท่ากับ 284.24 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ

การเตรียมตัวดูดซับโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ทำได้โดย

1. ละลายแอมโมเนียมไนเตรด (NH_4NO_3) 52 กรัมในน้ำ 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. ชั่ง Na-ZSM-5 100 กรัมแล้วเติมในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการรวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
4. นำมารองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น
5. นำส่วนที่กรองมาทำซ้ำในข้อ 2-4 อีก 2 ครั้ง
6. นำส่วนที่กรองได้มาระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. ทำการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
8. ทิ้งไว้ให้เย็น

5.3.2 ซีโอไลต์ชนิด HY

ซีโอไลต์ชนิด HY ที่ใช้ในการทดลองได้มาจาก Japan Reference Standard (JRC-Z-HY-5.6) อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 5.6 และพื้นที่ผิวเท่ากับ 272.89 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ

5.3.3 ซิลิกาเจล

ซิลิกาเจลที่ใช้ในการทดลองได้มาจาก Wako Pure Chemical Industries ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.24 มิลลิเมตร

5.4 การเตรียมตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

5.4.1 การเตรียมซีโอไลต์

นำซีโอไลต์ ชนิด HZSM-5 ประมาณ 10 กรัม มาอัดให้เป็นเม็ดโดยใช้เครื่องอัดเม็ด จากนั้นนำไปบด และนำไปร่อนคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อน ขนาด 40 mesh ก่อนนำไปใช้ต้องอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

5.4.2 การเตรียมซิลิกาเจล

นำซิลิกาเจลที่มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 มิลลิเมตร ประมาณ 5 กรัม เข้าตู้อบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นก่อนนำไปใช้งาน

5.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

ความเข้มข้นของเอทิลีนในก๊าซผสม : 5, 10, 15 และ 20% โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของก๊าซผสม : 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ความดันรวมของระบบ : ความดันบรรยากาศ

อุณหภูมิของคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ : 0, 30, 50 องศาเซลเซียส

5.6 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับก๊าซเอทิลีน

5.6.1 การปรับสภาพของตัวดูดซับ (Pretreatment)

บรรจุตัวดูดซับที่ได้เตรียมไว้ประมาณ 1.0 กรัม ลงไปในคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ นำคอลัมน์ไปต่อเชื่อมกับชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง ก่อนทำการทดลองแต่ละครั้งต้องทำการปรับสภาพตัวดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนบนตัวดูดซับออก โดยการผ่านก๊าซฮีเลียมเข้าไปยังคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับเอาไว้ ควบคุมอุณหภูมิที่ 250 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง

5.6.2 การกำหนดอัตราการไหลของก๊าซฮีเลียม

สำหรับฮีเลียมถึงที่ 1

ความดันของตัวคุมค่าของถังก๊าซฮีเลียม : 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อัตราการไหล : 30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

สำหรับฮีเลียมถึงที่ 2

ความดันของตัวคุมค่าของถังก๊าซฮีเลียม : 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อัตราการไหล : ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนในก๊าซผสมที่ใช้ในการดูดซับ แสดงไว้ในภาคผนวก ค

5.6.3 การกำหนดอัตราการไหลของก๊าซเอทิลีน

ความดันของตัวคุมค่าของถังก๊าซเอทิลีน : 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อัตราการไหล : ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนในก๊าซผสมที่ใช้ในการดูดซับ

แสดงไว้ในภาคผนวก ค

5.6.4 การทดลองดูดซับก๊าซเอทิลีน

หลังจากที่ทำการปรับสภาพตัวดูดซับและกำหนดอัตราการไหลของก๊าซแล้ว ทำการควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบให้ความร้อน หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบทำความเข้าใจขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่จะใช้ทำการทดลอง เปิดเครื่องตรวจวัดสัญญาณและเครื่องบันทึกและแสดงผล จากนั้นทำการบิดวาล์ว 4 ทิศทาง เพื่อสลับกระแสการไหลของก๊าซผสมที่ได้ปรับให้มีความเข้มข้นที่ต้องการผ่านเข้าไปยังคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับซึ่งบรรจุตัวดูดซับไว้ทิ้งไว้จนกระทั่ง Breakthrough curve มีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนอนจึงบิดวาล์ว 4 ทิศทางกลับตำแหน่งเดิม ทำการปรับสภาพของตัวดูดซับ แล้วจึงทำการทดลองที่สภาวะต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

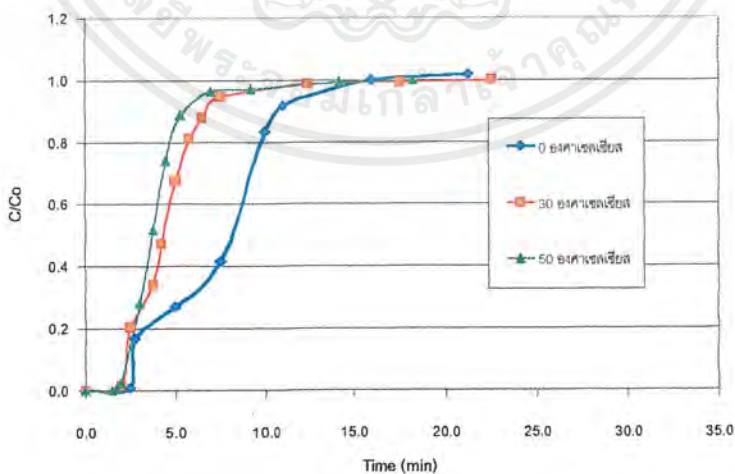
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

6.1 Breakthrough curve

ในการทำการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับก๊าซเอทิลีนด้วย ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และ ซีโอไลต์ชนิด HY หลังจากก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันผ่านคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับแล้ว ก๊าซที่ออกมาจากคอลัมน์จะถูกส่งต่อไปยังเครื่องตรวจวัดสัญญาณ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของ องค์ประกอบที่อยู่ในก๊าซนั้น ๆ (ซึ่งในการทดลองนี้ คือ ก๊าซเอทิลีนนั่นเอง) หลังจากนั้นผลที่ได้จะถูก แสดงออกมาที่เครื่องบันทึกและประมวลผลในรูปของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ ก๊าซเอทิลีนที่ออกจากคอลัมน์ในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ หรือที่เรียกว่า Breakthrough curve

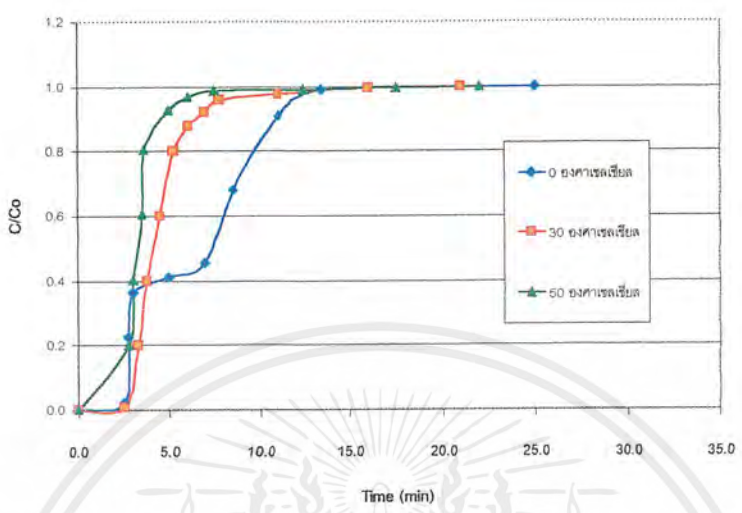
6.1.1 Breakthrough curve ของซิลิกาเจล

รูปที่ 6.1 – 6.4 แสดงผลที่ได้จากการทดลองการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20% โดยปริมาตร โดยใช้ซิลิกาเจลเป็นตัวดูดซับ

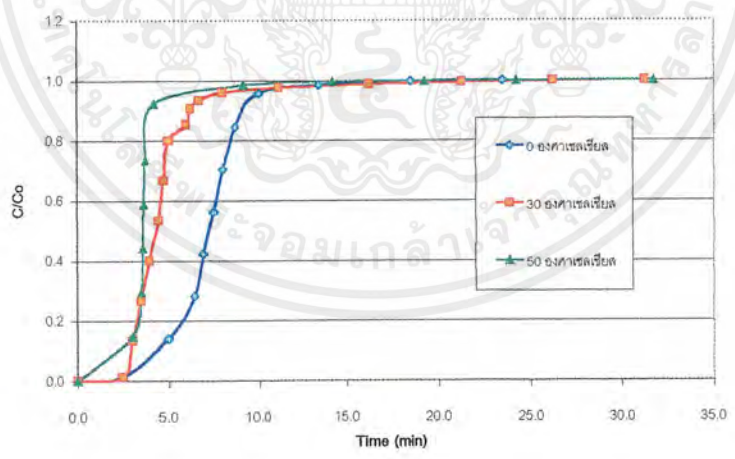


รูปที่ 6.1 Breakthrough curve ของซิลิกาเจลที่ความเข้มข้นเอทิลีน 5% โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

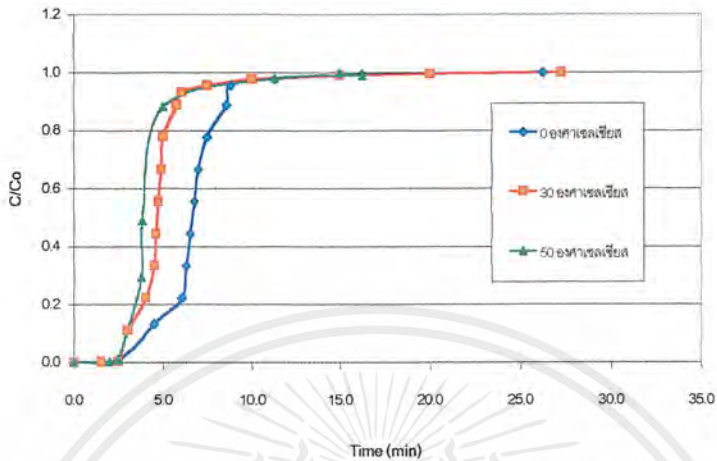


รูปที่ 6.2 Breakthrough curve ของซิลิกาเจลที่ความเข้มข้นเอทิลีน 10% โดยปริมาตร



รูปที่ 6.3 Breakthrough curve ของซิลิกาเจลที่ความเข้มข้นเอทิลีน 15% โดยปริมาตร

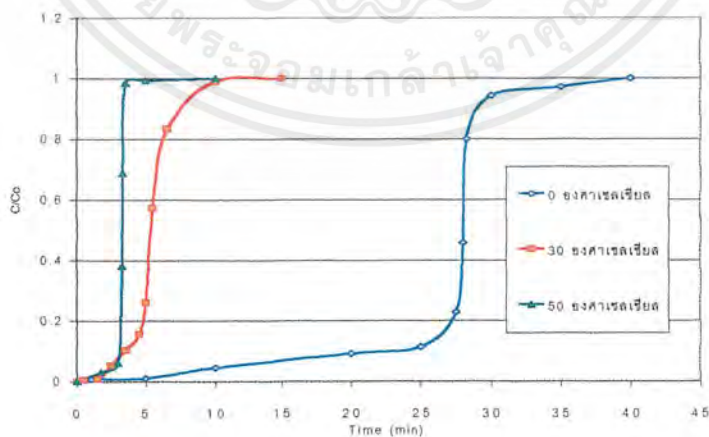
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 Breakthrough curve ของซีลิกาเจลที่ความเข้มข้นเอทิลีน 20% โดยปริมาตร

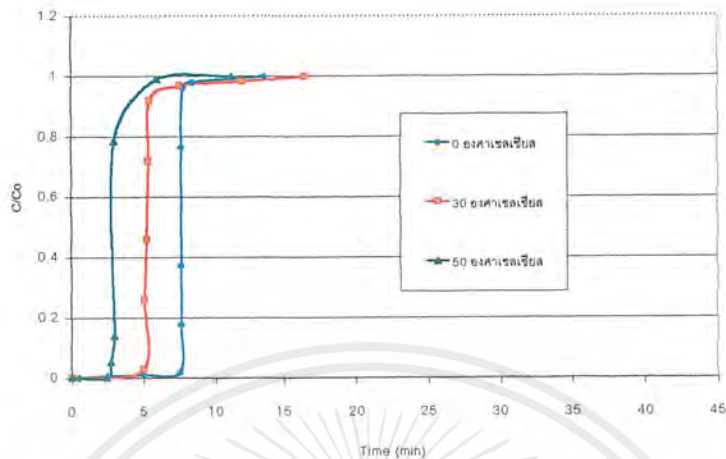
6.1.2 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากซีโอไลต์ชนิดนี้มีอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออลูมินาสูง ทำให้สามารถดูดซับสารจำพวกไฮโดรคาร์บอนบางประเภทได้ดี ผลที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 6.5 - 6.8



