

ไอโซเทิร์มการดูดซับของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเข้มข้นด้วยซีโอไลต์



นาย ยงยุทธ แสนสุพรรณ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

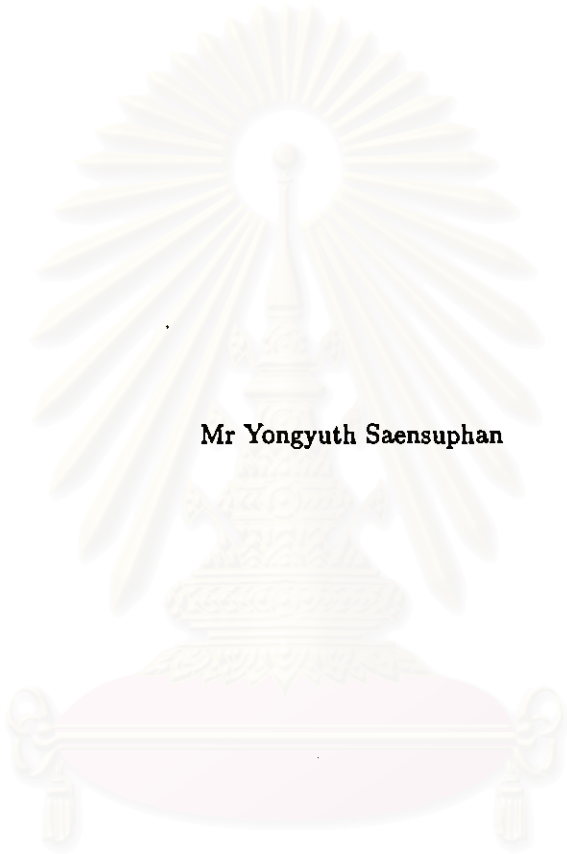
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-096-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

118906887

**ADSORPTION ISOTHERMS OF CONCENTRATED HYDROCARBON GASES ON
ZEOLITES**



Mr Yongyuth Saensuphan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering**

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-332-096-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

ภาควิชา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

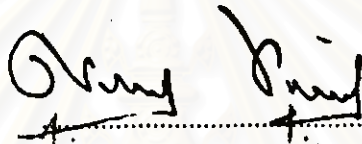
ไอโซเทอริมการดูดซับของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเข้มข้นด้วยซีโอไลต์

นายยงยุทธ แสนสุพรรณ

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช

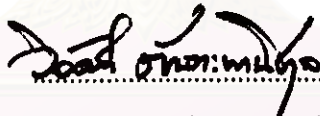
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล)



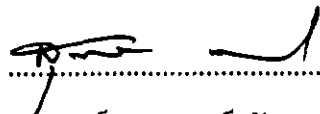
อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล)



กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สุพจน์ พัดนะศรี)

ขงยุทธ แสนสุพรรณ : ไอโซเทิร์มการดูดซับของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเข้มข้นด้วยซีโอไลต์
(ADSORPTION ISOTHERMS OF CONCENTRATED HYDROCARBON GASES ON
ZEOLITES) อ.ที่ปรึกษา : ดร.เคชา ถัทรศิริเวช, 105 หน้า. ISBN 974-332-096-2.