รูปที่ 6.5 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 5% โดยปริมาตร

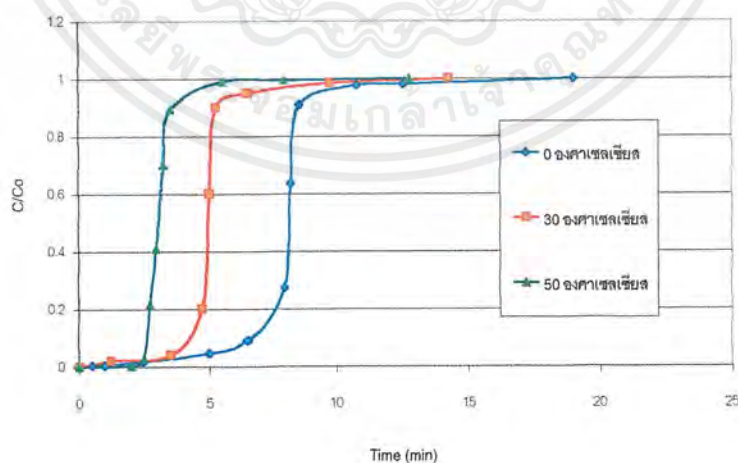
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 20% โดยปริมาตร

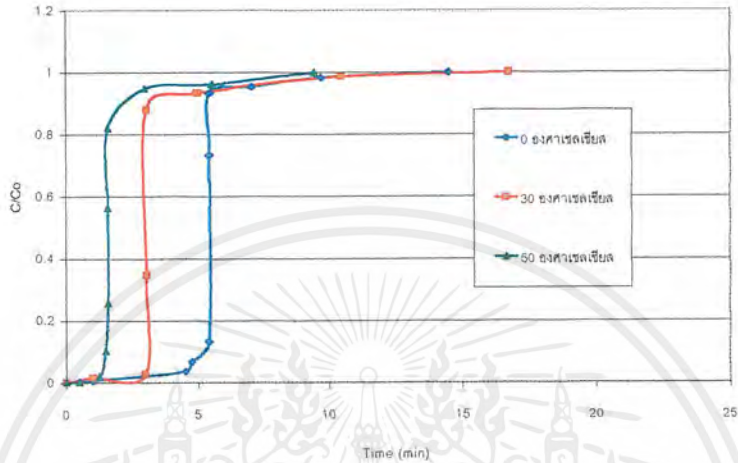
6.1.3 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HY

เพื่อใช้ในการศึกษาและหาข้อสรุปว่าสัดส่วนขององค์ประกอบบางชนิดในซีโอไลต์ที่แตกต่างกันนั้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนหรือไม่ จึงได้มีการเลือกใช้ซีโอไลต์ชนิด HY ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาต่ำกว่าซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 6.8 – 6.12

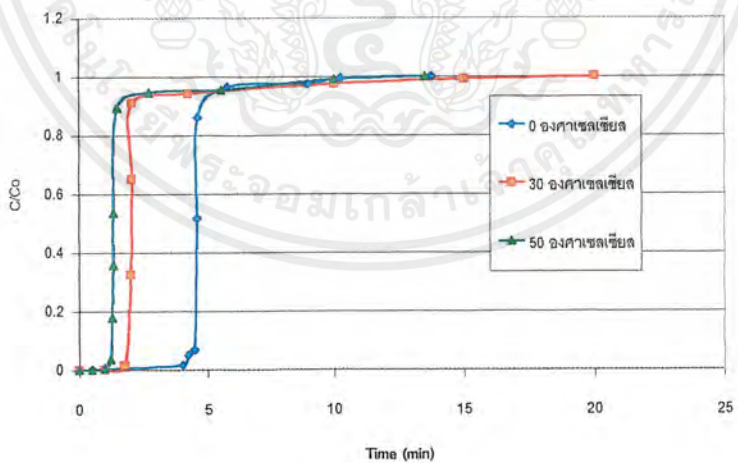


รูปที่ 6.9 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HY ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 5% โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

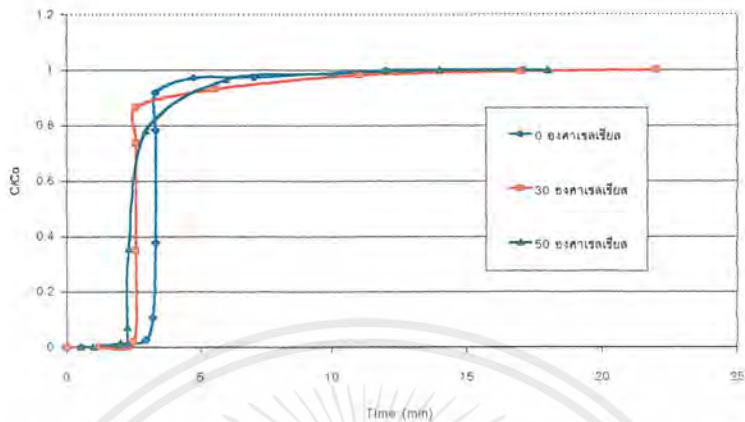


รูปที่ 6.10 Breakthrough curve ของซีโอดีชนิด HY ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 10% โดยปริมาตร



รูปที่ 6.11 Breakthrough curve ของซีโอดีชนิด HY ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 15% โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



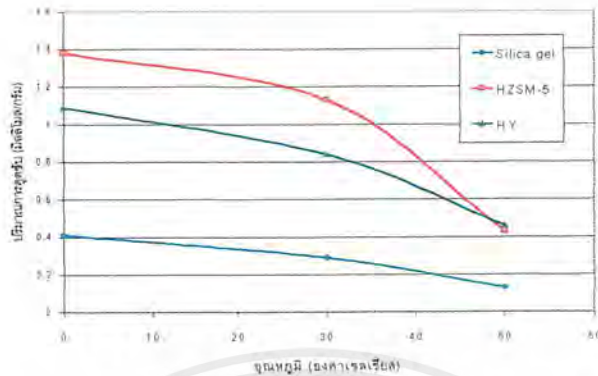
รูปที่ 6.12 Breakthrough curve ของซีโอไลต์ชนิด HY ที่ความเข้มข้นเอทิลีน 20% โดยปริมาตร

เมื่อสังเกตพื้นที่เหนือ Breakthrough curve ของซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และ ซีโอไลต์ชนิด HY ทำให้ทราบว่าตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนได้ และเมื่อความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนเพิ่มขึ้นระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการดูดซับก๊าซเอทิลีนจนอิ่มตัวของซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของก๊าซเอทิลีนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่เข้าสู่คอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จาก Breakthrough curve ยังสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนและไอโซเทอมของการดูดซับได้ โดยวิธีการคำนวณค่าและวิเคราะห์ข้อมูลได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข ปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่คำนวณค่าได้จะนำไปสร้างกราฟเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับที่มีต่อปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนของตัวดูดซับแต่ละชนิด ซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อต่อไป

6.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ

รูปที่ 6.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ ที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่ 15% โดยปริมาตร



รูปที่ 6.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับอนุภาค ที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 15% โดยปริมาตร

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้นทำให้ทราบว่า ปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนของทั้งซีลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY จะลดลงเมื่ออนุภาคเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ว่าด้วยพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs' free energy) ซึ่งแสดงได้ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

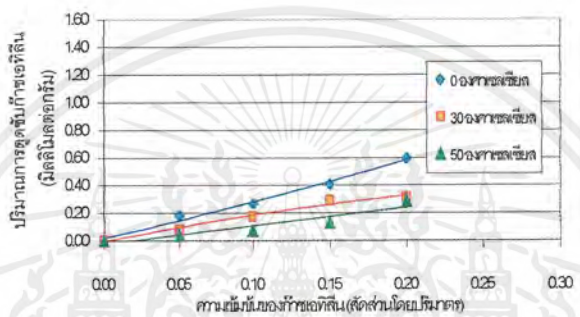
การดูดซับเป็นการจัดระเบียบของโมเลกุลจึงทำให้ค่า ΔS ของระบบเป็นค่าลบ แต่ปฏิกิริยาใด ๆ จะเกิดขึ้นได้เมื่อ ΔG ของระบบเป็นค่าลบ ดังนั้นสมการข้างต้นจะเป็นจริงเมื่อ ΔH มีค่าเป็นค่าลบ นั่นหมายความว่า การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออนุภาคเพิ่มสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจึงลดลง ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับลดลงนั่นเอง

นอกจากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้นจะชี้ให้เห็นว่าปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนของตัวดูดซับแต่ละชนิดจะลดลงเมื่ออนุภาคเพิ่มสูงขึ้นแล้ว กราฟความสัมพันธ์นี้ยังสามารถบอกถึงลำดับความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนของตัวดูดซับแต่ละชนิดได้อีกด้วย คือ สำหรับในช่วงอนุภาคต่ำกว่า 50 อนุภาคซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 จะมีความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนสูงกว่า ซีโอไลต์ชนิด HY และซีลิกาเจล ตามลำดับ ส่วนการดูดซับที่ความเข้มข้นอื่น ๆ นั้นให้ผลที่คล้ายคลึงกัน ดังกราฟที่แสดงไว้ในภาคผนวก ค

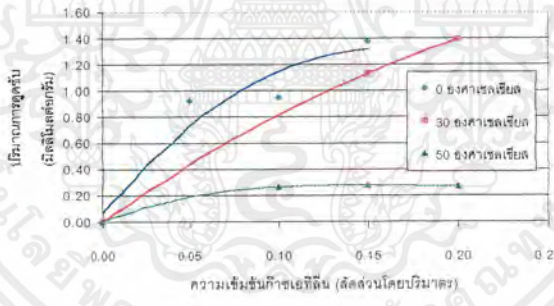
ภายหลังจากการศึกษาผลของอนุภาคที่มีต่อปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนแล้ว จะพิจารณาไอโซเทอมของการดูดซับที่เหมาะสมของตัวดูดซับแต่ละชนิดในหัวข้อต่อไป

6.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ

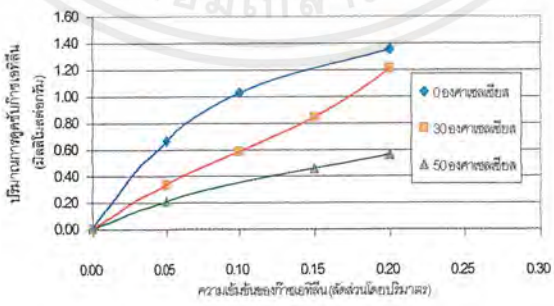
ไอโซเทอมของการดูดซับใช้ในการอธิบายถึงลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับว่าเป็นลักษณะใด โดยที่ไอโซเทอมของการดูดซับจะอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับก๊าซเอทีลีนกับความเข้มข้นของก๊าซเอทีลีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับเส้นไอโซเทอมของซีลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY ที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 6.14



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 6.14 ไอโซเทอมของการดูดซับสำหรับ

(a) ซีลิกาเจล (b) ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (c) ซีโอไลต์ชนิด HY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะของเส้นไอโซเทอมข้างต้นและการคำนวณค่าและวิเคราะห์ข้อมูลในภาคผนวก ข สามารถบอกได้ว่าการดูดซับก๊าซเอทิลีนของซีลิกาเจลจัดเป็นไอโซเทอมแบบ Freundlich ที่มีสมมติฐานว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นกับเศษส่วนของผิวหน้าที่ไม่ว่าง และสามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นได้ ลักษณะของไอโซเทอมประเภทนี้เมื่อเกิดการดูดซับจนใกล้ที่จะเข้าสู่สมดุลความชื้นจะลดลงจนกลายเป็นเส้นตรงขนานกับแกนนอน (สังเกตเห็นได้ ชัดเจนในรูปที่ 6.14 (a) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส) สำหรับการดูดซับก๊าซเอทิลีน ของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY จัดเป็นไอโซเทอมแบบ Langmuir ที่มีสมมติฐานว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นกับเศษส่วนของผิวหน้าที่ไม่ว่าง และการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเกิดเพียงชั้นเดียว ลักษณะของไอโซเทอมประเภทนี้เมื่อการดูดซับใกล้ที่จะเข้าสู่สมดุลความชื้นจะลดลงจนกลายเป็นเส้นตรงขนานกับแกนนอนเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากการทดลองนี้ไม่ได้ทำการศึกษาการดูดซับในช่วงความเข้มข้นที่สูงกว่านี้ จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตลักษณะของไอโซเทอมสำหรับซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY (รูปที่ 6.14 (b) และ (c)) ได้ชัดเจน

บทที่ 7

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทดลอง

1. ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ทุกความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 มีความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนสูงกว่า ซีโอไลต์ชนิด HY และซิลิกาเจล ตามลำดับ
2. ปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนของซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้น
3. จากการคำนวณค่าและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก Breakthrough curve สามารถระบุชนิดของไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซเอทิลีนของซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY ได้ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ชนิดของไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซเอทิลีนสำหรับซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY

ตัวดูดซับ	ชนิดของไอโซเทอมที่เหมาะสม
ซิลิกาเจล	Freundlich
ซีโอไลต์ ชนิด HZSM-5	Langmuir
ซีโอไลต์ ชนิด HY	Langmuir

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการทดลองเพื่อศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่มีน้ำอยู่ด้วย โดยใช้ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงนั้นก๊าซผสมที่ต้องการทำการดูดซับจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบด้วย นอกจากนี้ยังสามารถใช้ตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ ในการทำการทดลองเพิ่มเติมได้ เช่น Silicalite ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ ซีโอไลต์

2. ปรับปรุงชุดอุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมเพื่อศึกษาการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่มีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากก๊าซเอทิลีนที่สะสมอยู่ในตู้ขนส่งผลไม้ซึ่งต้องการจะกำจัดนั้นมีความเข้มข้นต่ำมาก การปรับปรุงชุดอุปกรณ์ทำได้โดยเปลี่ยนเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเอทิลีนให้สามารถทำการทดลองที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนต่ำกว่า 5% โดยปริมาตรได้

3. ควรทำการทดลองเพื่อศึกษาต่อในส่วนของการทำปฏิกิริยาเพื่อกำจัดก๊าซเอทิลีนที่ถูกดูดซับไว้โดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เอกสารอ้างอิง

1. Christi J. Geankoplis, Transport Processes and Unit Operations, 3rd ed., Prentice Hall, 1995
2. Satterfield, Chales N., Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice, 2nd ed., Chemical and Petroleum Engineering Series : McGraw-Hill, 1980, pp. 44-47, 226-254, 352-375
3. J.D. Seader and Ernest J. Henley, Separation Process Principles, John-Wiley & Sons Inc., pp. 794-795, 831-833
4. Chi Tien, Adsorption Calculations and Modeling, Butterworth-Heinemann, 1930, pp. 71-80
5. Breck, Donald W., Zeolite Molecular Sieves : Structure, Chemistry and Use, John Wiley & Sons Inc., 1974, pp. 45-50, 95, 145
6. Dyer, A., An Introduction to Zeolite Molecular Sieves, John Wiley & Sons Inc., 1988, pp. 1, 12-27
7. Gates, Bruce C., Katzen, James R. and Schuit, G.C.A., Chemistry of Catalytic Processes, McGraw-Hill, 1979, pp. 49-54
8. Rabo, J.A., Zeolite Chemistry and Catalysis, American Chemistry Society, U.S.A., 1976, pp. 3-8
9. Chen, N.Y., Garwood, William E. and Dwyer, Francis G., Shape Selective Catalysis in Industrial Applications, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 1996, pp. 8-9
10. Gate, Bruce C., Catalytic Chemistry, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 1992, pp. 259-263, 265
11. Szostak, Rosemarie, Handbook of Molecular Seives, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992, pp. 518-521, 526
12. Richard J. Lewis, Sr., Condensed Chemical Dictionary, 13th ed., John Wiley & Sons Inc., pp. 466, 1177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

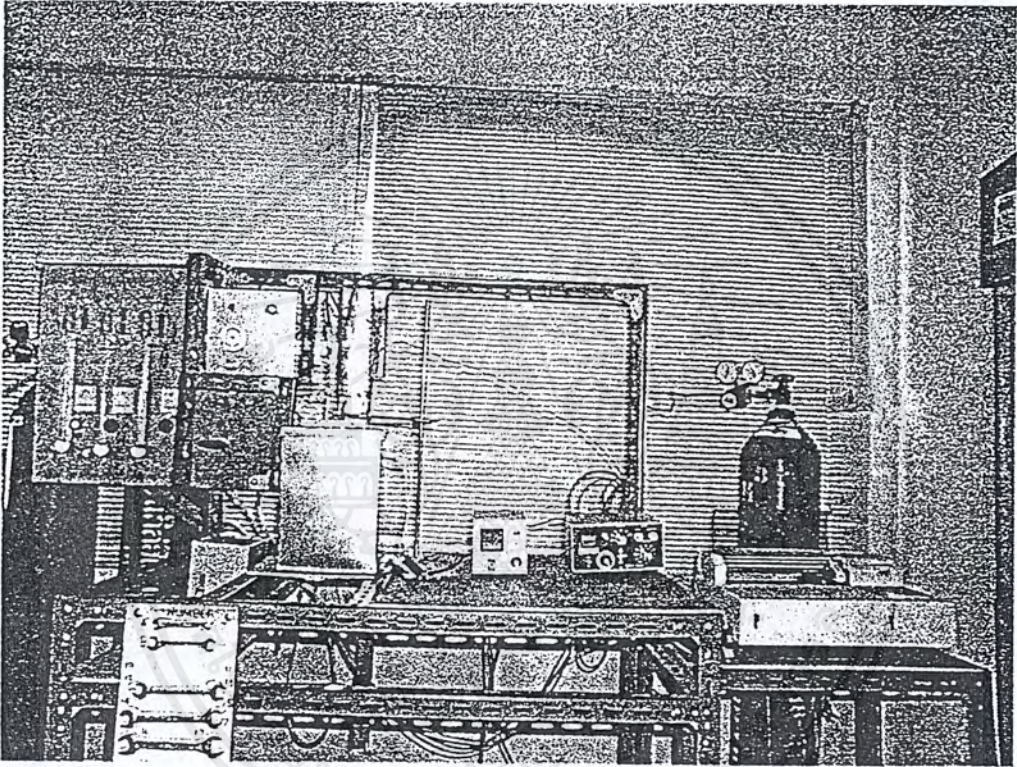
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

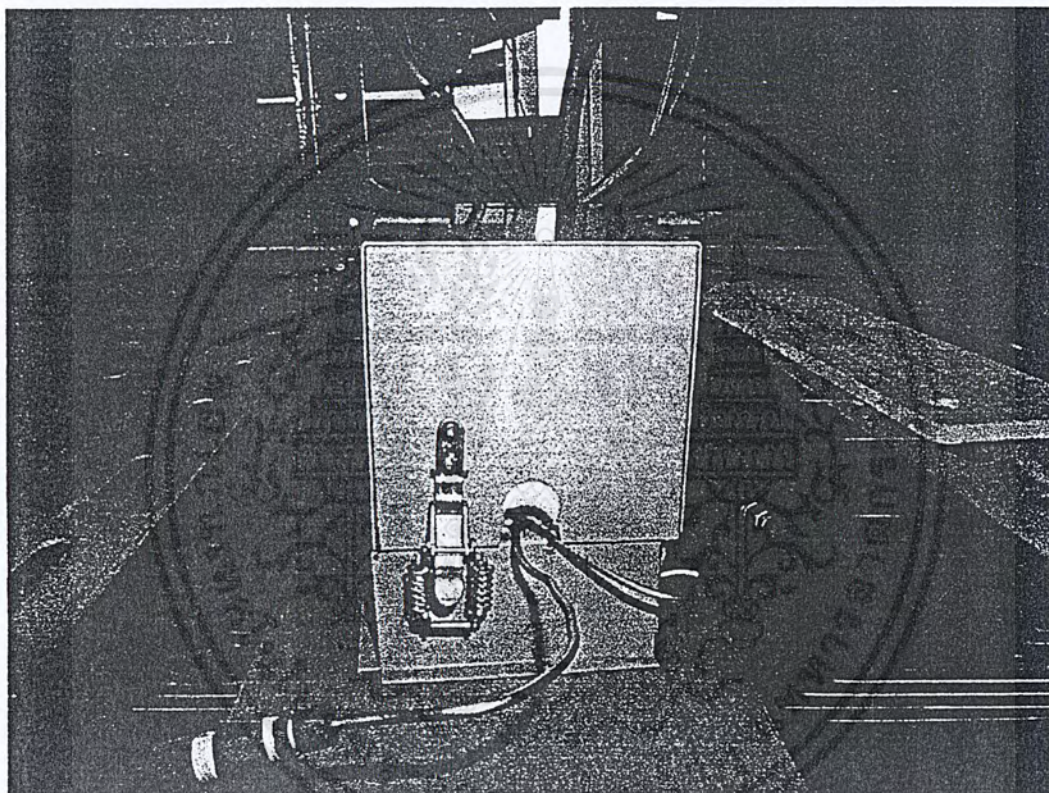
รูปแสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



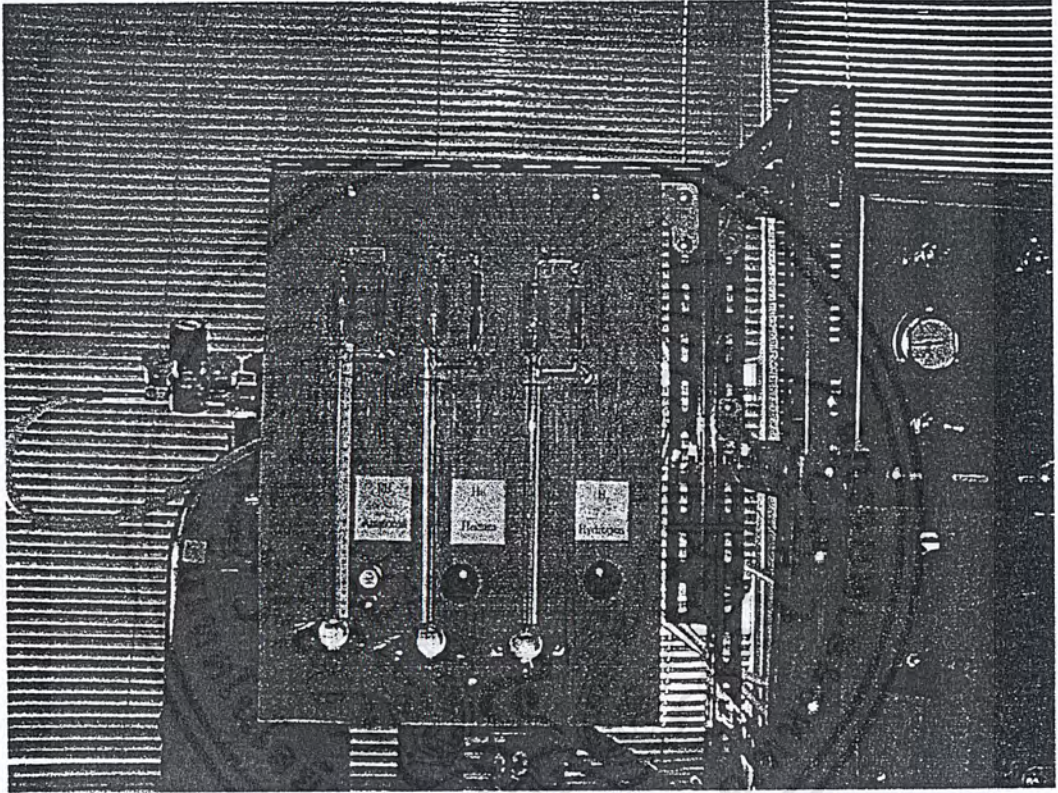
รูปที่ ก-1 ภาพรวมของอุปกรณ์ทั้งหมดของโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



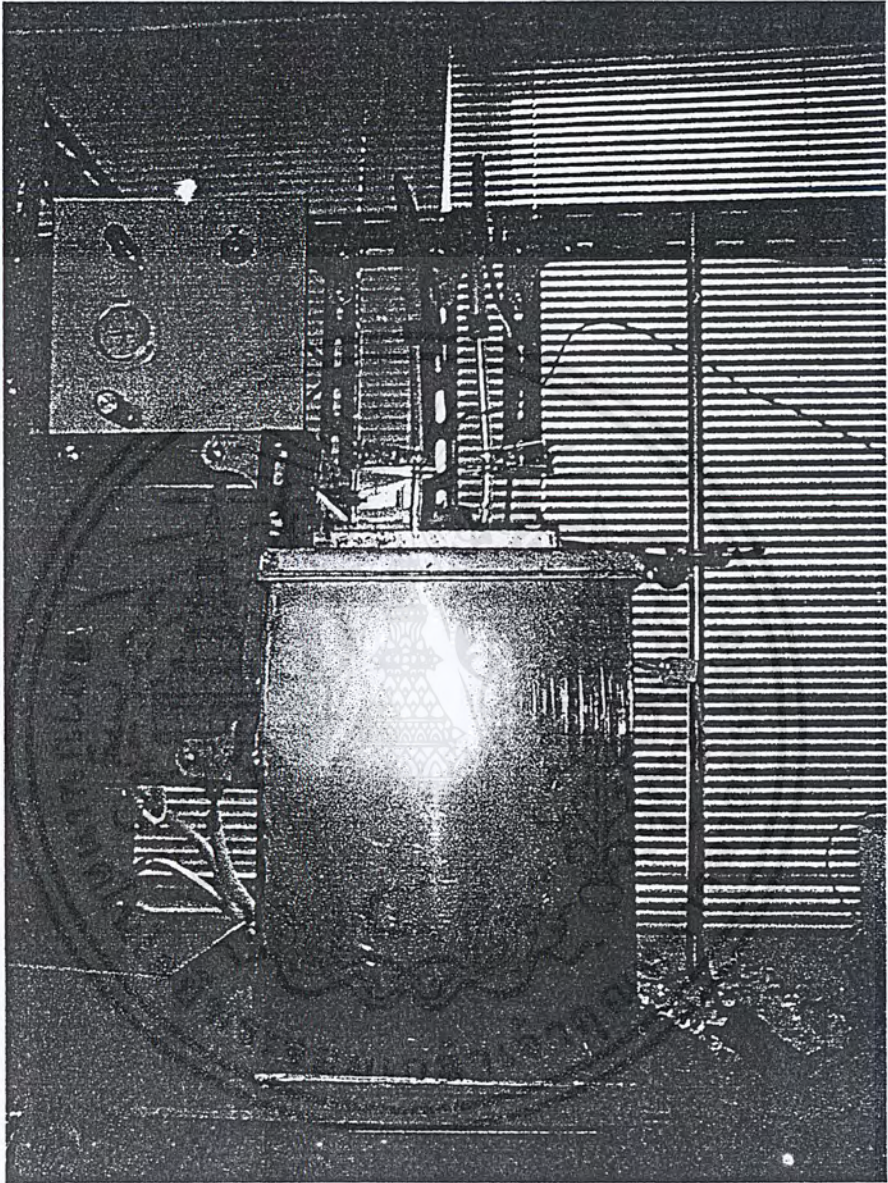
รูปที่ n-2 เครื่องตรวจวัดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



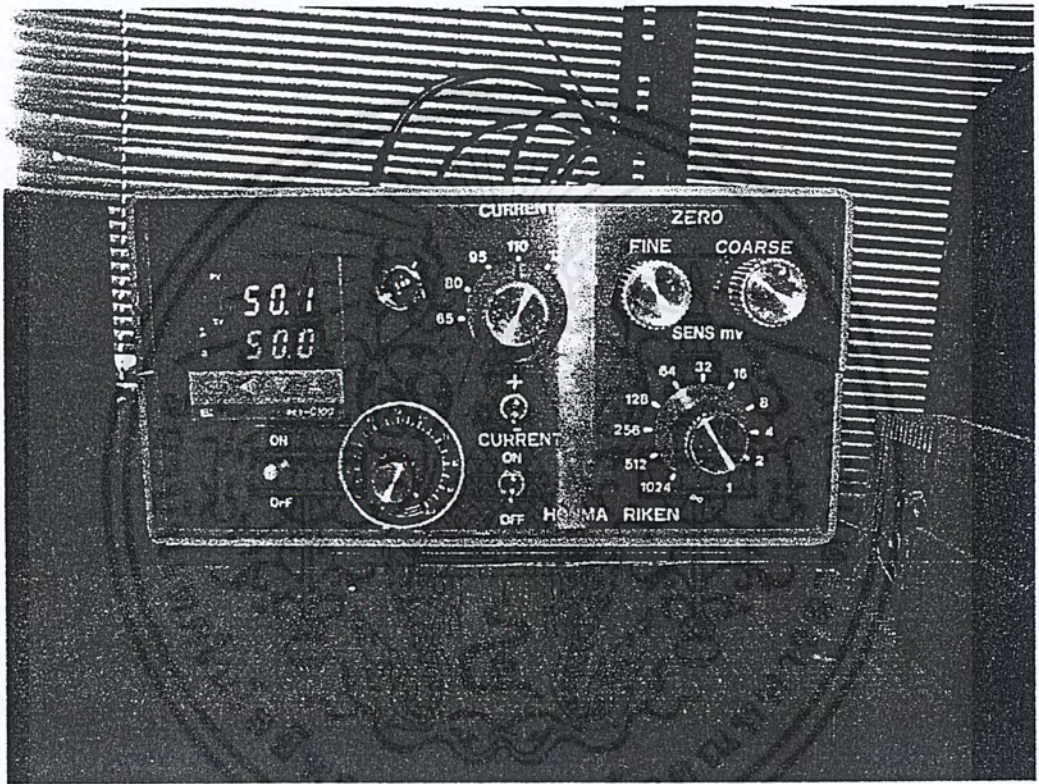
รูปที่ ก-3 เครื่องควบคุมอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



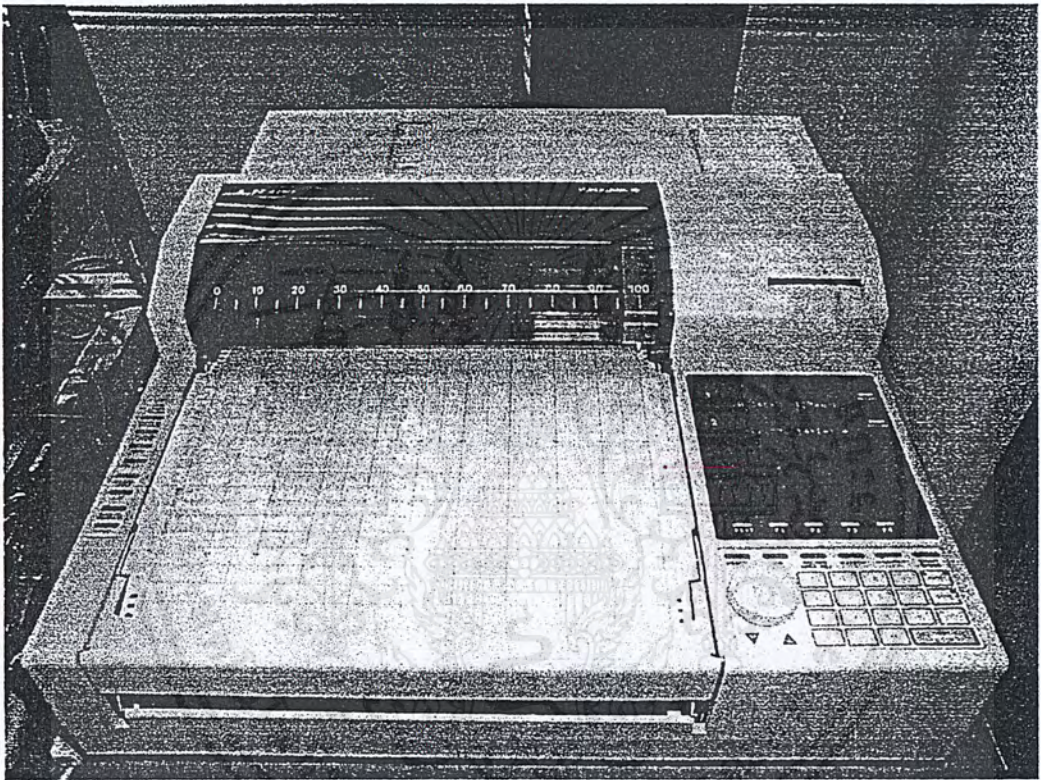
รูปที่ ก-4 เครื่องทำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



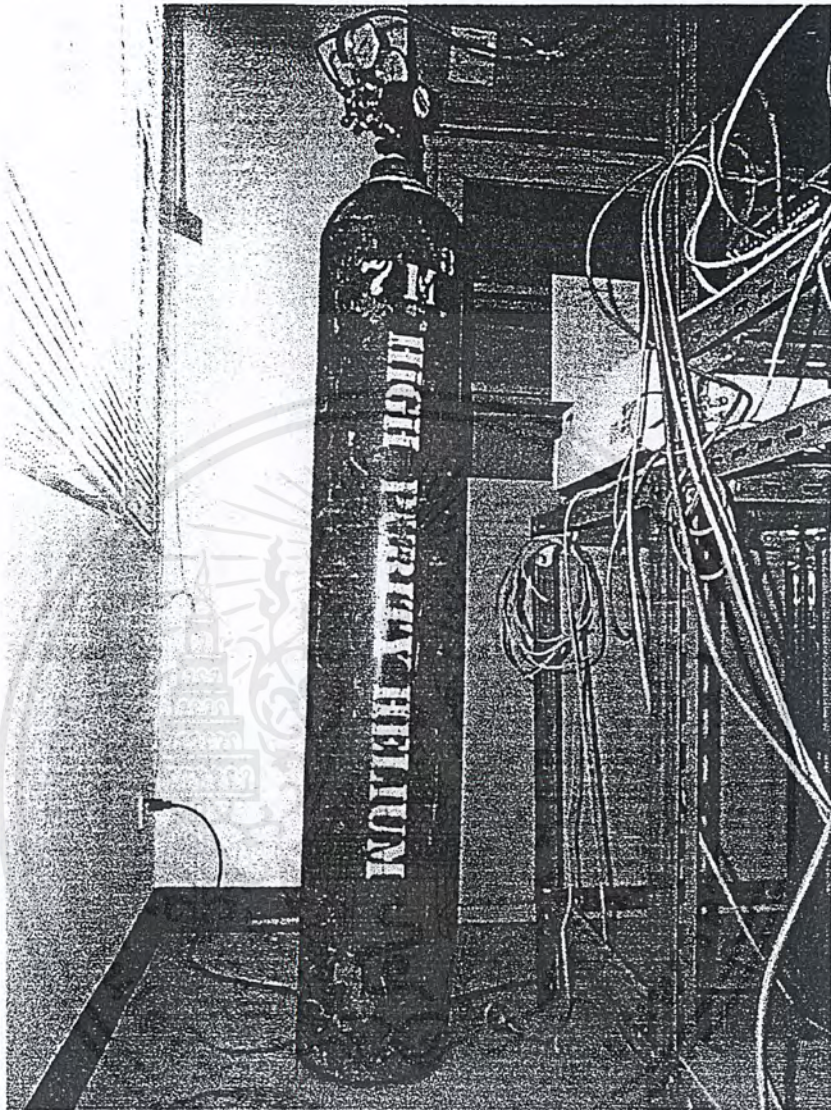
รูปที่ ก-5 เครื่องขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



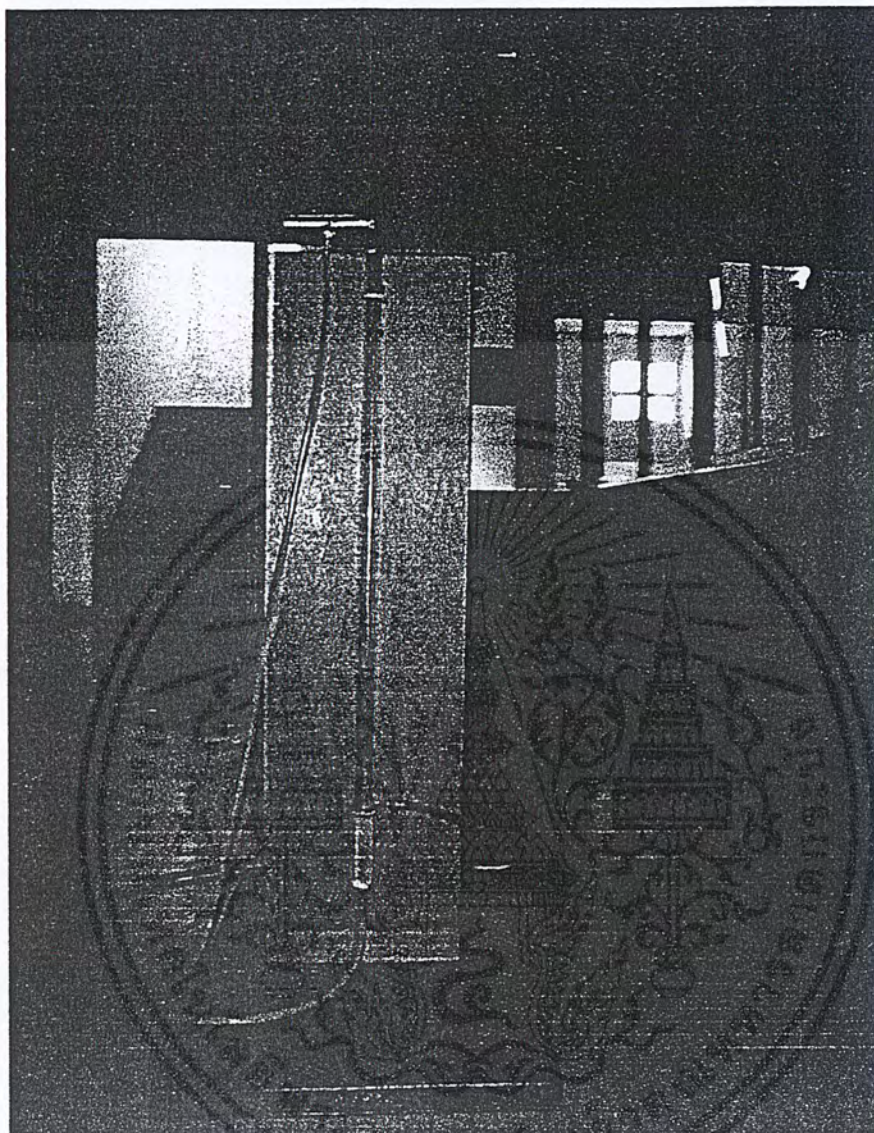
รูปที่ ก-6 เครื่องบันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-7 ถังบรรจุก๊าซที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-8 เครื่องสอบเทียบอัตราการไหลของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-9 ตัวคุมค่าความดัน (Regulator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข-1 การคำนวณหาปริมาณดูดซับจาก Breakthrough curve