ไอโซเทิร์มการดูดซับของแก๊สมิเทน อีเทน และโพรเพน บนซีโอไลต์ชนิด NaA, NaX และ NaY ณ
อุณหภูมิระหว่าง 35-100 องศาเซลเซียส วัดได้ด้วยการไหลผ่านทะเลหอดูดซับของแก๊สแต่ละชนิด แต่ละไอโซเทิร์ม
สอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรอนด์ลิช ในช่วงความดันย่อย 20-160 กิโลปาสกาล
อย่างไรก็ตาม ไอโซเทิร์มมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์ซึ่งขึ้นกับ
อุณหภูมิ สอดคล้องกับสมการของแวนต์ฮอฟฟ์ (van't Hoff) แก๊สโพรเพนถูกดูดซับได้ดีกว่าแก๊สอีเทน และมีเทน
ตามลำดับ ในขณะที่ ปริมาณการดูดซับสูงสุดสำหรับการดูดซับแก๊สมิเทน มากกว่าการดูดซับแก๊สอีเทน และโพรเพน
ตามลำดับ แม้ซีโอไลต์ชนิด NaY มีพื้นที่การดูดซับมากกว่าซีโอไลต์ชนิด NaX และ NaA ตามลำดับ แต่พื้นที่การ
ดูดซับของซีโอไลต์ชนิด NaA ถูกใช้ประโยชน์ได้มากกว่าพื้นที่การดูดซับของซีโอไลต์ชนิด NaX และ NaY ตามลำดับ
ผลของการดูดซับเพียงชั้นเดียว ณ อุณหภูมิต่ำ สามารถแสดงด้วยภาพการดูดซับบนต้นแยงไอออนบวกของภาพจำลอง
การจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์เป็นระนาบแบบสม่ำเสมอ เฉพาะปริมาณความร้อนของการดูดซับแก๊สมิเทนบน
ซีโอไลต์ชนิด NaA และ NaX น้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น ณ จุดเดือดปกติ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2541

ลายมือชื่อนิติกร *Chun Wiratit*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *11/11/11*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

CR17418 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

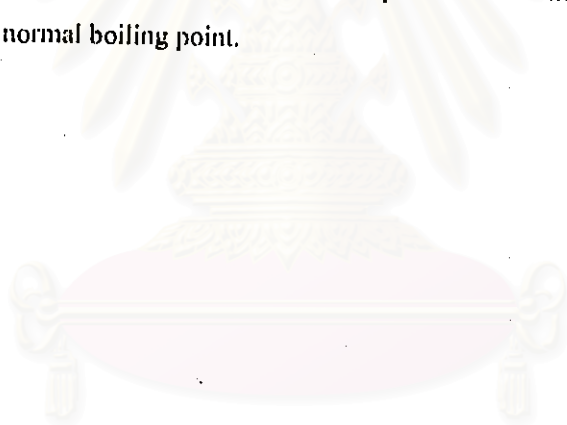
KEY WORD: ADSORPTION / BREAKTHROUGH CURVE / LIGHT HYDROCARBON / ZEOLITE

YONGYUTH SAENSUPHAN : ADSORPTION ISOTHERMS OF CONCENTRATED HY-

DROCARBON GASES ON ZEOLITES. THESIS ADVISOR : DEACHA CHATSIRIWECH,

Ph.D. 105 pp. ISBN 974-332-096-2.

Adsorption isotherms of methane, ethane and propane on NaA, NaX and NaY zeolites at temperatures between 35-100 °C were measured by the dynamic column breakthrough method. Within the partial pressure range of 20-160 kPa, all isotherms agreed with both Langmuir and Freundlich models. However, the isotherms tended to be linear as an increase in temperature. The dependence of adsorption Langmuir constant on temperature corresponded with van't Hoff equation. Propane was adsorbed more strongly than ethane and methane, respectively. While the maximum amount adsorbed of methane was greater than that of ethane and propane, respectively. Although NaY provided more adsorption area than NaX and NaA, respectively, the area of NaA was utilized more effectively than that of NaX and NaY, respectively. The results of monolayer adsorption at low temperature could be depicted as adsorption on cation sites of uniform two-dimensional framework models. Only the heats of adsorption of methane on NaA and NaX were less the heat of condensation of the normal boiling point.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา..... 2541.....

ลายมือชื่อนิสิต..... *Y. Saensuphan*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Decha Chatsiriwech*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช ที่ให้ความเอาใจใส่ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ สำหรับงานวิจัยนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ดัชนีพานิชกุล และ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล และ ดร. สุพจน์ พัฒนะศรี สำหรับความช่วยเหลือ ตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆ ในการ ศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเชิดชัย บุญชูช่วย และการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนแก๊ส ในงานวิจัย ตลอดจน บริษัท ยูเนี่ยนคาร์ไบด์ ประเทศไทย บริษัท ทาเคดะ เคมีและอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้การสนับสนุนตัวดูดซับซีโอไลต์