ข-1.1 การคำนวณหาจำนวนโมลของก๊าซเอทิลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ จากสมการ

$$PV = nRT \quad (ข-1)$$

โดยที่

$$P = \text{ความดันของระบบ } (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})$$

$$V = \text{ปริมาตรของก๊าซเอทิลีน } (\text{m}^3)$$

$$n = \text{จำนวนโมลของก๊าซเอทิลีน}$$

$$R = \text{ค่าคงที่ของก๊าซ } (8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa} / \text{mol K})$$

$$T = \text{อุณหภูมิของระบบ } (300 \text{ K})$$

คำนวณหาจำนวนโมลของก๊าซเอทิลีนปริมาตร 1 cm^3 สำหรับสัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเอทิลีนเท่ากับ 1 โดยแทนค่าลงในสมการจะได้

$$\begin{aligned} n_{(1)} &= \frac{PV}{RT} \\ &= \frac{1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa} / \text{mol K} \cdot 300 \text{ K}} \\ &= 4.05 \times 10^{-5} \text{ mol} \end{aligned}$$

คำนวณหาจำนวนโมลของก๊าซเอทิลีนปริมาตร 1 cm^3 สำหรับสัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเอทิลีนเท่ากับ 0.2 (20 % โดยปริมาตร) โดยแทนค่าลงในสมการจะได้

$$\begin{aligned} n_{(0.2)} &= n_{(1)} \times \text{สัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเอทิลีน} \\ &= 4.05 \times 10^{-5} \times 0.2 \\ &= 8.1 \times 10^{-6} \text{ mol} / \text{cm}^3 \end{aligned}$$

ในส่วนของจำนวนโมลของก๊าซเอทิลีนสำหรับสัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเอทิลีนอื่น ๆ แสดงไว้ดังตารางที่ ข-1 จำนวนโมลของก๊าซเอทิลีนที่สัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซเอทิลีน 0.05,0.1,0.15 และ 0.2 ตามลำดับ

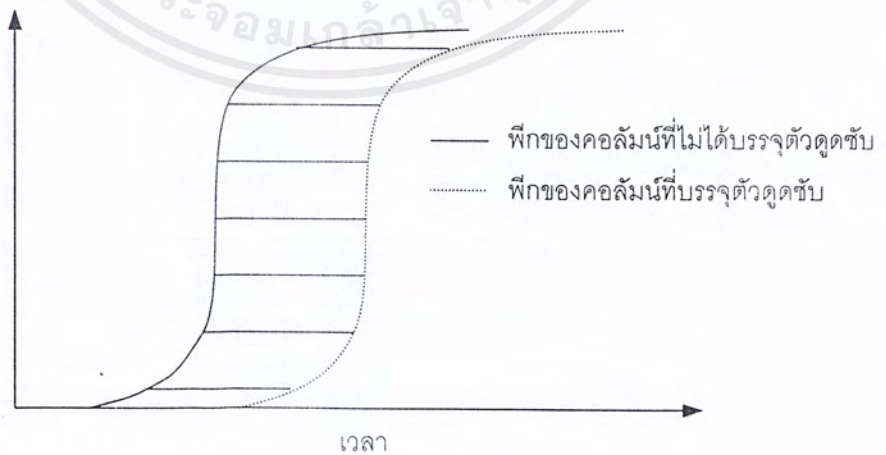
ตารางที่ ข-1 จำนวนโมลของก๊าซเอทิลีนที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0, 30 และ 50 องศาเซลเซียส

สัดส่วนโดยปริมาตร	จำนวนโมลของก๊าซเอทิลีน (mol/cm ³)
0.05	2.025×10^{-5}
0.1	4.050×10^{-6}
0.15	6.075×10^{-6}
0.2	8.100×10^{-6}

ข-1.2 การหาพื้นที่ของการดูดซับก๊าซเอทิลีนของซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

รูปแบบของพื้นที่ของการดูดซับก๊าซเอทิลีนแสดงดังรูปที่ ข-1

ความยาวของกระดาษ



รูปที่ ข-1 รูปแบบของพื้นที่ของการดูดซับก๊าซเอทิลีน

จากรูปที่ ข-1 จะเห็นว่าพื้นที่ของการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่ได้ไม่สามารถทำการวัดค่าได้ จึงจำเป็นที่จะต้องทำกราฟมาตรฐานของพื้นที่กระดาษกับน้ำหนักของกระดาษขึ้นมาเพื่อใช้ในการประมาณค่าพื้นที่ของการดูดซับที่แท้จริง กราฟมาตรฐานของพื้นที่กระดาษกับน้ำหนักของกระดาษแสดงไว้ในภาคผนวก ค-2

ข-1.3 การหาปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีน

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนเท่ากับ 20 % โดยปริมาตร อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

จากสมการ

$$q = Q (C_0 - C) dt \tag{ข-2}$$

โดยที่

q = ปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีน (mol)

Q = อัตราการไหลโดยรวมของก๊าซ (30 cm³/min)

C₀ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซเอทิลีน (mol/cm³)

C = ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนที่เวลาใด ๆ (mol/cm³)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)

(C₀-C)dt = ปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนต่อเวลา (mol/cm³.min)

ถ้าให้ก๊าซเอทิลีนความเข้มข้น 20% โดยปริมาตรที่มีจำนวนโมลของก๊าซเอทิลีน 8.1 10⁻⁶ mol/cm³ ไหลผ่านคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับซึ่งไม่ได้บรรจุตัวดูดซับลงไปเป็นเวลา 5 นาที จะได้พื้นที่ของกระดาษเท่ากับ 11.80 cm² นั้นหมายความว่า (C₀-C)dt สำหรับพื้นที่ของกระดาษ 11.80 cm² มีค่าเท่ากับ 17.68 cm² ดังนั้น

$$\begin{aligned} (C_0 - C)dt \text{ (พื้นที่กระดาษ } 17.68 \text{ cm}^2) &= \\ &= 6.07 \cdot 10^5 \text{ mol/cm}^3 \cdot \text{min} \end{aligned}$$

แทนค่า $\int (C_0 - C) dt$ ที่ได้ลงในสมการที่ ข-2 จะได้

$$q = 30 \text{ cm}^3/\text{min} \times 6.07 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3 \cdot \text{min}$$

$$= 1.82 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

คำนวณหาปริมาณดูดซับเทียบกับน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยในกรณีนี้คือซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่มีน้ำหนัก 1.302 กรัม

$$\text{ปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนต่อน้ำหนักของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5} = \frac{1.82 \times 10^{-3} \text{ mol}}{1.302 \text{ g}}$$

$$= 1.4 \times 10^{-3} \text{ mol/g}$$

$$= 1.4 \text{ mmol/g}$$

สำหรับปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนของซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY ที่ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีนและอุณหภูมิอื่น ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ค

ข-2 การวิเคราะห์หาชนิดไอโซเทอมของการดูดซับที่เหมาะสม

1. Lanmuir isotherm [4]

จากความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\frac{c}{q} = \frac{c}{q_0} + \frac{1}{bq_0}$$

(ข-3)

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_0} + \frac{1}{bq_0 c}$$

พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q$ กับ $1/c$ จะได้ความชันของกราฟ คือ $1/bq_0$ จุดตัดแกน Y คือ $1/q_0$ ดังนั้นจึงสามารถหาค่า b, q_0 และ R^2 ได้แสดงในตารางที่ ข-2

2. Freundlich isotherm [4]

จากความสัมพันธ์ที่ว่า

$$q = kc^{1/n}$$

(ข-4)

$$\log q = \log k + \frac{1}{n} \log c$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ กับ $\log c$ จะได้ความชันของกราฟ คือ $1/n$ และจุดตัดแกน Y คือ $\log k$ ดังนั้นจึงสามารถหาค่า k, n, R^2 ได้ดังแสดงในตารางที่ ๗-2

ตารางที่ ๗-2 ค่าของตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์กราฟ

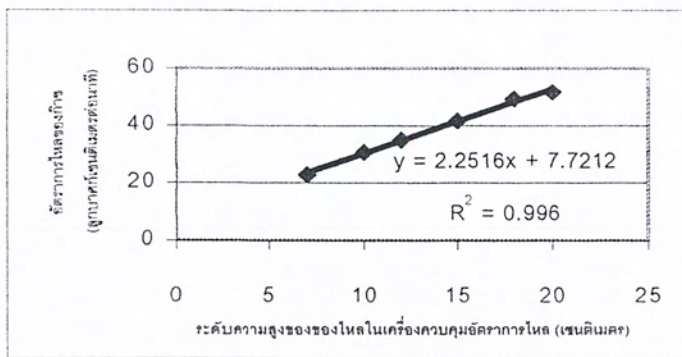
ตัวดูดซับ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Langmuir isotherm			Freundlich Isotherm		
		q_0	b	R^2	k	n	R^2
Silica gel	0	1.28	0.19	0.9608	2.10	1.19	0.9677
	30	-2.36	-0.27	0.9932	1.80	0.97	0.9766
	50	-0.58	-2.35	0.9672	2.02	0.73	0.9544
HZSM-5	0	1.58	0.02	0.6885	2.41	2.94	0.7931
	30	4.27	2.16	1.0000	18.20	0.66	0.9792
	50	0.45	0.02	0.9447	0.47	21.05	0.9227
HY	0	1.91	0.02	0.9784	2.94	2.04	0.9544
	30	4.95	0.03	0.9932	5.01	1.09	0.9915
	50	0.82	0.23	0.7814	1.38	1.52	0.7584



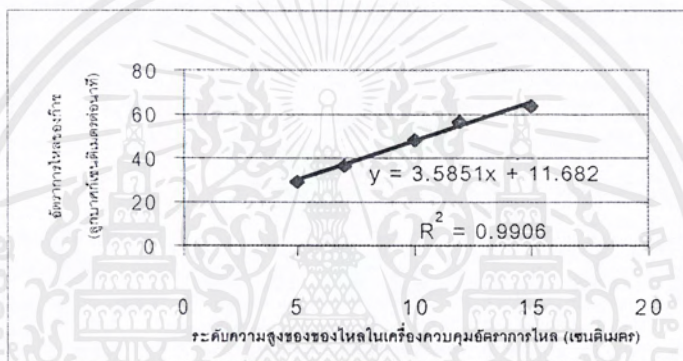
ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง

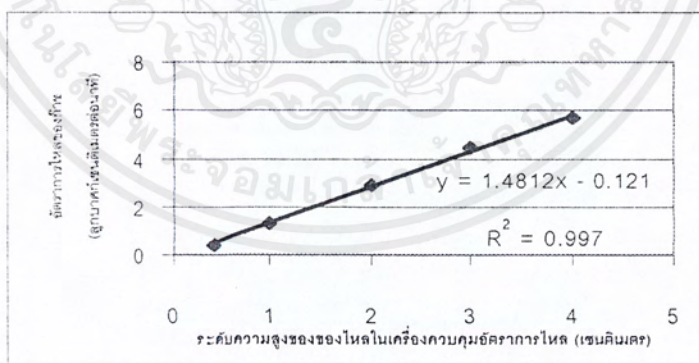
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

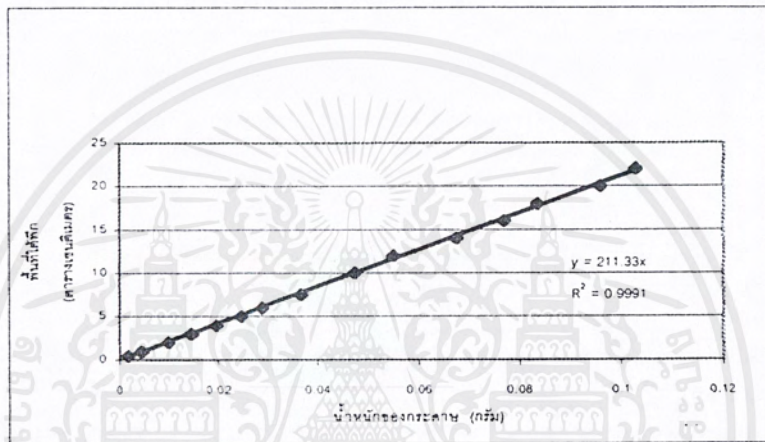


(c)

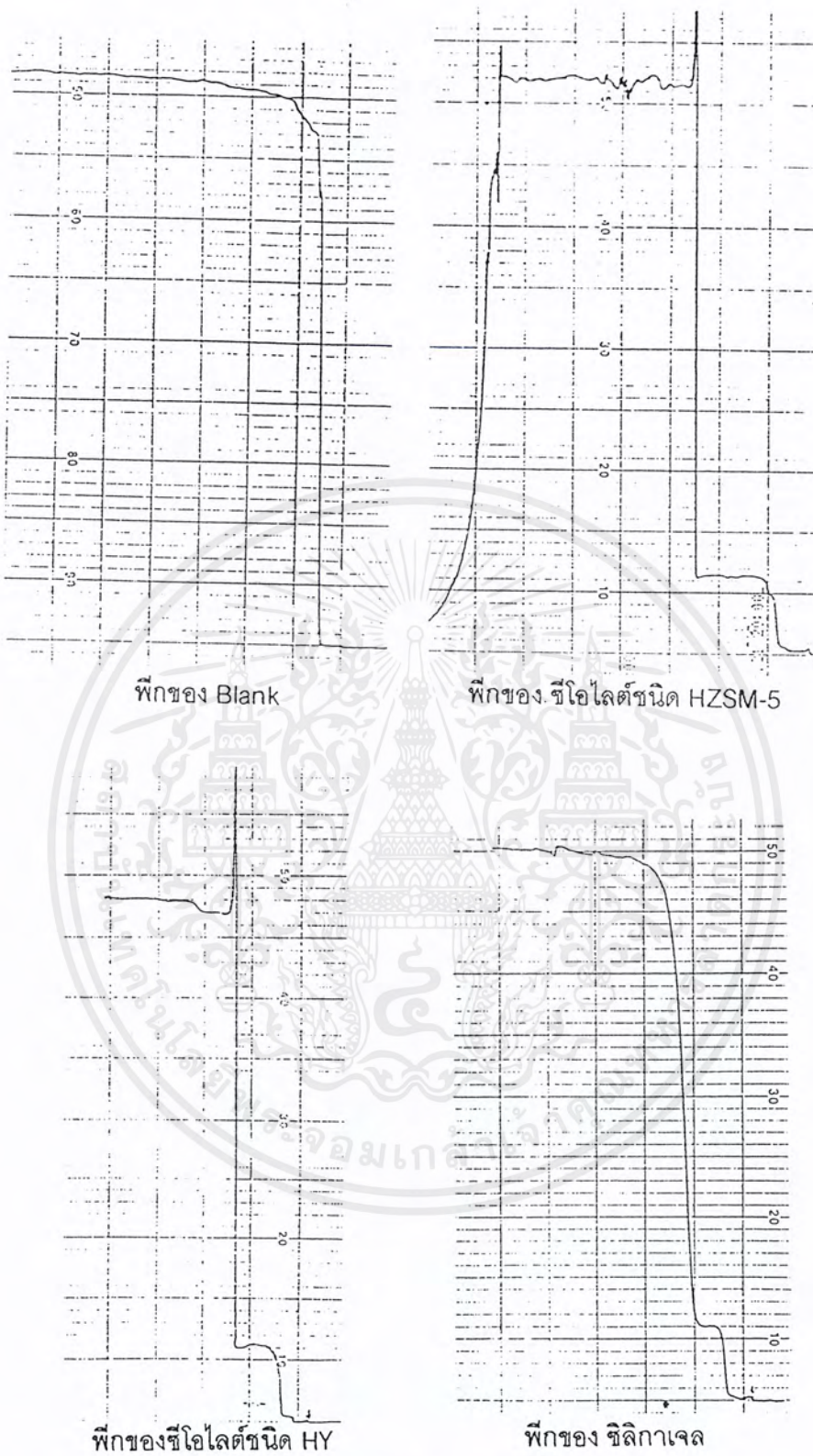
รูปที่ ค-1 ผลการสอบเทียบอัตราการไหล

(a) ก๊าซฮีเลียมถึงที่ 1 (b) ก๊าซฮีเลียมถึงที่ 2 (c) ก๊าซเอทิลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



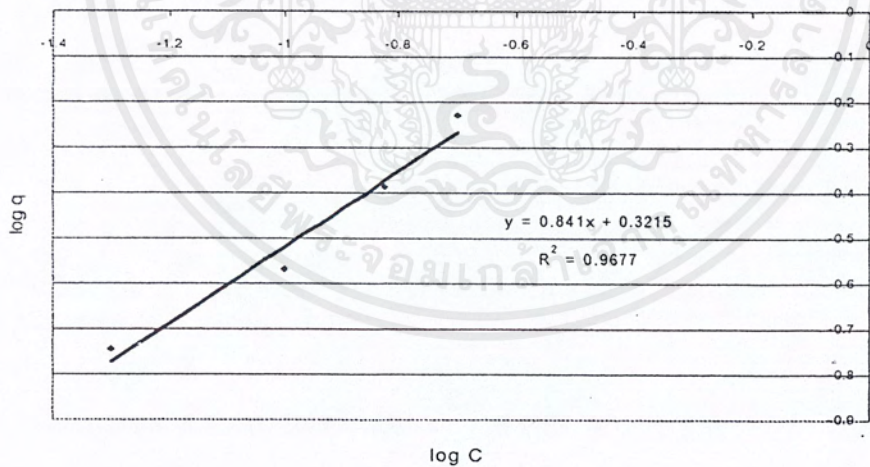
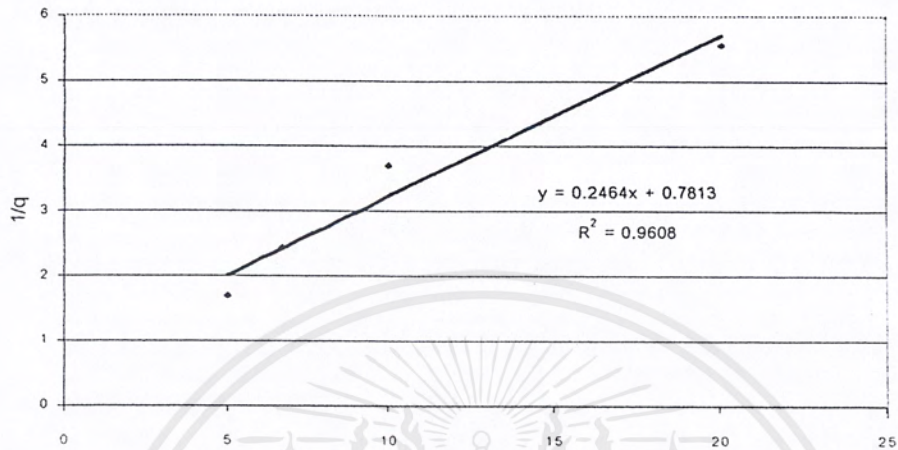
รูปที่ ค-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ที่ได้พิกที่ได้จากเครื่องบันทึกผล
กับน้ำหนักของกระดาษที่มีขนาดเท่ากับพื้นที่ที่ได้พิกที่ได้จากเครื่องบันทึกผล



รูปที่ ค-3 ตัวอย่างพิกที่ได้จากเครื่องบันทึกผล

ในการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของก๊าซเอทิลีน 15 % โดยปริมาตร สำหรับ Blank ซีลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



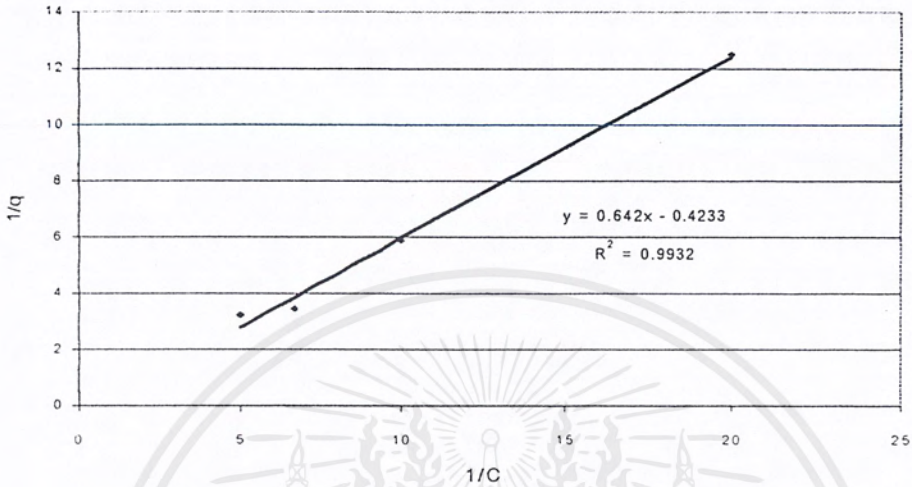
(b)

รูปที่ ค-4 กราฟเปรียบเทียบไอโซเทอมของซิดิกาเจล ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

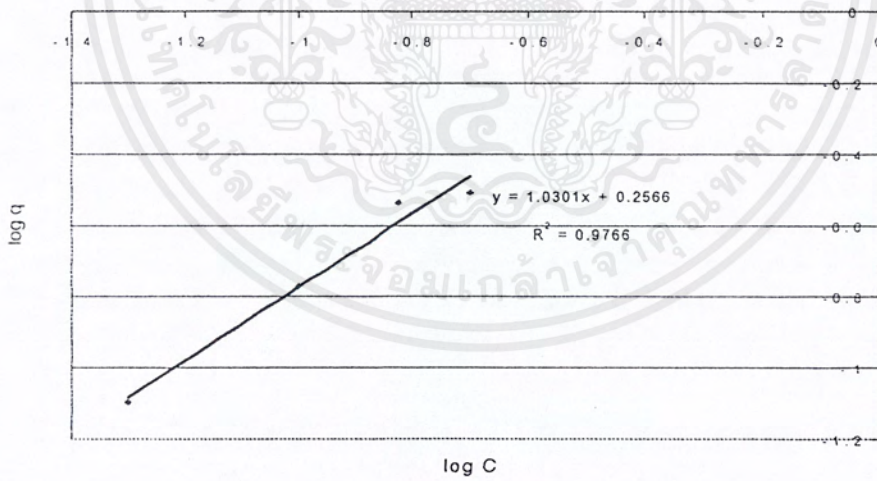
(a) Langmuir isotherm

(b) Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



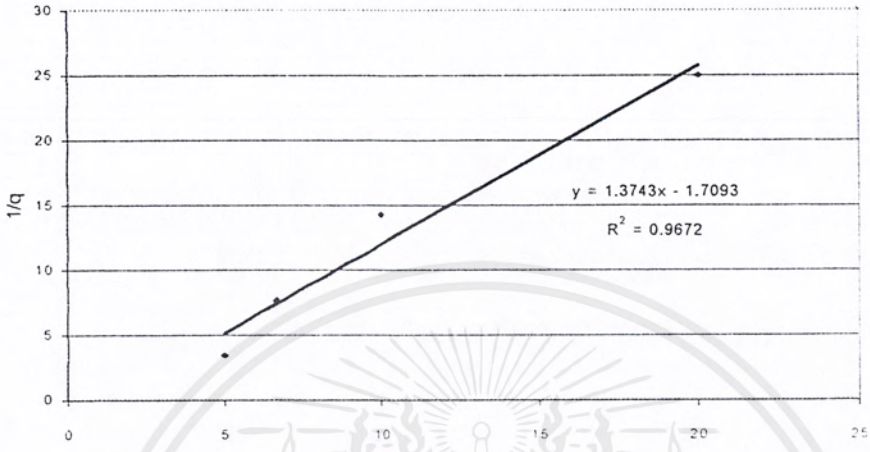
(b)

รูปที่ ค-5 กราฟเปรียบเทียบไอโซเทอมของซิดิกาเจล ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

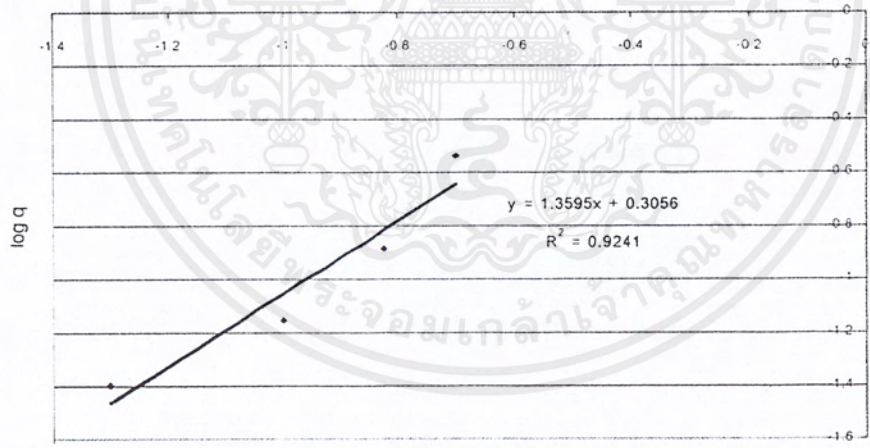
(a) Langmuir isotherm

(b) Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



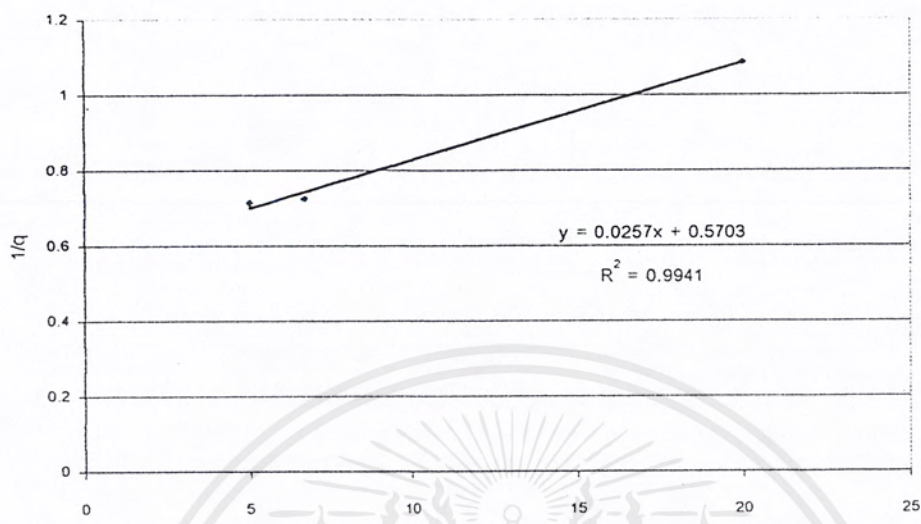
(b)