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนๆ ที่ช่วยสนับสนุน และให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อ	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูป	ฅ
สารบัญตาราง	ฉ
สัญลักษณ์	ด
1 บทนำ	1
2 ทฤษฎีการดูดซับแก๊ส	5
2.1 ตัวดูดซับในอุตสาหกรรม	6
2.1.1 ถ่านกัมมันต์	6
2.1.2 อลูมินา	7
2.1.3 ซิลิกาเจล	7
2.1.4 ซีโอไลต์	8
2.2 สมดุลการดูดซับ	11
2.2.1 ไอโซเทิร์มเชิงเส้น	11

	๗
2.2.2 ไอโซเทิร์มที่ไม่เป็นเส้นตรง	12
2.3 กลไกการดูดซับ	13
2.4 การไหลผ่านทะลุหอดูดซับ	14
2.5 การวัดสมมูลการดูดซับ	15
3 การทดลอง	18
3.1 ระบบการวัดสมมูลการดูดซับ	18
3.1.1 ตัวดูดซับ	18
3.1.2 แก๊สถูกดูดซับ	18
3.1.3 แก๊สเฉื่อยผสม	19
3.2 เครื่องมือการทดลอง	19
3.3 วิธีวัดเส้นโค้งไหลผ่านทะลุ	21
4 ผลและการวิเคราะห์ผล	23
4.1 ลักษณะตัวดูดซับซีโอไลต์	23
4.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ	24
4.2.1 การประมาณข้อมูลสมมูลการดูดซับจากเส้นโค้งไหลผ่านทะลุ	24
4.2.2 แบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรอยดลิตซ์	25
4.2.3 การอธิบายสมมูลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมมูลการดูดซับของฟรอยดลิตซ์	33
4.2.4 การอธิบายสมมูลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงเมียร์	34
4.3 ข้อมูลสมมูลการดูดซับ กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์	38
4.3.1 การอธิบายสมมูลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมมูลการดูดซับของฟรอยดลิตซ์	39
4.3.2 การอธิบายสมมูลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงเมียร์	40
4.3.3 การทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ จากภาพจำลอง การจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ เป็นแบบระนาบ	42

4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ และเฮนรี	54
4.5	ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสารภายในหลอดดูดซับ	57
4.6	ปริมาณความร้อนของการดูดซับ	61
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	63
5.1	บทสรุป	63
5.2	ข้อเสนอแนะ	64
	รายการอ้างอิง	65
	ภาคผนวก	69
ก	ตัวอย่างการคำนวณ	69
ก. 1	ปริมาณการดูดซับ	69
ก. 2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลของแลงเมียร์ สำหรับกรณี พิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวล และต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์	71
ก. 3	ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ จากแผนภาพจำลอง การจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์เป็นแบบระนาบ	72
	ก. 3.1 พื้นที่ภาพฉายของระนาบพื้นผิว ของภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของ ผลึกซีโอไลต์ เป็นแบบระนาบ	72
	ก. 3.2 ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์	73
ก. 4	กราฟการกระจายความเข้มข้นของแก๊สถูกดูดซับ และความยาวของบริเวณถ่ายเทมวล สาร	74
ก. 5	ปริมาณความร้อนของการดูดซับ	77
ข	ข้อมูลการทดลอง	78
ค	ปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์	87

ง ปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของ

ซีโอไซด์

96

ประวัติผู้เขียน 105



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

2.1	หน่วยโครงสร้างของซีโอไลต์ (1): หน่วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวง (2): หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายเหลี่ยม [ตำแหน่งมุมแทน Si หรือ Al : เส้นตรงแทน อะตอมออกซิเจน]	8
2.2	โครงผลึกซีโอไลต์ชนิด A, X และ Y	9
2.3	กราฟการกระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ ณ เวลาหนึ่ง ภายในหอดูดซับ	14
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการกระจายความเข้มข้น และเส้นโค้งไหลผ่านทะลุ	15
2.5	เส้นโค้งไหลผ่านทะลุ	17
3.1	แผนผังการจัดตั้งเครื่องมือในการศึกษาการดูดซับ โดยเทคนิคการไหลผ่านทะลุหอดูดซับแบบต่อเนื่อง	20
4.1	เส้นโค้งไหลผ่านทะลุหอดูดซับซีโอไลต์ NaX ของแก๊สอีเทนความเข้มข้นร้อยละ 12.35 โดยปริมาตร ด้วยความเร็วประมาณ 15 เซนติเมตรต่อวินาที ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	24
4.2	การเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลการดูดซับแก๊สอีเทนบนซีโอไลต์ NaX ระหว่างข้อมูลจากการทดลอง และข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง ซึ่งวัดโดยวิธีเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	25
4.3	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์	26
4.4	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยดลิช	28
4.5	ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ NaA ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (1): แก๊สมีเทน (2): แก๊สอีเทน (3): แก๊สโพรเพน	30

4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ NaX ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ
 (1): แก๊สมีเทน (2): แก๊สอีเทน (3): แก๊สโพรเพน 31

4.7 ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ NaY ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ
 (1): แก๊สมีเทน (2): แก๊สอีเทน (3): แก๊สโพรเพน 32

4.8 (1):ค่าคงที่ของฟรอยดลิตซ์ (2):ค่าคงที่ n ในแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยด
 ลิตซ์ สำหรับการดูดซับบนซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ 33

4.9 ค่าคงที่ของแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพน บนซีโอไลต์
 (1): NaA (2): NaX และ(3): NaY 35

4.10 ค่าคงที่ของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ NaA, NaX
 และ NaY (1): แก๊สมีเทน (2): แก๊สอีเทน (3): แก๊สโพรเพน 37

4.11 ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ 38

4.12 ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ 41

4.13 (1): ลักษณะการใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกันระหว่าง Si และ Al (2): ภาพจำลองการ
 จัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaA เป็นแบบระนาบ 44

4.14 ภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaX เป็นแบบระนาบ 45

4.15 ภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaY เป็นแบบระนาบ 46

4.16 ตำแหน่งการดูดซับโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน โดยไม่ซ้อนทับกัน บนภาพจำลอง
 การจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ เป็นแบบระนาบ (1): NaA (2): NaX 48

4.17 การเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ กับข้อ
 มูลจากแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ 49

4.18 (1): ขนาดภาพถ่ายแนวอนของโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ทรงกระบอก (2):
 ตำแหน่งการดูดซับโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ทรงกระบอก โดยไม่ซ้อนทับกัน
 บนภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaA 50

4.19 ตำแหน่งการดูดซับโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ทรงกระบอก โดยไม่ซ้อนทับกัน
 บนภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaX เป็นแบบระนาบ 52

4.20	ตำแหน่งการดูดซับโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ทรงกระบอก โดยไม่ซ้อนทับกัน บนภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaY เป็นแบบระนาบ	53
4.21	ค่าคงที่ของเฮนรี สำหรับการดูดซับแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพน บนซีโอไลต์ (1): NaA (2): NaX (3): NaY	55
4.22	ค่าคงที่ของเฮนรี สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ NaA, NaX และ NaY (1): แก๊สมีเทน (2): แก๊สอีเทน (3): แก๊สโพรเพน	56
4.23	กราฟการกระจายความเข้มข้นของแก๊สโพรเพนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ภายในหลอดดูดซับซึ่งบรรจุซีโอไลต์ NaY ยาว 8 เซนติเมตร ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	58
4.24	ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสารภายในหลอดดูดซับซีโอไลต์ สำหรับการดูดซับแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพน ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	59
4.25	กราฟการกระจายความเข้มข้นของแก๊สมีเทน และโพรเพนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ภายในหลอดดูดซับซึ่งบรรจุซีโอไลต์ NaY ยาว 8 เซนติเมตร ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	60
ก.1	เส้นโค้งไหลผ่านทะลุ	69
ก.2	เส้นโค้งการไหลผ่านทะลุหลอดดูดซับซีโอไลต์ NaY ของแก๊สโพรเพนความเข้มข้นประมาณ ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ด้วยความเร็วประมาณ 15 เซนติเมตรต่อวินาที ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	74
ก.3	กราฟการกระจายความเข้มข้นของแก๊สโพรเพนความเข้มข้นประมาณร้อยละ 20 โดย ปริมาตร ภายในหลอดดูดซับซีโอไลต์ NaY ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	76
ก.4	ค่าคงที่ของแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพนบนซีโอไลต์ NaX	77