รูปที่ ค-6 กราฟเปรียบเทียบไอโซเทอมของซิลิกาเจล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

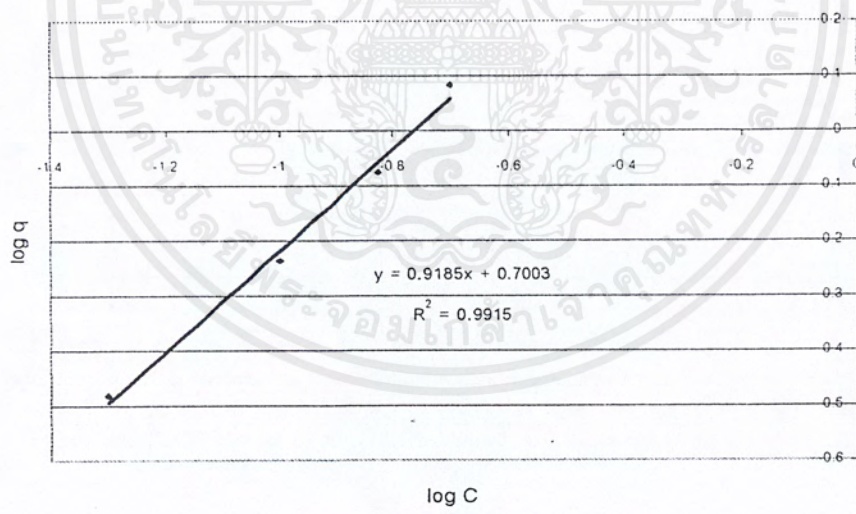
(a) Langmuir isotherm

(b) Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1/C
(a)



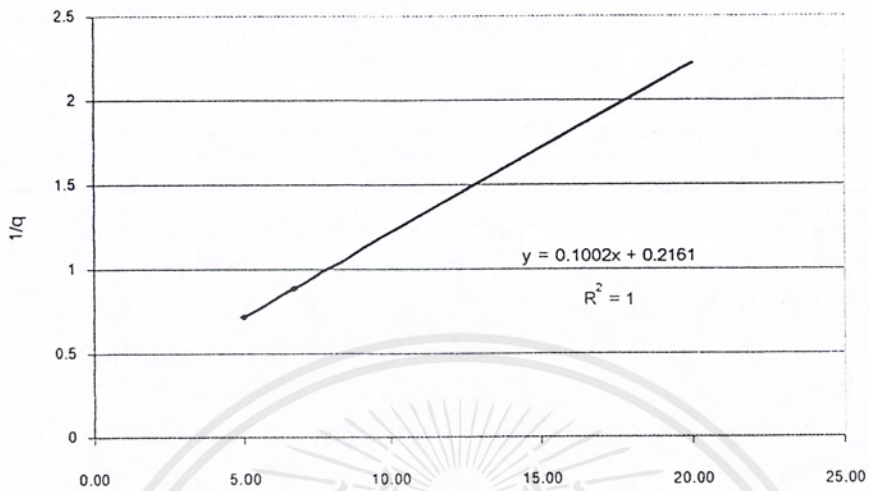
(b)

รูปที่ ค-7 กราฟเปรียบเทียบไอโซเทอมของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

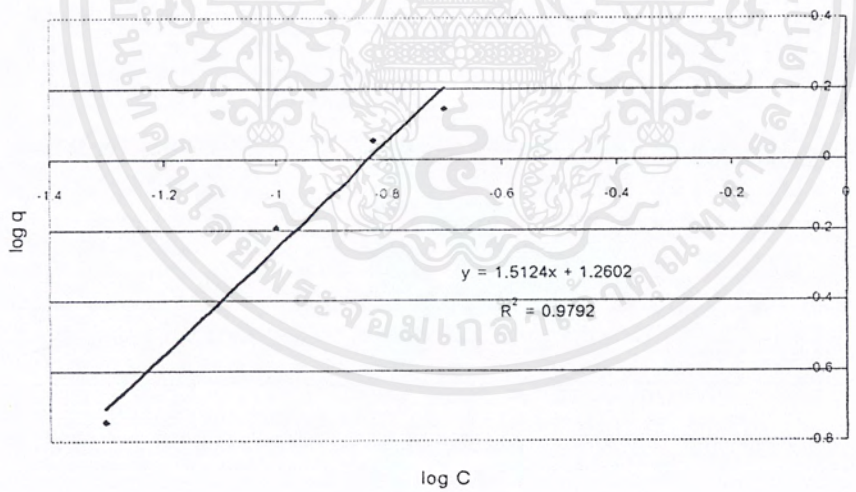
(a) Langmuir isotherm

(b) Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

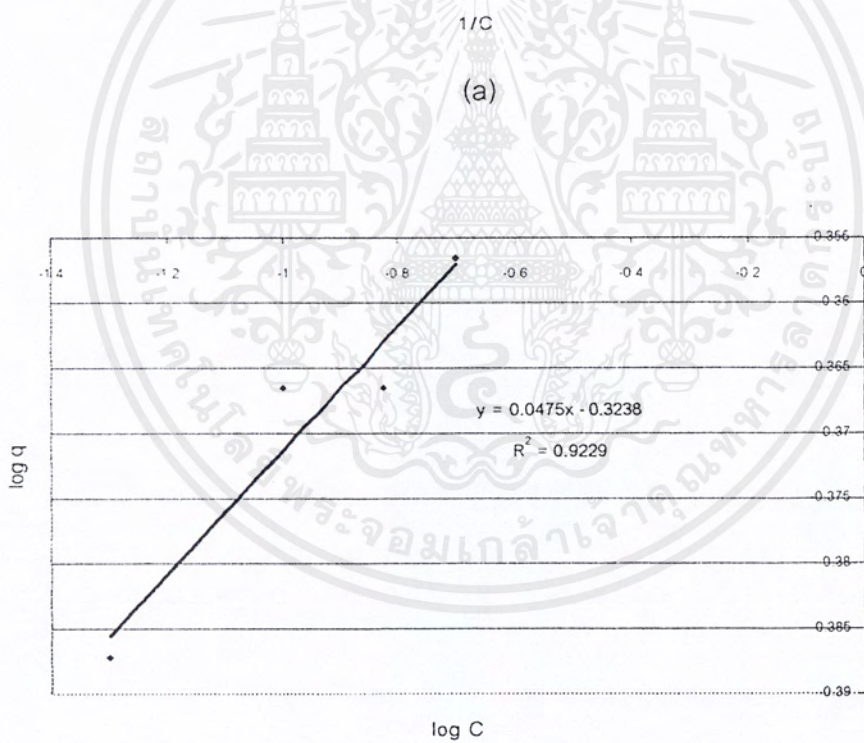
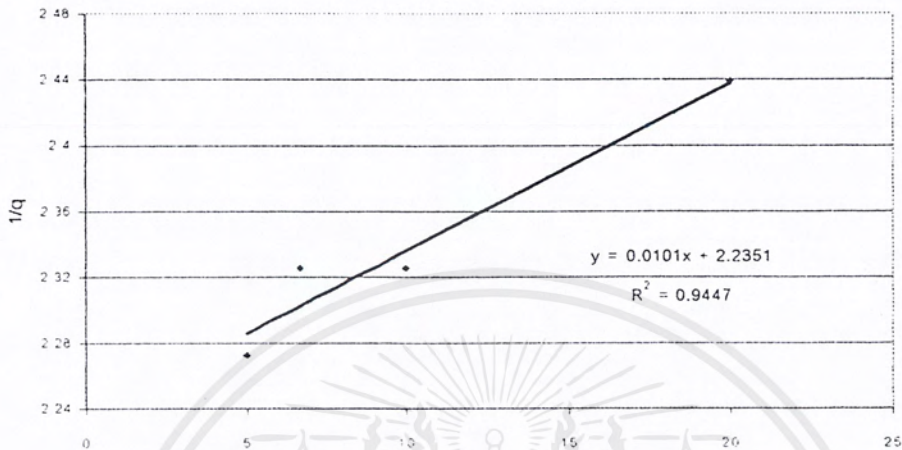


(b)

รูปที่ ค-8 กราฟเปรียบเทียบไอโซเทอมของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

- (a) Langmuir isotherm
- (b) Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



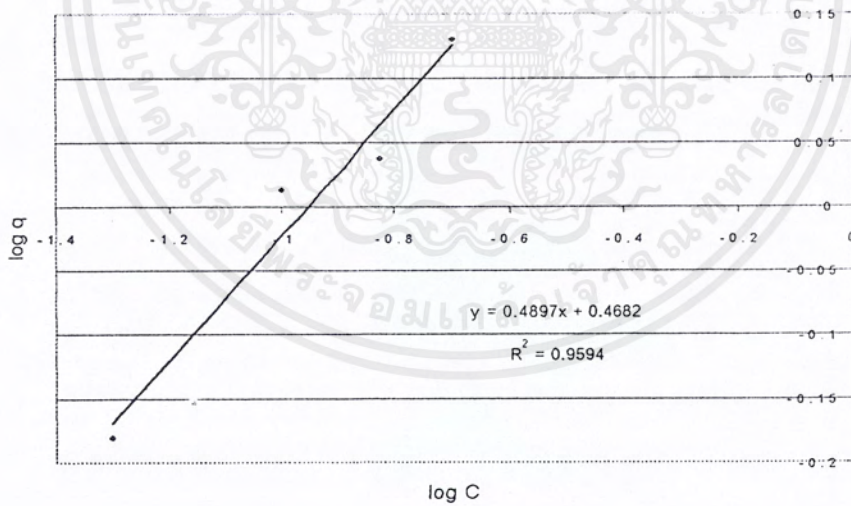
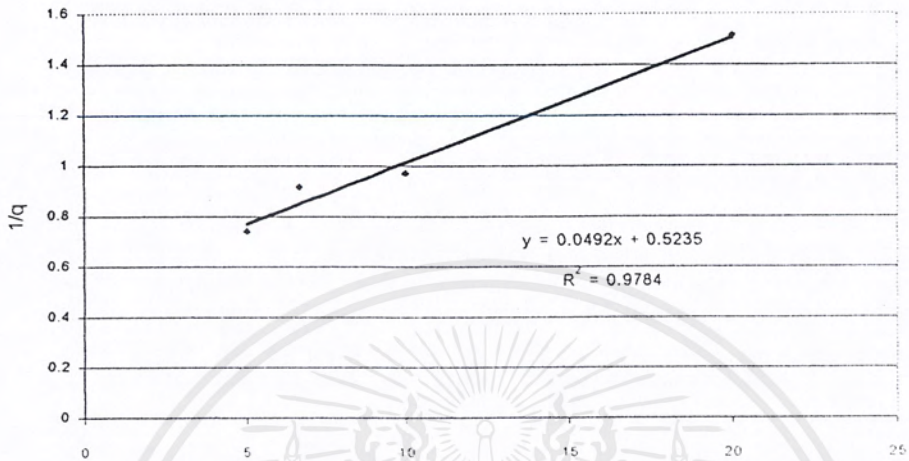
(b)

รูปที่ ค-9 กราฟเปรียบเทียบไอโซเทอมของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

(a) Langmuir isotherm

(b) Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



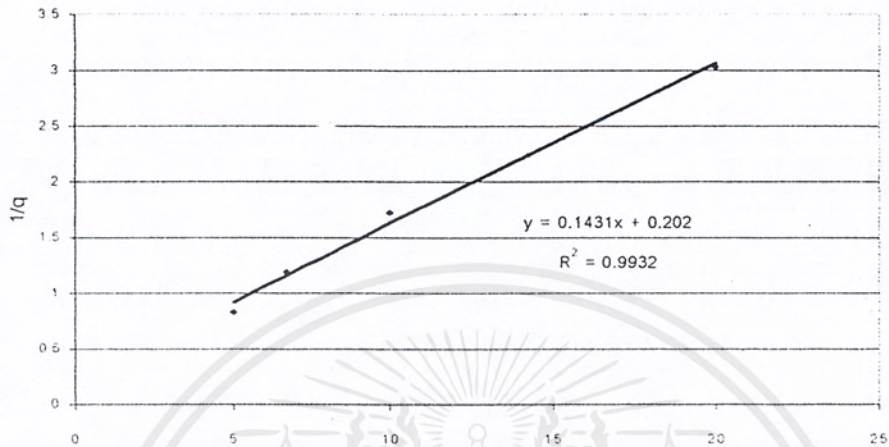
(b)

รูปที่ ค-10 กราฟเปรียบเทียบไอโซเทอมของซีไอไลต์ชนิด HY ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

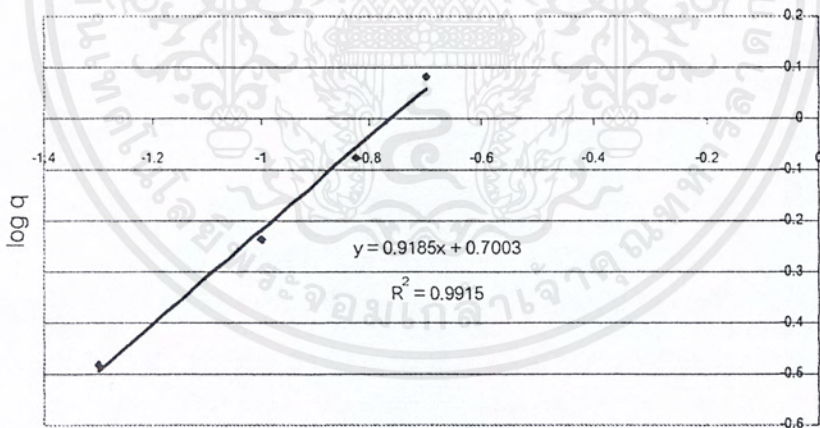
(a) Langmuir isotherm

(b) Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



log C

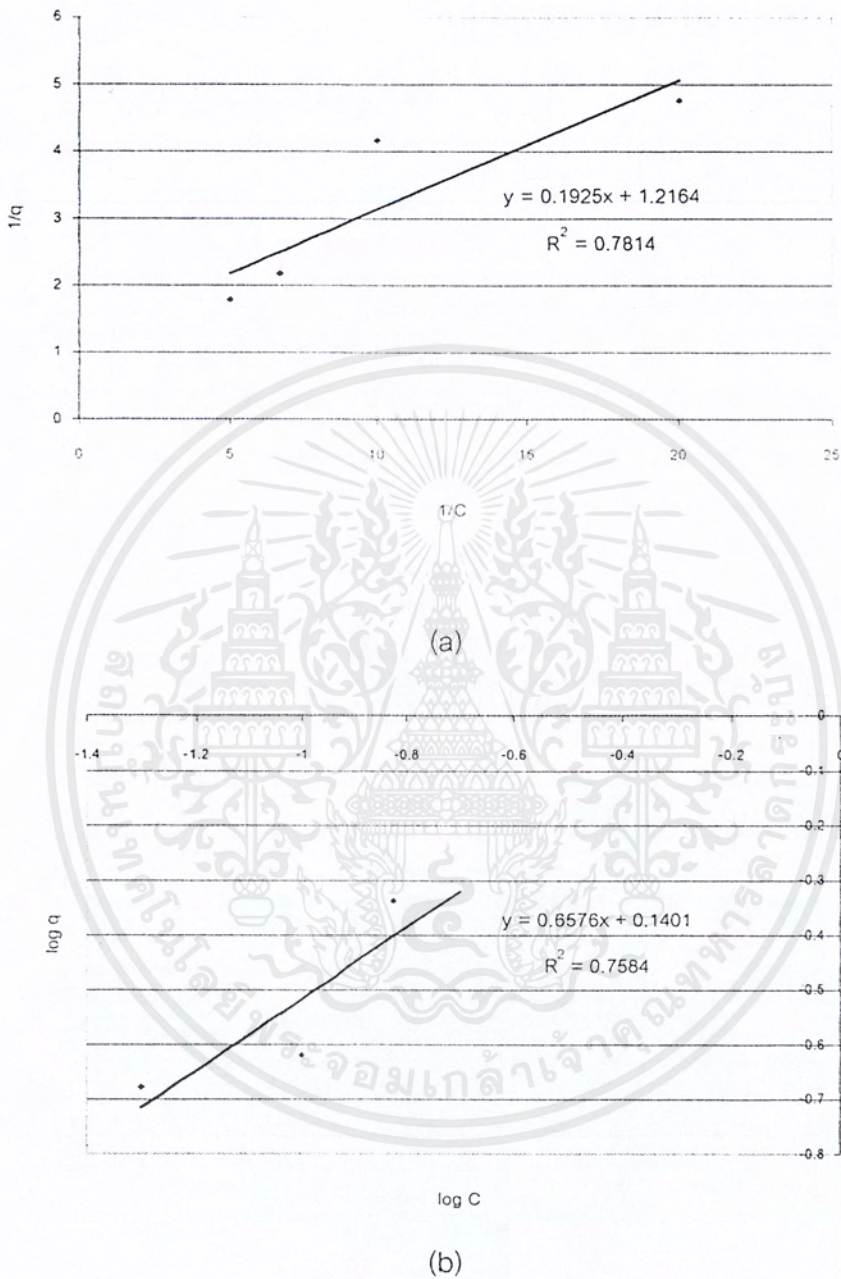
(b)

รูปที่ ค-11 กราฟเปรียบเทียบไอโซเทอมของซีโอไลต์ชนิด HY ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

(a) Langmuir isotherm

(b) Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

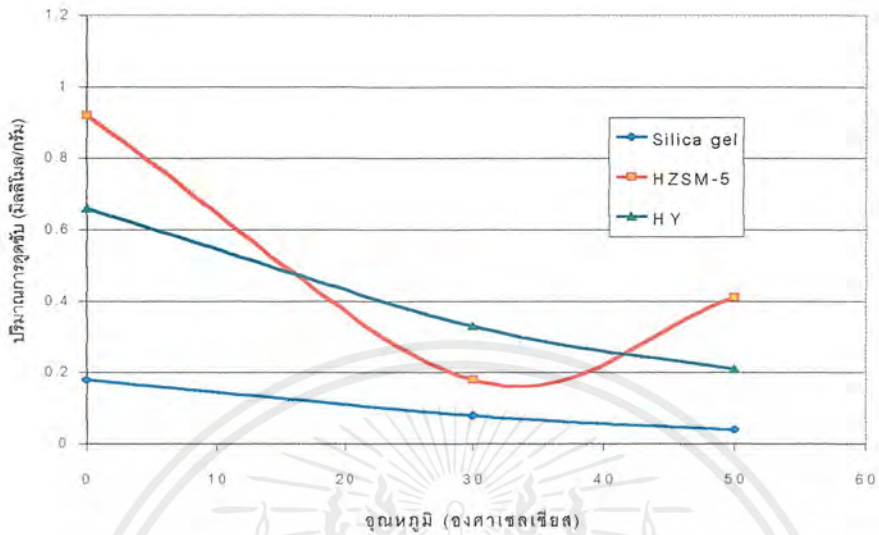


รูปที่ ค-12 กราฟเปรียบเทียบไอโซเทอมของซีโอไลต์ชนิด HY ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

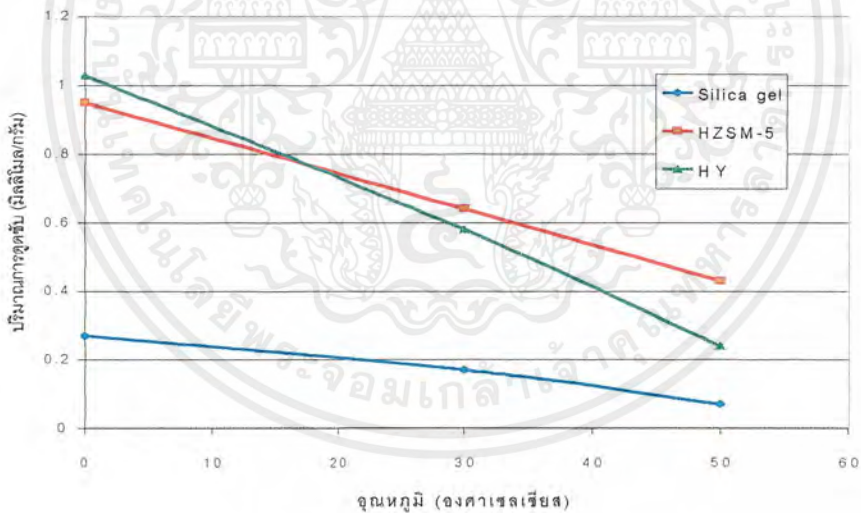
(a) Langmuir isotherm

(b) Freundlich isotherm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



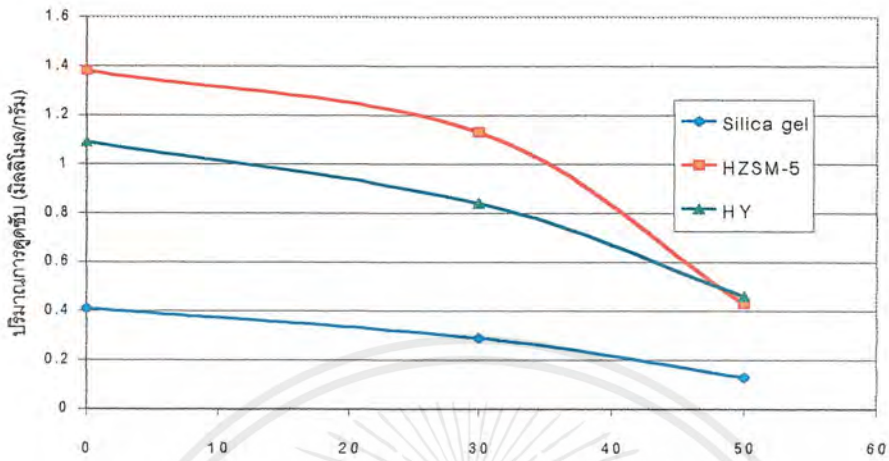
(b)

รูปที่ ค-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณการดูดซับ

(a) ที่ความเข้มข้นก๊าซเอทิลีน 5% โดยปริมาตร

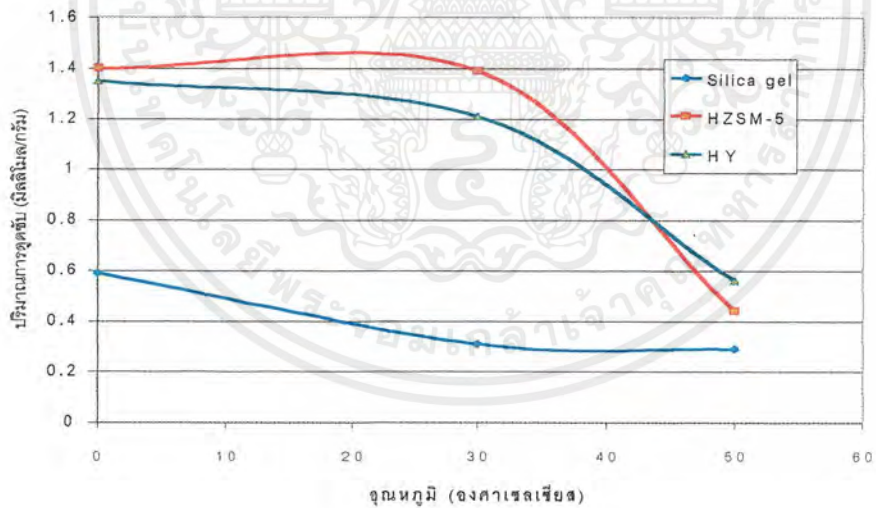
(b) ที่ความเข้มข้นก๊าซเอทิลีน 10% โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

(a)



อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

(b)

รูปที่ ค-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณการดูดซับ

(a) ที่ความเข้มข้นก๊าซเอทิลีน 15% โดยปริมาตร

(b) ที่ความเข้มข้นก๊าซเอทิลีน 20% โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ของซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 แสดงไว้ในภาคผนวก ข-1

ตารางที่ ค-1 แสดงปริมาณการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่คำนวณได้จากพื้นที่เหนือ Breakthrough curve ของซิลิกาเจล ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และซีโอไลต์ชนิด HY ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ

ที่ 5% โดยปริมาตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ซิลิกาเจล	HZSM-5	HY
0	0.18	0.92	0.66
30	0.08	0.18	0.33
50	0.04	0.41	0.21

ที่ 10% โดยปริมาตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ซิลิกาเจล	HZSM-5	HY
0	0.27	0.95	1.03
30	0.17	0.64	0.58
50	0.07	0.43	0.24

ที่ 15% โดยปริมาตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ซิลิกาเจล	HZSM-5	HY
0	0.41	1.38	1.09
30	0.29	1.13	0.84
50	0.13	0.43	0.46

ที่ 20% โดยปริมาตร

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ซิลิกาเจล	HZSM-5	HY
0	0.59	1.4	1.35
30	0.31	1.39	1.21
50	0.29	0.44	0.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้