สารบัญตาราง

2.1	ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ชนิด A ที่ดูดประจุลบด้วยโลหะหมู่ I และ หมู่ II	10
2.2	ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ชนิด X และชนิด Y ที่ดูดประจุลบด้วยโลหะหมู่ I และ หมู่ II	10
3.1	สูตรโมเลกุล และสัดส่วน Si/Al ของซีโอไลต์ที่ใช้ศึกษาสมดุลการดูดซับ	18
3.2	สมบัติทางกายภาพของแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพน	19
3.3	สมบัติทางกายภาพของแก๊สฮีเลียมที่อุณหภูมิ 232 องศาเซลวิน	19
3.4	ลักษณะของหอดูดซับสำหรับศึกษาสมดุลการดูดซับ	21
4.1	ลักษณะของตัวดูดซับซีโอไลต์	23
4.2	ค่าคงที่ในแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับบนซีโอไลต์	27
4.3	ค่าคงที่ในแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยดลิชสำหรับการดูดซับด้วยซีโอไลต์	29
4.4	ค่าคงที่ของฟรอยดลิช สำหรับกรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	39
4.5	ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	40
4.6	ขนาดอะตอมซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึก และขนาดโมเลกุลแก๊สถูกดูดซับ	43
4.7	พื้นที่ภาพฉายของระนาบพื้นผิว ของภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ เป็นแบบระนาบ	43
4.8	จำนวนโมเลกุลซึ่งถูกดูดซับสูงสุดบนระนาบพื้นผิวของซีโอไลต์	47
4.9	ผลการทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์	47
4.10	การเปรียบเทียบจำนวนโมเลกุลแก๊สมีเทน และโพรเพน ซึ่งถูกดูดซับสูงสุดบนภาพจำลองระนาบพื้นผิวของซีโอไลต์ กรณีพิจารณาโมเลกุลเป็นทรงกลม และทรงกระบอก	51

4.11 การเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณการดูดซับแก๊สฮีเทน และโพรเพน สูงสุด ต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ กรณีพิจารณาโมเลกุลแก๊สฮีเทน และโพรเพน เป็นทรงกลม และทรงกระบอก	51
4.12 ดัชนีการแยกแก๊สผสมสององค์ประกอบด้วยซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศา เซลเซียส	57
4.13 ปริมาณความร้อนของการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์	61
ก.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และพื้นที่ภาพฉายของอะตอม ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ ผลึกซีโอไลต์	72
ข.1 พื้นที่จากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล และความเข้มข้นของสารป้อน สำหรับการดูดซับแก๊ส มีเทนบนซีโอไลต์ NaA	78
ข.2 พื้นที่จากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล และความเข้มข้นของสารป้อน สำหรับการดูดซับแก๊ส เทนบนซีโอไลต์ NaA	79
ข.3 พื้นที่จากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล และความเข้มข้นของสารป้อน สำหรับการดูดซับแก๊ส โพรเพนบนซีโอไลต์ NaA	80
ข.4 พื้นที่จากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล และความเข้มข้นของสารป้อน สำหรับการดูดซับแก๊ส มีเทนบนซีโอไลต์ NaX	81
ข.5 พื้นที่จากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล และความเข้มข้นของสารป้อน สำหรับการดูดซับแก๊ส เทนบนซีโอไลต์ NaX	82
ข.6 พื้นที่จากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล และความเข้มข้นของสารป้อน สำหรับการดูดซับแก๊ส โพรเพนบนซีโอไลต์ NaX	83
ข.7 พื้นที่จากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล และความเข้มข้นของสารป้อน สำหรับการดูดซับแก๊ส มีเทนบนซีโอไลต์ NaY	84
ข.8 พื้นที่จากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล และความเข้มข้นของสารป้อน สำหรับการดูดซับแก๊ส เทนบนซีโอไลต์ NaY	85

ข.9 พื้นที่จากเส้นโค้งไหลผ่านทะลุ และความเข้มข้นของสารป้อน สำหรับการดูดซับแก๊ส
 โพรเพนบนซีโอไลต์ NaY 86

ค.1 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนต่อมวลของซีโอไลต์ NaA 87

ค.2 ปริมาณการดูดซับแก๊สอีเทนต่อมวลของซีโอไลต์ NaA 88

ค.3 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของซีโอไลต์ NaA 89

ค.4 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนต่อมวลของซีโอไลต์ NaX 90

ค.5 ปริมาณการดูดซับแก๊สอีเทนต่อมวลของซีโอไลต์ NaX 91

ค.6 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของซีโอไลต์ NaX 92

ค.7 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนต่อมวลของซีโอไลต์ NaY 93

ค.8 ปริมาณการดูดซับแก๊สอีเทนต่อมวลของซีโอไลต์ NaY 94

ค.9 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อมวลของซีโอไลต์ NaY 95

ง.1 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaA 96

ง.2 ปริมาณการดูดซับแก๊สอีเทนต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaA 97

ง.3 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaA 98

ง.4 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaX 99

ง.5 ปริมาณการดูดซับแก๊สอีเทนต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaX 100

ง.6 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaX 101

ง.7 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaY 102

ง.8 ปริมาณการดูดซับแก๊สอีเทนต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaY 103

ง.9 ปริมาณการดูดซับแก๊สโพรเพนต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaY 104

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัดของหลอดดูดซับ (cm^2)
A	พื้นที่ผิวต่อมวลของซีโอไลต์ (m^2/g)
c	ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ (mol/cm^3) โดยอักษรห้อย o แทน สารถูกดูดซับในวัฏภาคแก๊ส ซึ่งเข้มข้นเท่ากับที่ไหลเข้าสู่หลอดดูดซับ
K_F	ค่าคงที่ของฟรอยดลิช กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ ($\text{mmol}/\text{g} \cdot \text{kPa}^{1/n}$)
K_{FA}	ค่าคงที่ของฟรอยดลิช กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ($\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{kPa}^{1/n}$)
K_L	ค่าคงที่ของแลงเมียร์ กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ (kPa^{-1})
K_{LA}	ค่าคงที่ของแลงเมียร์ กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ (kPa^{-1})
ΔH	ปริมาณความร้อนของการดูดซับ (kJ/mol)
L	ความยาวของส่วนบรรจุซีโอไลต์ (cm)
M	สารถูกดูดซับที่สะสมในหลอดดูดซับ (mol)
N	อัตราการไหลเชิงโมล (mol/s)
N_{pt}	จำนวนข้อมูลการทดลอง
n	ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยดลิช
P_a	ความดันสัมบูรณ์ (kPa)
P	ความดันย่อย (kPa)
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตร (cm^3/s)
q	ปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ (mmol/g)
q_a	ปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ (mmol/m^2)
q_e	ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์ (mmol/g)
q_{ea}	ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ (mmol/m^2)
RMS	ค่าความคลาดเคลื่อนของรากกำลังสอง
S	ตำแหน่งตามแนวความยาวของหลอดดูดซับ (cm)
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{K}$)
t_b	เวลาที่เริ่มเคลื่อนออกจากหลอดดูดซับ (s)
t_m	เวลาเฉลี่ยที่สารถูกดูดซับอยู่ในหลอดดูดซับ (s)
t_c	เวลาที่เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (s)

w ความเร็วของการกระจายเฉลี่ย (cm/s)
 y สัดส่วนโมลของสารถูกดูดซับ

อักษรกรีก

α ดัชนีการแยก
 ϵ ความพรุนของส่วนบรรจุซีโอไลต์
 ρ_b ความหนาแน่นของซีโอไลต์ที่บรรจุแล้ว (g/cm³)
 ρ_p ความหนาแน่นของอนุภาคซีโอไลต์ (g/cm³)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย