

## บทที่ 4

# ผลและการวิเคราะห์ผล

### 4.1 ลักษณะตัวดูดซับซีโอไลต์

จากสมมูลการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ในช่วงความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 77 องศาเซลเซียส หรือวิธี BET พื้นที่ผิวของตัวดูดซับซีโอไลต์คำนวณได้จากปริมาณการดูดซับแก๊สไนโตรเจนสูงสุด โดยทราบขนาดโมเลกุลของไนโตรเจน ณ สภาวะดังกล่าว ดังสรุปในตารางที่ 4.1 เนื่องจากพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaY มีความเป็นขั้วน้อยกว่า โมเลกุลของไนโตรเจนซึ่งไม่มีขั้ว จึงถูก

ตารางที่ 4.1: ลักษณะของตัวดูดซับซีโอไลต์

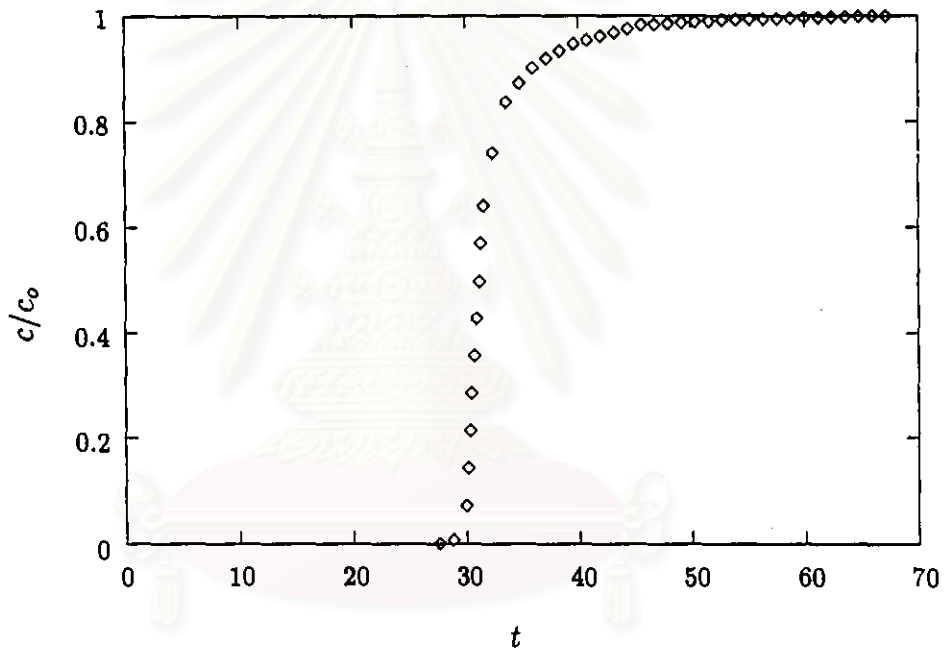
ซีโอไลต์	ปริมาณการดูดซับ ไนโตรเจนสูงสุด (mmol/g)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Å)
NaA	2.23	217.27	20.75
NaX	4.89	476.69	18.97
NaY	7.96	776.95	14.63

ดูดซับได้มากที่สุด พื้นที่ผิวต่อมวลของซีโอไลต์ NaY ซึ่งคำนวณได้ จึงมากกว่าซีโอไลต์ NaX และ NaA ตามลำดับ ในขณะที่ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของซีโอไลต์ NaY เล็กกว่าซีโอไลต์ NaX และ NaA ในทางกลับกัน

## 4.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ

### 4.2.1 การประมาณข้อมูลสมดุลการดูดซับจากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล

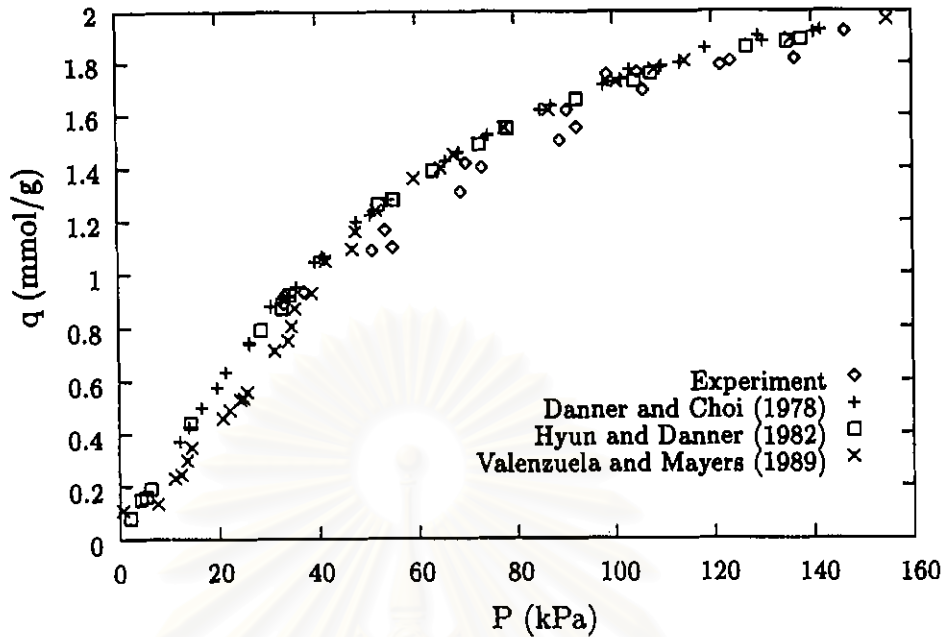
ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แก๊สฮีเทนความเข้มข้นร้อยละ 12.35 โดยปริมาตร ไหลผ่านหอดูดซับซีโอไลต์ NaX ด้วยความเร็วประมาณ 15 เซนติเมตรต่อวินาที ณ ตำแหน่งทางออกของหอดูดซับ ความเข้มข้นของแก๊สฮีเทนซึ่งไหลผ่านทะเลหอดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งเท่ากับความเข้มข้นในแก๊สผสมที่ไหลเข้าสู่หอดูดซับ ดังรูปที่ 4.1 ปริมาณการดูดซับคำนวณได้



รูปที่ 4.1: เส้นโค้งไหลผ่านทะเลหอดูดซับซีโอไลต์ NaX ของแก๊สฮีเทนความเข้มข้นร้อยละ 12.35 โดยปริมาตร ด้วยความเร็วประมาณ 15 เซนติเมตรต่อวินาที ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จาก ผลต่างระหว่างปริมาณสารทั้งหมดที่ไหลเข้า กับปริมาณสารทั้งหมดที่ไหลผ่านออกจากหอดูดซับ และปริมาณสารทั้งหมดที่สะสมในระบบ ซึ่งการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.1

ข้อมูลสมดุลการดูดซับแก๊สฮีเทนบนซีโอไลต์ NaX ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งประมาณจากเส้นโค้งไหลผ่านทะเล แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลสมดุล ซึ่งวัดได้โดยวิธีเชิงปริมาตร ณ สภาวะอุณหภูมิเดียวกันจากแหล่งข้อมูลที่สืบค้นได้ [14, 15, 16] ดังรูปที่ 4.2 เนื่องจาก ซีโอไลต์ NaX ซึ่งใช้ศึกษาสมดุลการดูดซับ มีพื้นที่ผิวประมาณ 476.69 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ชนิดเดียวกันจากแหล่งผลิตอื่น ซึ่ง Danner และ Choi (1974);

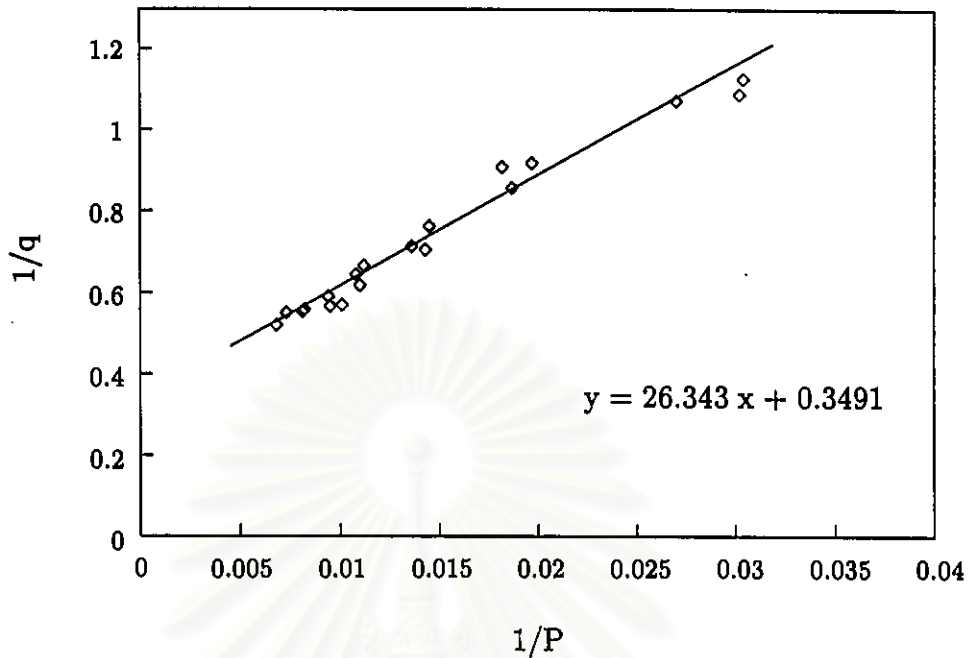


รูปที่ 4.2: การเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลการดูดซับแก๊สอีเทนบนซีโอไลต์ NaX ระหว่างข้อมูลจากการทดลอง และข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง ซึ่งวัดโดยวิธีเชิงปริมาตร ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Hyun และ Danner (1982a) ใช้ศึกษาสมดุลการดูดซับ โดยมีพื้นที่ผิวประมาณ 525 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้น ข้อมูลสมดุลการดูดซับซึ่งวัดได้จึงมีแนวโน้มที่น้อยกว่า ในขณะที่ ซีโอไลต์ชนิดเดียวกัน ซึ่ง Valenzuela และ Mayers (1989) ใช้ศึกษาสมดุลการดูดซับ แม้เป็นซีโอไลต์จากแหล่งผลิตเดียวกัน แต่เนื่องจากผลิตในเวลาต่างกัน จึงเป็นไปได้ที่ซีโอไลต์นั้น อาจมีคุณสมบัติการดูดซับต่างกัน อย่างไรก็ตาม ข้อมูลสมดุลการดูดซับซึ่งวัดได้ แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลซึ่งวัดได้โดยวิธีเชิงปริมาตร ดังนั้น จึงอาจอนุมานได้ว่า ปริมาณแก๊สอีเทนซึ่งถูกดูดซับไว้ สมดุลกับความเข้มข้นของอีเทนใน ภูมิภาคแก๊ส ซึ่งมีค่าเท่ากับความเข้มข้นที่ไหลเข้าสู่หอดูดซับ ในทำนองเดียวกัน จึงอาจวัดข้อมูลสมดุลการดูดซับแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพน บนซีโอไลต์ NaA, NaX และ NaY ซึ่งแสดงดังตารางใน ภาคผนวก ค. โดยสมดุลการดูดซับมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง

#### 4.2.2 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรอยดลิช

จากข้อมูลสมดุลการดูดซับซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง อาจประมวลเป็นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างส่วนกลับของปริมาณการดูดซับ และความดันย่อยของแก๊สที่ถูกดูดซับ ของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งสามารถเขียนได้



รูปที่ 4.3: ความสัมพันธ์เชิงเส้นของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์

ดังนี้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_s} + \frac{1}{K_L q_s} \left( \frac{1}{P} \right) \quad (4.1)$$

จากข้อมูลสมดุลการดูดซับแก๊สอีเทนบนซีโอไลต์ NaX ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์ ( $q_s$ ) และค่าคงที่สมดุลของแลงเมียร์ ( $K_L$ ) คำนวณจากจุดตัดแกนตั้ง และความชันของกราฟ ตามลำดับ สำหรับการดูดซับแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพน บนซีโอไลต์ ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์ และค่าคงที่ของแลงเมียร์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

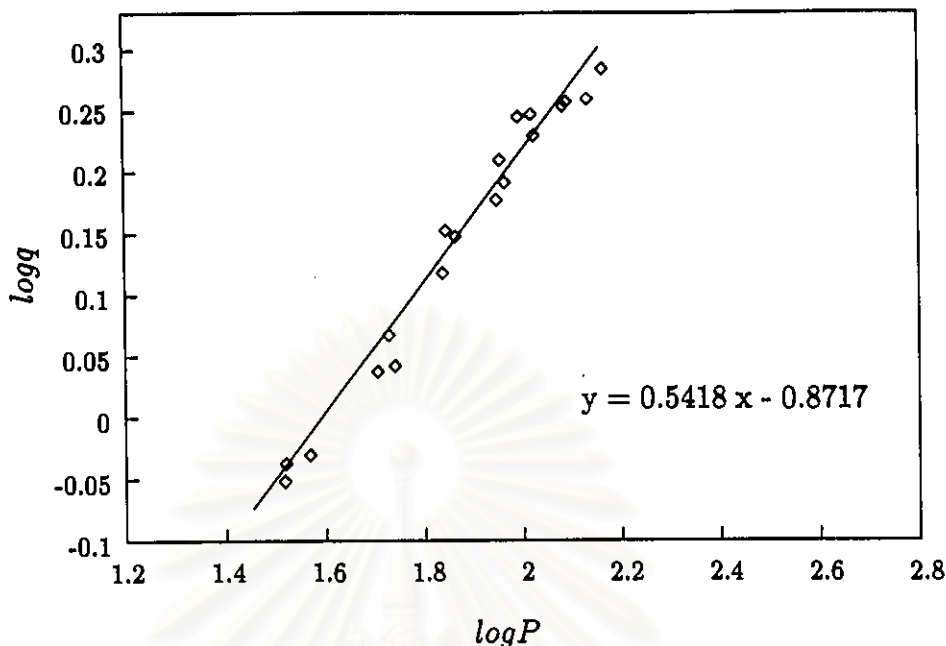
นอกจากนี้ สมดุลการดูดซับซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง อาจประมวลเป็นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยดลิตซ์ โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าลอกกาลิทึมของปริมาณการดูดซับ และความดันย่อยของแก๊สถูกดูดซับ ของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยดลิตซ์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\log q = \log K_F + \frac{1}{n} \log P \quad (4.2)$$

จากข้อมูลสมดุลการดูดซับแก๊สอีเทนบนซีโอไลต์ NaX ณ สภาวะอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ค่าคงที่ของฟรอยดลิตซ์ ( $K_F$ ) และค่าคงที่  $n$

ตารางที่ 4.2: ค่าคงที่ในแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับบนซีโอไลต์

ซีโอไลต์	แก๊ส	T (°C)	$K_L \times 10^3$ (kPa <sup>-1</sup> )	$q_r$ (mmol/g)	% RMS
NaA	มีเทน	35	0.0522	3.6684	5.45
		50	0.0503	3.3944	5.69
		75	0.0470	3.1260	6.22
		100	0.0454	2.8910	7.42
	อีเทน	35	1.2176	1.5825	2.29
		50	0.9695	1.4830	0.89
		75	0.6870	1.3914	2.71
		100	0.3789	1.2918	2.95
	โพรเพน	35	2.5866	1.1422	2.55
		50	1.3974	1.0648	3.49
		75	1.1078	0.9289	5.50
		100	0.6174	0.7979	4.22
NaX	มีเทน	35	0.0791	4.9188	5.66
		50	0.0759	4.2937	3.33
		75	0.0720	3.8388	6.95
		100	0.0596	3.6900	7.87
	อีเทน	35	1.6479	3.1368	1.96
		50	1.3252	2.8645	2.55
		75	0.9652	2.6089	2.13
		100	0.4125	2.5278	2.04
	โพรเพน	35	4.2903	2.2599	2.54
		50	2.9614	2.0842	3.12
		75	1.4139	1.9113	4.23
		100	0.8097	1.7612	6.07
NaY	มีเทน	35	0.2639	5.3591	8.53
		50	0.1968	4.8567	6.66
		75	0.1319	4.2373	9.56
		100	0.0869	3.8971	6.19
	อีเทน	35	2.9674	3.6470	3.12
		50	2.0842	3.2227	1.60
		75	1.0869	3.0798	3.01
		100	0.6319	2.8375	4.07
	โพรเพน	35	9.5432	2.8241	2.42
		50	5.6246	2.4789	2.84
		75	2.3359	2.3535	3.71
		100	1.0282	2.2609	4.21



รูปที่ 4.4: ความสัมพันธ์เชิงเส้นของแบบจำลองสมดุลการดูดซับของพรอยดลิว

คำนวณจากจุดตัดแกนตั้ง และความชันของกราฟ ตามลำดับ สำหรับการดูดซับแก๊สมีเทน อีเทน และ โพรเพน บนซีโอไลต์ ค่าคงที่ของพรอยดลิว และค่าคงที่  $n$  แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

สำหรับความสอดคล้องของข้อมูลสมดุลจากการทดลอง กับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของ แลงเมียร์ และพรอยดลิว พิจารณาได้จาก ค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนของรากกำลังสอง (normalized root mean square, % RMS) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 4.3 [40]

$$\% RMS = \sqrt{\frac{1}{N_{pt}} \sum_{i=1}^{N_{pt}} \left( \frac{q_{exp} - q_{cal}}{q_{exp}} \right)^2} \times 100 \quad (4.3)$$

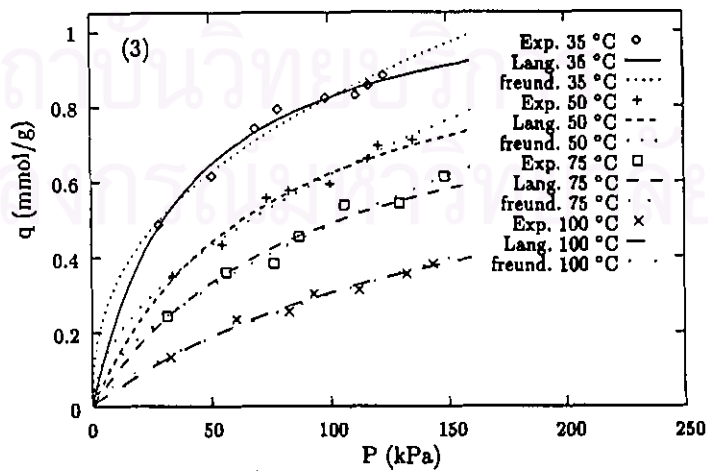
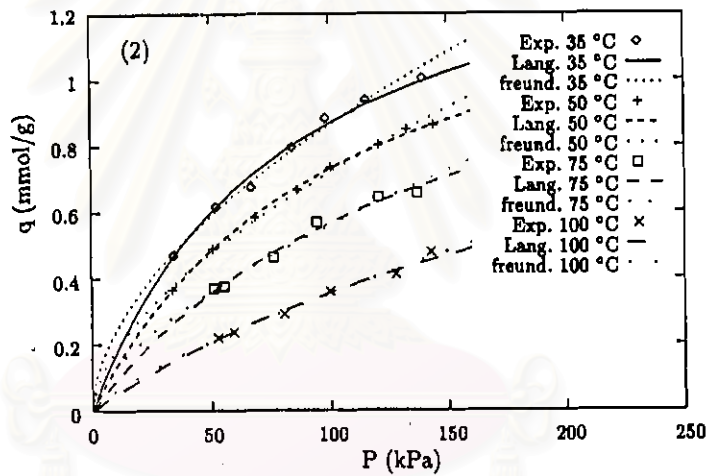
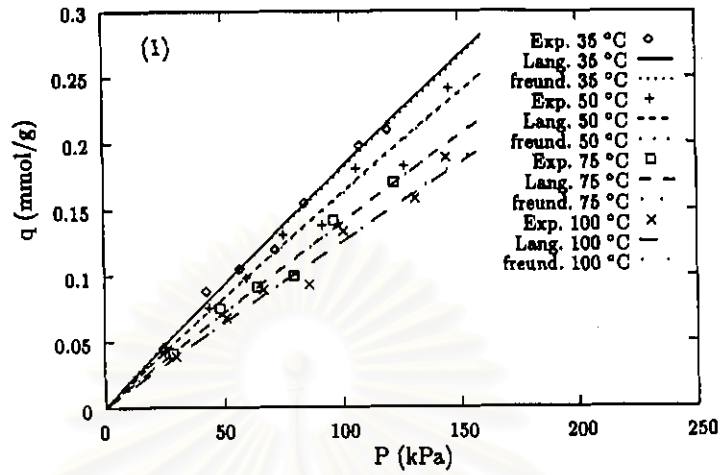
ดังสรุปในตารางที่ 4.2 และ 4.3 โดยค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนของรากกำลังสอง สำหรับการประมวลข้อมูลสมดุลการดูดซับเป็นแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ และพรอยดลิว ไม่เกิน ร้อยละ 9.0 จึงอาจกล่าวได้ว่า ข้อมูลสมดุลการดูดซับในช่วงความดันย่อยที่ศึกษา สอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ และพรอยดลิว

สำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลการดูดซับจากการทดลอง กับไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ และพรอยดลิว แสดงได้ดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ซึ่งอาจสังเกตได้ว่า ไอโซเทิร์มการดูดซับทั้งสองชนิด ในช่วงความดันย่อยต่ำกว่า หรือสูงกว่าความดันย่อยที่ศึกษา มีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลอง ซึ่งไม่สามารถศึกษาสมดุลการดูดซับในช่วงความดันย่อยต่ำกว่า หรือสูง

ตารางที่ 4.3: ค่าคงที่ในแบบจำลองสมดุลการดูดซับของพรอยดลิสสำหรับการดูดซับด้วยซีโอไลต์

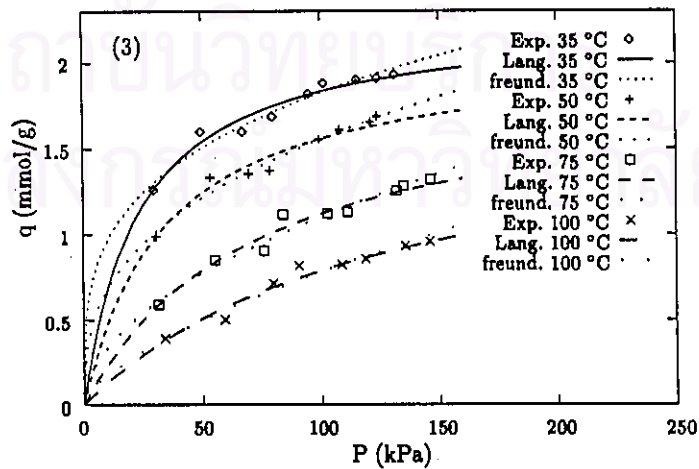
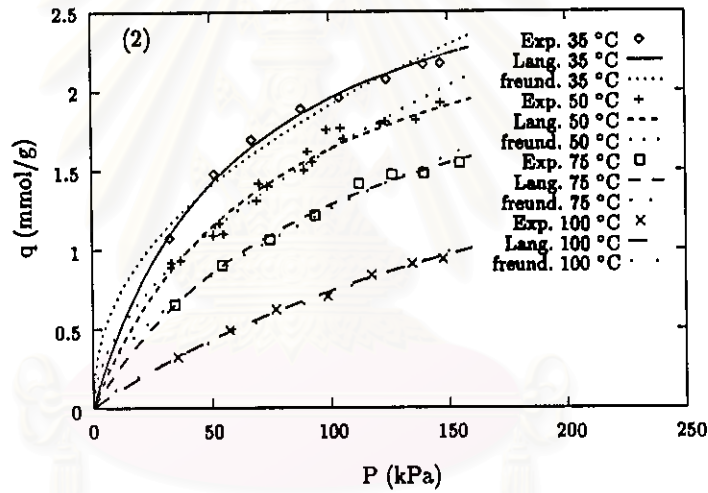
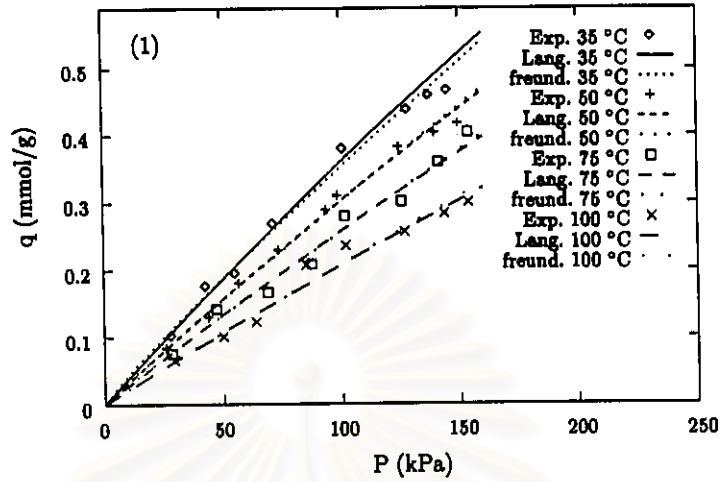
ซีโอไลต์	แก๊ส	T (°C)	$K_F \times 10^2$ (mmol/g.kPa <sup>1/n</sup> )	n	% RMS
NaA	มีเทน	35	0.2274	1.0539	5.36
		50	0.1983	1.0471	5.65
		75	0.1667	1.0397	6.18
		100	0.1428	1.0286	7.36
	อีเทน	35	6.7936	1.8109	2.33
		50	4.6935	1.6875	2.00
		75	2.9957	1.5726	3.07
		100	1.0304	1.3038	2.40
	โพรเพน	35	13.1250	2.5088	3.13
		50	5.5667	1.9146	3.23
		75	3.2048	1.6961	4.61
		100	1.2948	1.4663	4.99
NaX	มีเทน	35	0.5377	1.1008	5.59
		50	0.3826	1.0544	3.64
		75	0.3241	1.0531	6.81
		100	0.2438	1.0353	7.99
	อีเทน	35	24.5245	2.2442	4.37
		50	13.4369	1.8457	3.56
		75	8.5822	1.7167	3.15
		100	2.2620	1.3277	3.02
	โพรเพน	35	51.0975	3.6179	2.77
		50	29.8195	2.7871	2.94
		75	10.5172	1.9600	4.33
		100	3.9939	1.5499	5.97
NaY	มีเทน	35	2.6170	1.2338	9.05
		50	1.5772	1.1804	6.95
		75	0.7670	1.1078	9.40
		100	0.4011	1.0582	6.18
	อีเทน	35	58.3983	3.0166	5.38
		50	31.8420	2.4155	4.07
		75	10.7795	1.7218	3.85
		100	4.6559	1.4588	2.77
	โพรเพน	35	120.5591	6.1350	1.92
		50	71.6473	4.2937	2.26
		75	27.3527	2.5853	5.23
		100	7.7696	1.7227	4.89



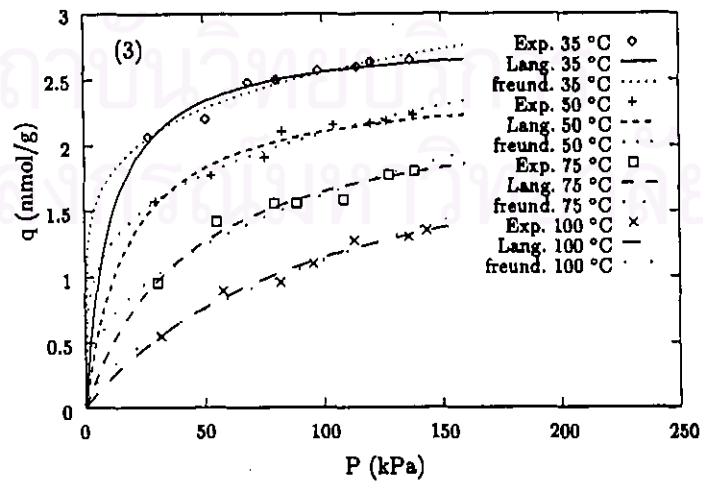
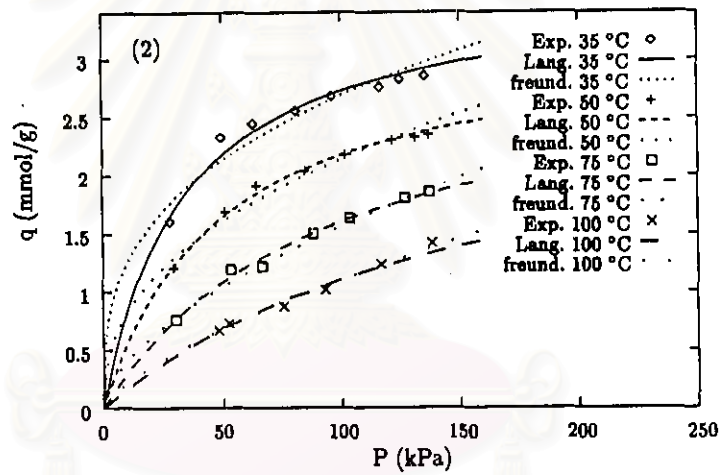
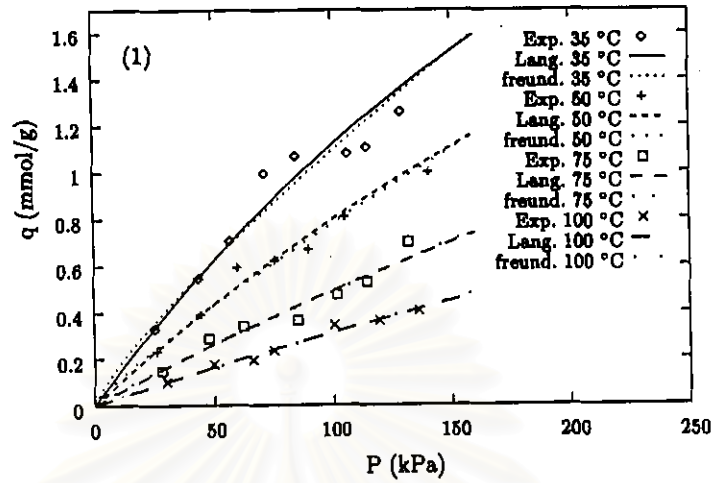


รูปที่ 4.5: ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ NaA ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (1): แก๊สมีเทน (2): แก๊สอีเทน (3): แก๊สโพรเพน





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



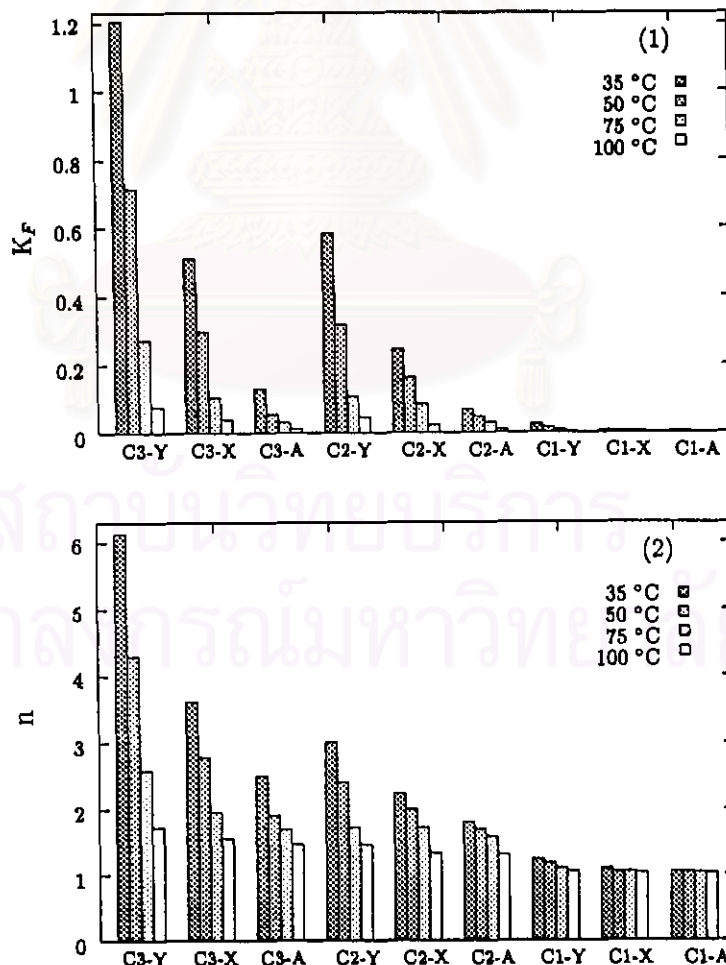
รูปที่ 4.7: ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ NaY ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ (1): แก๊สมีเทน (2): แก๊สอีเทน (3): แก๊สโพรเพน

กว่าได้ จึงเป็นการยากสำหรับการพิจารณาว่า ข้อมูลสมมูลการดูดซับ สอดคล้องกับแบบจำลองสมมูล การดูดซับใดมากกว่า

อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง สารถูกดูดซับมักมีพฤติกรรมคล้ายกับแก๊สอุดมคติ แม้ สารถูกดูดซับดังกล่าวมีความเข้มข้นค่อนข้างสูง ดังนั้น ไอโซเทิร์มการดูดซับ ณ สภาวะอุณหภูมิสูง จึงมีแนวโน้มเข้าใกล้ไอโซเทิร์มเชิงเส้น หรือสอดคล้องกับแบบจำลองสมมูลการดูดซับของเฮนรี ซึ่ง สังเกตได้ดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7

#### 4.2.3 การอธิบายสมมูลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมมูลการดูดซับของฟรอยดลิตซ์

สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ แนวโน้มของค่าคงที่ของฟรอยดลิตซ์ และค่า คงที่  $n$  แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งการดูดซับบนซีโอไลต์ชนิดเดียวกัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด



รูปที่ 4.8: (1):ค่าคงที่ของฟรอยดลิตซ์ (2):ค่าคงที่  $n$  ในแบบจำลองสมมูลการดูดซับของฟรอยดลิตซ์ สำหรับการดูดซับบนซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

ค่าคงที่ของพรอยดลิจ และค่าคงที่  $n$  สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพน มากกว่าการดูดซับแก๊สฮีเทน และมีเทน ตามลำดับ ในขณะที่ การดูดซับแก๊สชนิดเดียวกัน ค่าคงที่ทั้งสองชนิดสำหรับการดูดซับบนซีโอไลต์ NaY มากกว่าการดูดซับบนซีโอไลต์ NaX และ NaA ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อสภาวะอุณหภูมิลดลง ค่าคงที่ทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

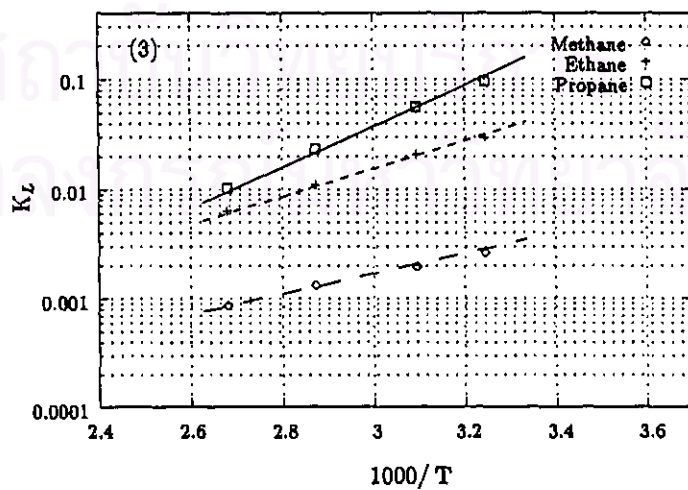
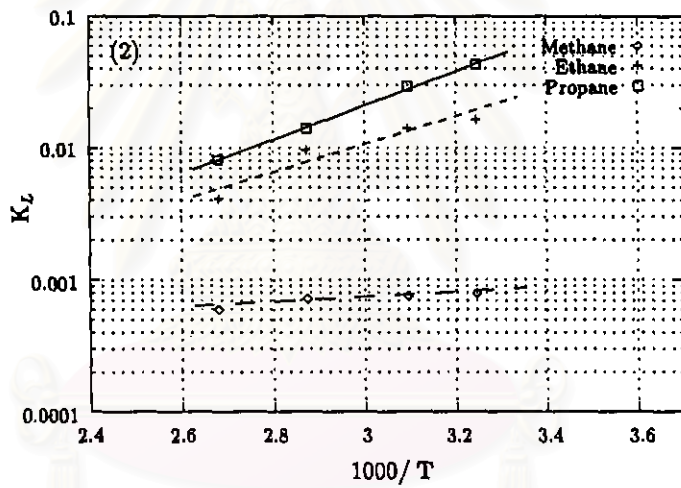
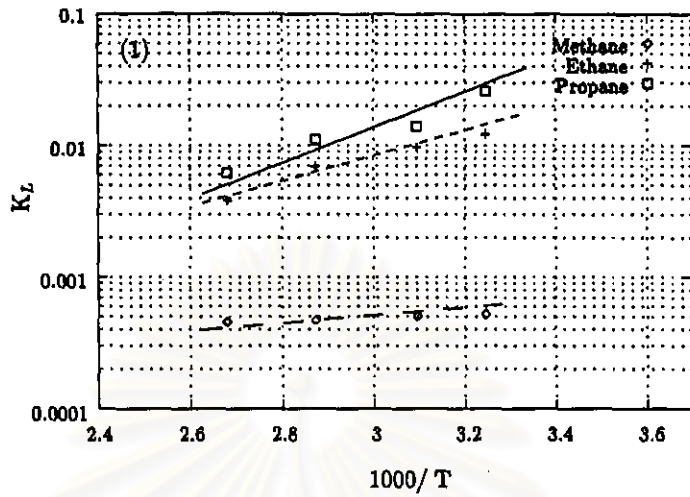
อย่างไรก็ตาม กรณีค่าคงที่ของพรอยดลิจมีค่ามาก ไอโซเทิร์มการดูดซับมักมีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากไอโซเทิร์มเชิงเส้น เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของค่าคงที่ของพรอยดลิจ จึงอาจกล่าวได้ว่า ณ สภาวะอุณหภูมิต่ำ หรือแก๊สไฮโดรคาร์บอนซึ่งถูกดูดซับมีมวลโมเลกุลมาก ไอโซเทิร์มการดูดซับมีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากไอโซเทิร์มเชิงเส้นมากกว่าการดูดซับ ณ สภาวะอุณหภูมิสูง หรือแก๊สไฮโดรคาร์บอนซึ่งถูกดูดซับมีมวลโมเลกุลน้อย โดยเฉพาะการดูดซับแก๊สมีเทน ไอโซเทิร์มการดูดซับมีแนวโน้มเข้าใกล้ไอโซเทิร์มเชิงเส้นมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 สำหรับการดูดซับแก๊สชนิดเดียวกัน ไอโซเทิร์มการดูดซับบนซีโอไลต์ NaY มีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากไอโซเทิร์มเชิงเส้นมากกว่าไอโซเทิร์มการดูดซับบนซีโอไลต์ NaX และซีโอไลต์ NaA ตามลำดับ

นอกจากนี้ มีผู้วิจัยเสนอแนวความคิดว่า ค่าคงที่  $n$  อาจแทนจำนวนตำแหน่งเฉพาะในการดูดซับแก๊สถูกดูดซับหนึ่งโมเลกุล อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโมเลกุลของโพรเพนมีขนาดใหญ่ จำนวนตำแหน่งเฉพาะสำหรับการดูดซับโพรเพนหนึ่งโมเลกุลจึงมากกว่า การดูดซับโมเลกุลของฮีเทน และมีเทน ตามลำดับ

#### 4.2.4 การอธิบายสมดุลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ค่าคงที่ของแลงเมียร์

- ผลกระทบของชนิดแก๊สไฮโดรคาร์บอน ต่อค่าคงที่ของแลงเมียร์

สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ชนิดเดียวกัน ค่าคงที่ของแลงเมียร์ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ โดยสอดคล้องกับสมการของแวนต์ฮอฟฟ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ณ สภาวะอุณหภูมิต่ำ กำหนด ค่าคงที่ของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพน มากกว่าการดูดซับแก๊สฮีเทน และมีเทน ตามลำดับ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อสภาวะอุณหภูมิลดลง อย่างไรก็ตาม กรณีค่าคงที่ของแลงเมียร์มีค่ามาก ไอโซเทิร์มการดูดซับมักมีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากไอโซเทิร์มเชิงเส้น เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของค่าคงที่ของแลงเมียร์ จึงอาจกล่าวได้ว่า ณ สภาวะอุณหภูมิต่ำ หรือแก๊สไฮโดรคาร์บอน



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

ซึ่งถูกดูดซับมีมวลโมเลกุลมาก ไอโซเทิร์มการดูดซับมีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากไอโซเทิร์มเชิงเส้นมากกว่าการดูดซับ ณ สภาวะอุณหภูมิสูง หรือแก๊สไฮโดรคาร์บอนซึ่งถูกดูดซับมีมวลโมเลกุลน้อย เช่นเดียวกับไอโซเทิร์มของฟรอยดลิตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7

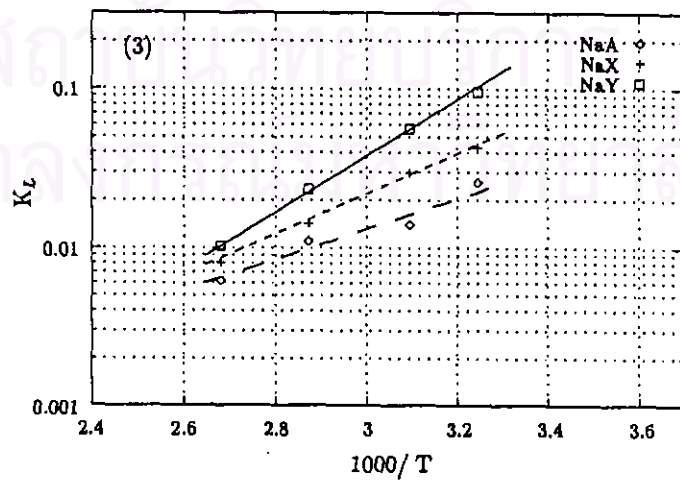
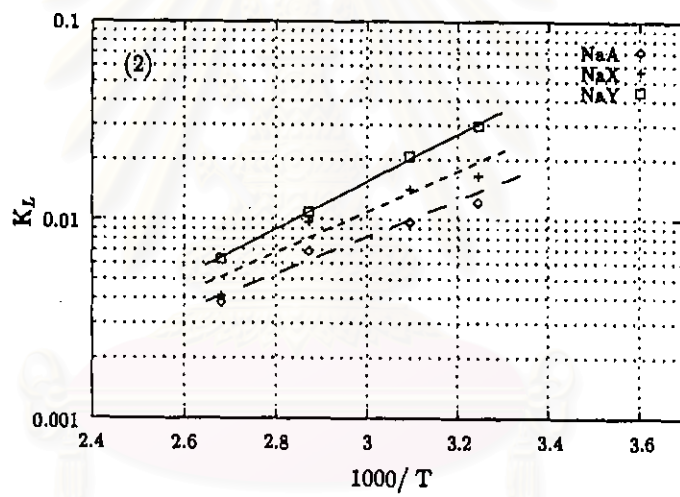
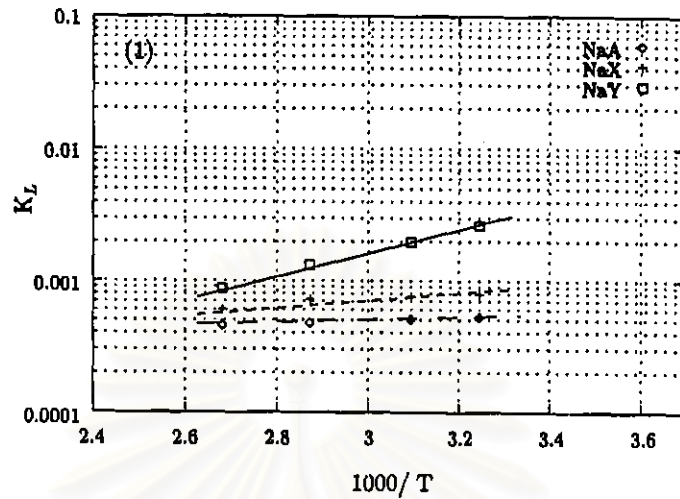
อย่างไรก็ตาม การประเมินความสามารถในการดูดซับ อาจพิจารณาจากลักษณะไอโซเทิร์มนั้นคือ กรณีความสามารถในการดูดซับสูง ไอโซเทิร์มการดูดซับมักมีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากไอโซเทิร์มเชิงเส้น หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์มักมีค่ามาก ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมระหว่างโมเลกุลแก๊สถูกดูดซับ และพื้นผิวตัวดูดซับ ต่อความสามารถของโมเลกุลในการเกาะติดบนพื้นผิวตัวดูดซับ [12] สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวซีโอไลต์ที่มีสัดส่วน Si/Al น้อยกว่า 8-10 นอกจากแรงดึงดูดระหว่างมวล การดูดซับเกิดขึ้นด้วยอิทธิพลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ เนื่องจากประจุลบของอะตอมออกซิเจน-เนียม นั่นคือ ความเป็นขั้วของพื้นผิว สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดความเป็นขั้วบนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติการถูกเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของสารประกอบนั้นๆ [31, 32] เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สโพรเพน มีคุณสมบัติดังกล่าวมากกว่าโมเลกุลของแก๊สอีเทน และมีเทน ดังตารางที่ 3.2 จึงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความเป็นขั้ว และเกิดการดูดซับเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิตย์บนพื้นผิวซีโอไลต์ชนิดเดียวกัน ได้ดีกว่าโมเลกุลของแก๊สอีเทน และมีเทน ตามลำดับ

- ผลกระทบของชนิดซีโอไลต์ ต่อค่าคงที่ของแลงเมียร์

สำหรับการดูดซับแก๊สชนิดเดียวกัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด ค่าคงที่ของแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับบนซีโอไลต์ NaY มากกว่าการดูดซับบนซีโอไลต์ NaX และ NaA ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 นั่นคือ ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สชนิดเดียวกันบนซีโอไลต์ NaY มีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากไอโซเทิร์มเชิงเส้นมากกว่า หรือซีโอไลต์ NaY สามารถดูดซับได้ดีกว่าซีโอไลต์ NaX และ NaA เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่า ตลอดจนพื้นผิวมีความเป็นขั้วน้อยกว่า จึงดูดซับโมเลกุลแก๊สไฮโดรคาร์บอนซึ่งไม่มีขั้ว ได้ดีกว่าการดูดซับบนซีโอไลต์ NaX และ NaA ตามลำดับ

ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์

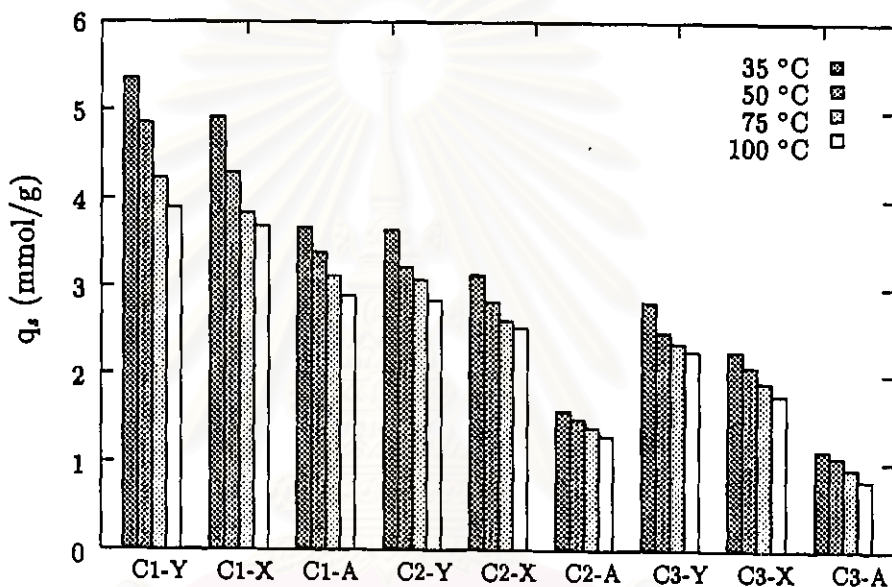
- ผลกระทบของชนิดแก๊สไฮโดรคาร์บอน ต่อปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์



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



สำหรับการประเมินความสามารถโดยรวมของการดูดซับ อาจพิจารณาจากปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีเทนมียขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า การดูดซับโมเลกุลของมีเทนจึงครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่าการดูดซับโมเลกุลของอีเทน และโพรเพน ดังนั้น ปริมาณแก๊สมิเทนซึ่งถูกดูดซับสูงสุด บนพื้นที่ในหนึ่งหน่วยมวลของซีโอไลต์ชนิดเดียวกัน จึงมากกว่าการดูดซับแก๊สอีเทน และโพรเพน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11: ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

• ผลกระทบของชนิดซีโอไลต์ ต่อปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์

สำหรับการดูดซับแก๊สชนิดเดียวกัน ณ สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อมวลของซีโอไลต์ ขึ้นกับพื้นที่ผิวของซีโอไลต์แต่ละชนิด อย่างไรก็ตาม ซีโอไลต์ NaY มีพื้นที่ผิวมากกว่า โมเลกุลของแก๊สแต่ละชนิดจึงมีโอกาสถูกดูดซับได้มากกว่า เมื่อเทียบกับการดูดซับบนซีโอไลต์ NaX และ NaA ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11

#### 4.3 ข้อมูลสมดุลการดูดซับ กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์

ข้อมูลสมดุลการดูดซับ อาจพิจารณาเป็นปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ สัดส่วนของปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ ต่อพื้นที่ผิวต่อมวลของซีโอไลต์ชนิดที่ใช้

เป็นตัวดูดซับ สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ ข้อมูลสมดุลการดูดซับแสดงปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ แสดงดังตารางในภาคผนวก ง. ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเช่นเดียวกับข้อมูลสมดุลการดูดซับ กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์

#### 4.3.1 การอธิบายสมดุลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยดลิช

จากแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอยดลิช ดังสมการที่ 2.5 เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ โดยการหารสมการดังกล่าวด้วยพื้นที่ผิวต่อมวลของซีโอไลต์ชนิดที่ใช้เป็นตัวดูดซับ ค่าคงที่ของฟรอยดลิช สำหรับกรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ( $K_{FA}$ ) จึงมีค่าเท่ากับ สัดส่วนของค่าคงที่ของฟรอยดลิช กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ ( $K_F$ ) ต่อพื้นที่ผิวต่อมวลของซีโอไลต์ชนิดที่ใช้เป็นตัวดูดซับ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งมีแนวโน้ม และอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ ในขณะที่ค่าคงที่  $n$  มีค่าเท่ากับกรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4: ค่าคงที่ของฟรอยดลิช สำหรับกรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

ซีโอไลต์	T (°C)	$K_{FA} \times 10^5$ (mmol/m <sup>2</sup> · kPa <sup>1/n</sup> )		
		มีเทน	อีเทน	โพรเพน
NaA	35	1.0466	31.2682	60.4091
	50	0.9127	21.6023	25.6213
	75	0.7673	13.7880	14.7504
	100	0.6573	4.7425	5.9594
NaX	35	1.1280	51.4472	107.1917
	50	0.8026	28.1878	62.5549
	75	0.6799	18.0036	22.0628
	100	0.5114	4.7452	8.3784
NaY	35	3.3683	75.1639	155.1705
	50	2.0300	40.9835	92.2166
	75	0.9872	13.8742	35.2054
	100	0.5163	5.9926	10.0002

#### 4.3.2 การอธิบายสมดุลการดูดซับด้วยแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์

เนื่องจากปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ มีค่าเท่ากับสัดส่วนของปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ ต่อพื้นที่ผิวต่อมวลของซีโอไลต์ชนิดที่ใช้เป็นตัวดูดซับ แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ กรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ จึงมีความสัมพันธ์กับกรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ ซึ่งพบว่า แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ทั้งสองกรณี มีค่าคงที่ของแลงเมียร์เท่ากัน ดังแสดงในภาคผนวก ก.2

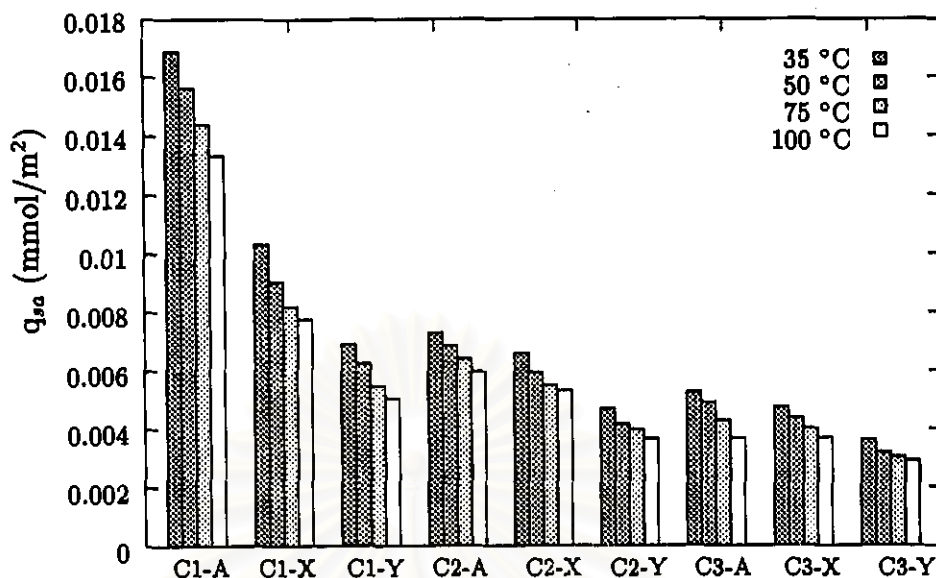
ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์

- ผลกระทบของชนิดแก๊สไฮโดรคาร์บอน ต่อปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์

สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ แสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับ กรณีพิจารณาจากปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ ดังรูปที่ 4.12 เนื่องจากมีเทนมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า การดูดซับโมเลกุลของมีเทนจึงครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่าการดูดซับโมเลกุลของอีเทน และโพรเพน ดังนั้น ปริมาณแก๊สมิเทนซึ่งถูกดูดซับสูงสุดบนหนึ่งหน่วยพื้นที่ของซีโอไลต์ชนิดเดียวกัน จึงมากกว่าการดูดซับแก๊สอีเทน และ

ตารางที่ 4.5: ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ

ซีโอไลต์	T (°C)	$q_{sa} \times 10^2$ (mmol / m <sup>2</sup> )		
		มีเทน	อีเทน	โพรเพน
NaA	35	1.6884	0.7284	0.5257
	50	1.5623	0.6862	0.4901
	75	1.4388	0.6404	0.4275
	100	1.3306	0.5946	0.3672
NaX	35	1.0319	0.6580	0.4741
	50	0.9007	0.6009	0.4372
	75	0.8053	0.5473	0.4010
	100	0.7741	0.5303	0.3695
NaY	35	0.6898	0.4694	0.3635
	50	0.6251	0.4148	0.3191
	75	0.5454	0.3964	0.3029
	100	0.5016	0.3652	0.2910



รูปที่ 4.12: ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

โพรเพน ตามลำดับ

• ผลกระทบของชนิดซีโอไลต์ ต่อปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์

ดังที่ได้กล่าวข้างต้น การดูดซับบนพื้นผิวซีโอไลต์ เกิดขึ้นด้วยอิทธิพลของแรงดึงดูดเนื่องจากไฟฟ้าสถิตยบนพื้นผิว ซึ่ง Barthomeuf (1992) [34] พบว่า การดูดซับสารประกอบไม่มีขั้วเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งประจุไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากอะตอมอลูมิเนียม ดังนั้น ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ จึงขึ้นกับความถี่ของตำแหน่งประจุลบบนพื้นผิวของซีโอไลต์ ซึ่งพิจารณาจากสัดส่วน Si/Al ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึก อย่างไรก็ตาม ความถี่ของตำแหน่งประจุลบบนพื้นผิวของซีโอไลต์ NaA มีมากกว่า โอกาสในการดูดซับโมเลกุลของแก๊สชนิดเดียวกัน บนหนึ่งหน่วยพื้นที่ของซีโอไลต์ NaA จึงมากกว่าซีโอไลต์ NaX และ NaY ตามลำดับ นั่นคือ ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ NaA มากกว่าซีโอไลต์ NaX และ NaY ดังรูปที่ 4.12 หรืออาจกล่าวได้ว่า ซีโอไลต์ NaA สามารถใช้ประโยชน์ของพื้นผิวในการดูดซับ ได้ดีกว่าซีโอไลต์ NaX และ NaY ตามลำดับ

#### 4.3.3 การทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ จากภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ เป็นแบบระนาบ

โดยทั่วไป พื้นผิวภายนอก และพื้นผิวภายในของผลึกซีโอไลต์มีความคล้ายคลึงกัน ถ้ากำหนดให้แต่ละด้านของผลึก ซึ่งไม่ต่างกัน ต่อเรียงกัน จะเกิดลักษณะที่เหมือนกับระนาบ ซึ่งเกิดจากผลึกจำนวนเท่ากับจำนวนด้านของผลึกต่อเรียงกัน และเนื่องจากการดูดซับโมเลกุลของสาร เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งประจุลบ ซึ่งเกิดจากอะตอมออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบของผลึก ดังที่ได้กล่าวข้างต้น จึงเกิดแนวความคิดสำหรับการทำนายผล ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ จากภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึก เป็นแบบระนาบ ซึ่งเหมือนพื้นผิวภายนอกแต่ละด้านของผลึกต่อเรียงกันเป็นระนาบ หรือระนาบซึ่งเกิดจากผลึกต่อเรียงกันดังกล่าวข้างต้น อย่างไรก็ตาม เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิว จากแบบจำลองสมดุผลการดูดซับของแลงเมียร์ ภาพจำลองสำหรับทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุด จึงตั้งอยู่บนสมมติฐานที่คล้ายกับแบบจำลองสมดุผลการดูดซับของแลงเมียร์ ดังนี้

1. อะตอมซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึก จัดเรียงต่อกันอย่างสม่ำเสมอเป็นระนาบ โดย Si และ Al เรียงต่อกันโดยใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกัน
2. ประจุลบซึ่งเกิดจากอะตอมออกซิเจน ปรากฏ ณ ตำแหน่งอะตอมออกซิเจน เนื่องจากมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) มากกว่าอะตอมออกซิเจน 2.3 เท่า [41]
3. โมเลกุลของแก๊สถูกดูดซับเป็นทรงกลม และถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งออกซิเจนประจุลบ โดยจุดศูนย์กลางอยู่ตรงกัน
4. ประจุไฟฟ้าแต่ละตำแหน่ง ดูดซับโมเลกุลของแก๊สหนึ่งโมเลกุล
5. ทุกตำแหน่งประจุไฟฟ้า มีโอกาสในการดูดซับโมเลกุลเท่ากัน
6. โมเลกุลของแก๊สซึ่งถูกดูดซับ เกาะบนพื้นผิวซีโอไลต์เท่านั้น หรือเรียงตัวบนพื้นผิวเพียงชั้นเดียวโดยไม่เกิดการซ้อนทับกัน
7. แต่ละโมเลกุลซึ่งถูกดูดซับ ไม่มีผลกระทบต่อารดูดซับของโมเลกุลอื่น

ดังนั้น ภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมในสูตรโมเลกุลของผลึกซีโอไลต์ NaA, NaX และ NaY เป็นแบบระนาบ และระยะระหว่างออกซิเจนประจุลบ ซึ่งพิจารณาจากขนาดอะตอม แสดงดังรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 โดยขนาดอะตอมซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึก และขนาดโมเลกุลแก๊สถูกดูดซับ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6: ขนาดอะตอมซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึก และขนาดโมเลกุลแก๊สถูกดูดซับ

อะตอม/ โมเลกุล	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Å)
Si	0.82
Al	1.00
O	1.74
มีเทน	3.82
อีเทน	4.42
โพรเพน	5.06

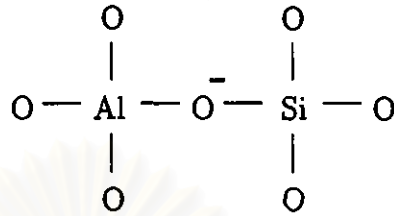
สำหรับพื้นที่ในการดูดซับ เพื่อให้ง่ายสำหรับการพิจารณาการดูดซับ จึงกำหนดเป็นพื้นที่ภาพฉาย (projected area) ของระนาบพื้นผิวของภาพจำลอง ซึ่งพิจารณาจากขนาด และจำนวนอะตอมซึ่งเป็นองค์ประกอบของผลึก ดังตารางที่ 4.7 สำหรับการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.3

ตารางที่ 4.7: พื้นที่ภาพฉายของระนาบพื้นผิว ของภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์เป็นแบบระนาบ

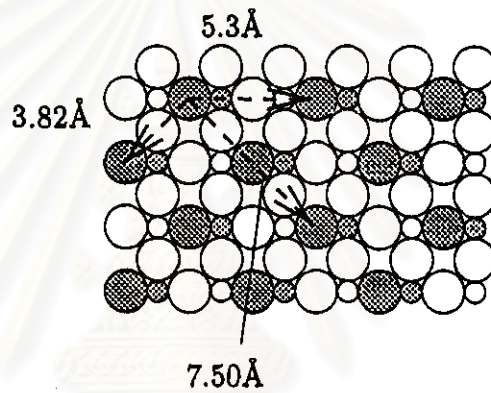
ซีโอไลต์	พื้นที่ (m <sup>2</sup> )
NaA	$1.204 \times 10^{-18}$
NaX	$1.034 \times 10^{-17}$
NaY	$1.027 \times 10^{-17}$

จากสมมติฐานที่ว่า โมเลกุลของแก๊สซึ่งถูกดูดซับเป็นทรงกลม การดูดซับเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งออกซิเจนประจุลบ โดยจุดศูนย์กลางของโมเลกุลตรงกับจุดศูนย์กลางของออกซิเจนประจุลบ และเรียงตัวบนพื้นผิวเพียงชั้นเดียวโดยไม่ซ้อนทับกัน จึงอาจพิจารณาจำนวนโมเลกุลซึ่งถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นที่ภาพฉายของภาพจำลอง จากขนาด และรูปร่างของโมเลกุลแก๊สแต่ละชนิด ซึ่งสัมพันธ์กับระยะระหว่างออกซิเจนประจุลบ ซึ่งเป็นตำแหน่งในการดูดซับ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโมเลกุลของมีเทนมีขนาดเล็ก จึงถูกดูดซับบนออกซิเจนประจุลบทุกตำแหน่งบนระนาบพื้นผิวของซีโอไลต์ทั้งสาม

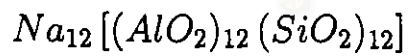








(1)



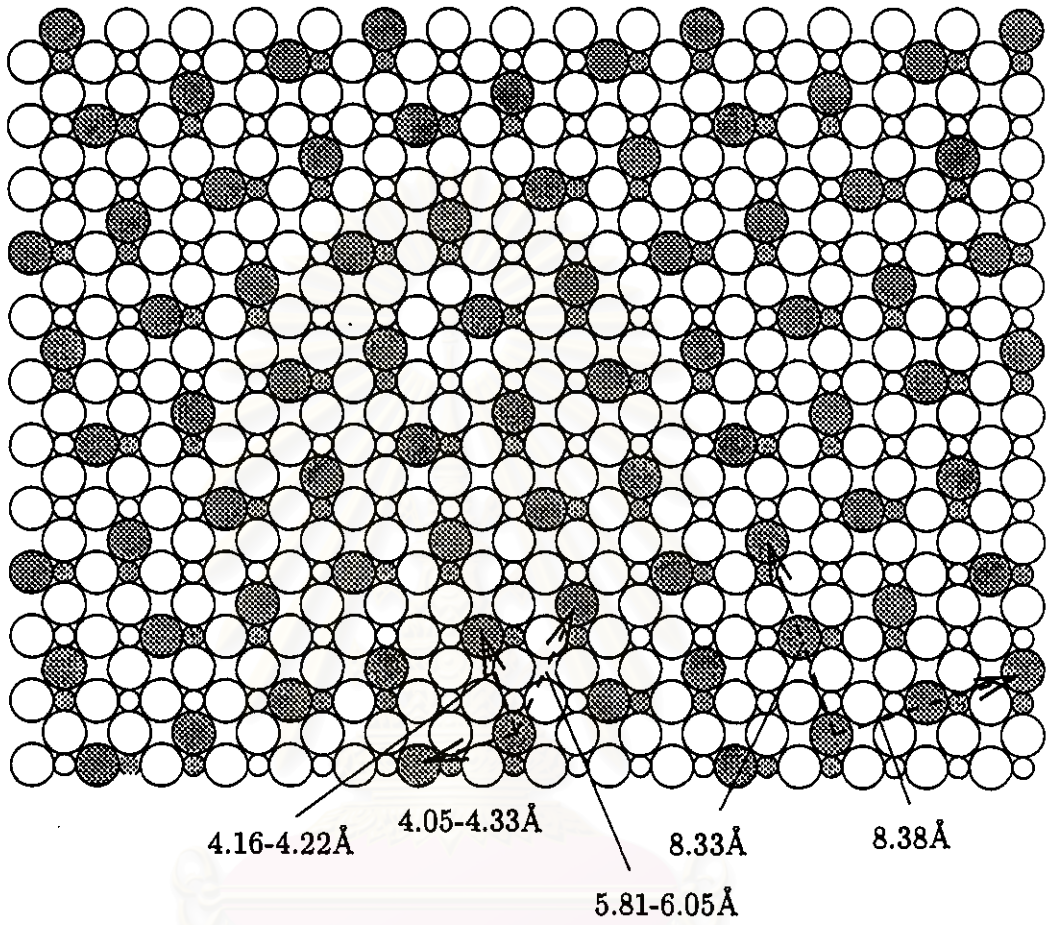
(2) NaA Zeolite



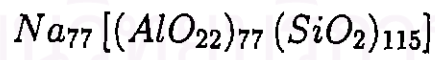
-  Oxygen anion
-  Oxygen atom
-  Al
-  Si





รูปที่ 4.13: (1): ลักษณะการใช้อะตอมออกซิเจนร่วมกันระหว่าง Si และ Al (2): ภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaA เป็นแบบระนาบ



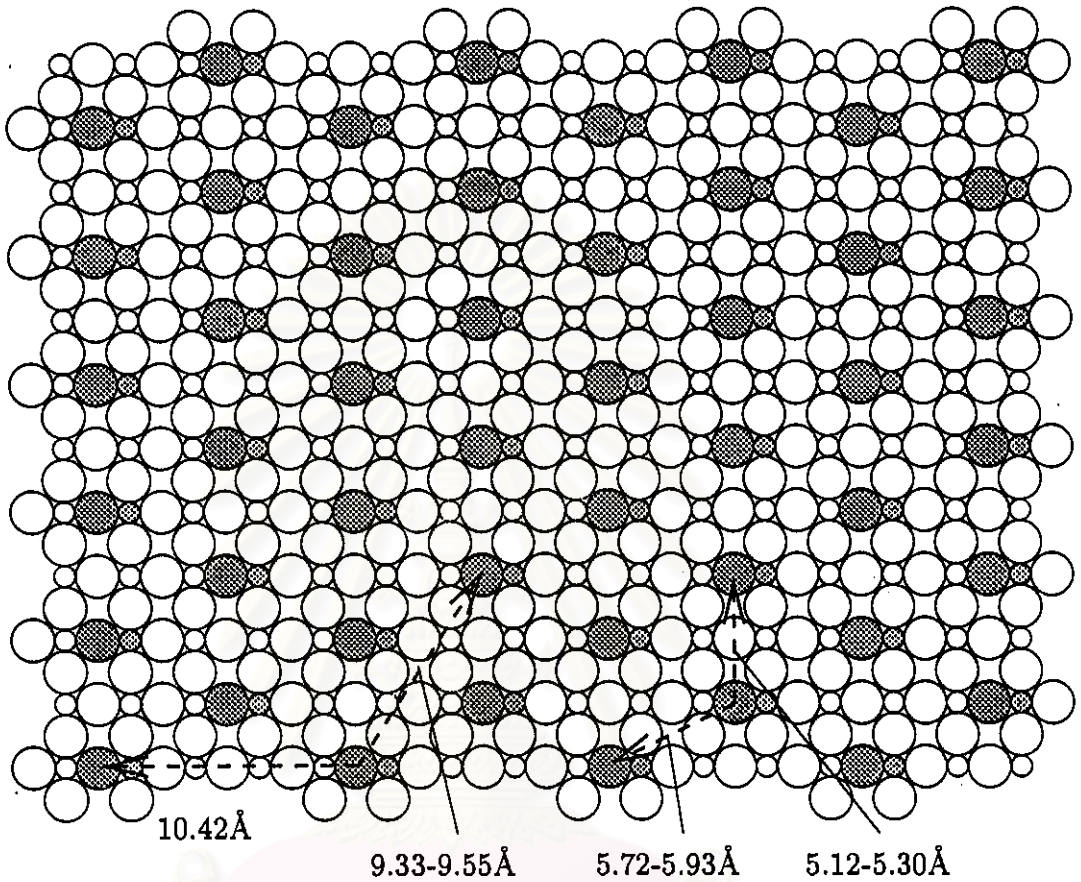


NaX Zeolite

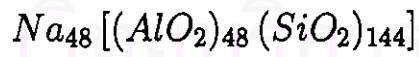






-  Oxygen anion
-  Oxygen atom
-  Al
-  Si

รูปที่ 4.14: ภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaX เป็นแบบระนาบ



NaY Zeolite



-  Oxygen anion
-  Oxygen atom
-  Al
-  Si

รูปที่ 4.15: ภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaY เป็นแบบระนาบ

ชนิด โดยไม่ซ้อนทับกัน ในขณะที่ โมเลกุลของอีเทน และโพรเพน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า จึงถูกดูดซับบน ออกซิเจนประจุลบบางตำแหน่งบนระนาบพื้นผิวของซีโอไลต์ NaA และ NaX โดยไม่ซ้อนทับกัน ดัง แสดงเส้นประล้อมรอบในรูปที่ 4.16

สำหรับการดูดซับบนซีโอไลต์ NaY เนื่องจากตำแหน่งออกซิเจนประจุลบอยู่ห่างกันมากพอ โมเลกุลของแก๊สอีเทน และโพรเพน จึงถูกดูดซับบนออกซิเจนประจุลบทุกตำแหน่งโดยไม่ซ้อนทับ กัน ดังนั้น จำนวนโมเลกุลของแก๊สไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดซึ่งถูกดูดซับสูงสุด บนระนาบพื้นผิว ของซีโอไลต์ทั้งสามชนิด จึงสรุปได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8: จำนวนโมเลกุลซึ่งถูกดูดซับสูงสุดบนระนาบพื้นผิวของซีโอไลต์

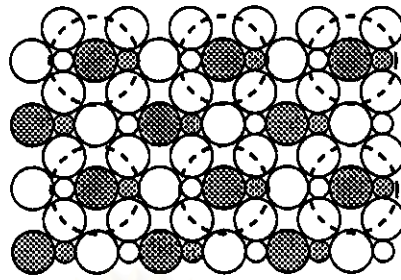
ซีโอไลต์	จำนวนโมเลกุลถูกดูดซับสูงสุด		
	มีเทน	อีเทน	โพรเพน
NaA	12	6	6
NaX	77	38	38
NaY	48	48	48

จากจำนวนโมเลกุลซึ่งถูกดูดซับสูงสุด และพื้นที่ภาพฉายของระนาบพื้นผิวของภาพจำลอง จึง สามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์แต่ละชนิด ดังสรุปในตารางที่ 4.9 ซึ่งการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.3 อย่างไรก็ตาม ผลการทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อ

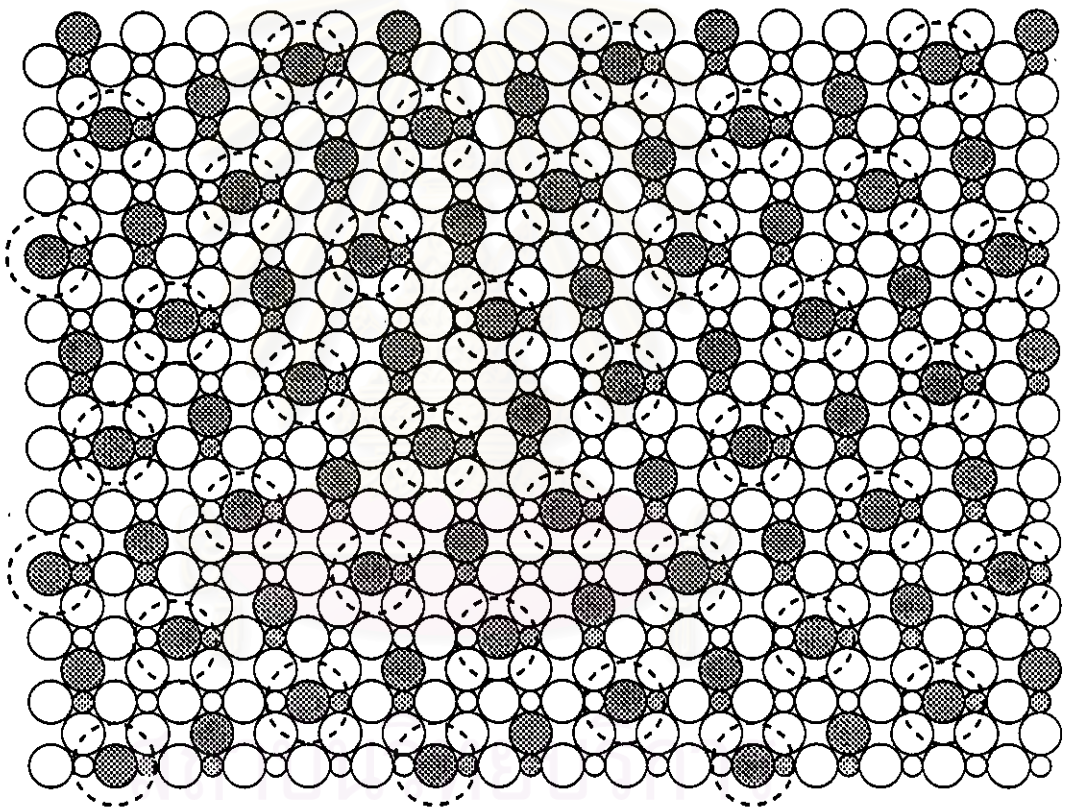
ตารางที่ 4.9: ผลการทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์

ซีโอไลต์	$q_{sa} \times 10^3$ (mmol/m <sup>2</sup> )		
	มีเทน	อีเทน	โพรเพน
NaA	16.56	8.28	8.28
NaX	12.37	6.10	6.10
NaY	7.76	7.76	7.76





พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ กรณีการดูดซับแก๊สมิเทนบนซีโอไลต์ทั้งสามชนิด และการดูดซับแก๊สอีเทนบน ซีโอไลต์ NaA และ NaX ใกล้เคียงกับข้อมูลจากแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ ณ สภาวะ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.17 สำหรับการดูดซับแก๊สอีเทนบนซีโอไลต์ NaY และการดูด ชับแก๊สโพรเพนบนซีโอไลต์ทั้งสามชนิด ผลการทำนายค่อนข้างมากกว่าข้อมูลจากแบบจำลองสมดุล



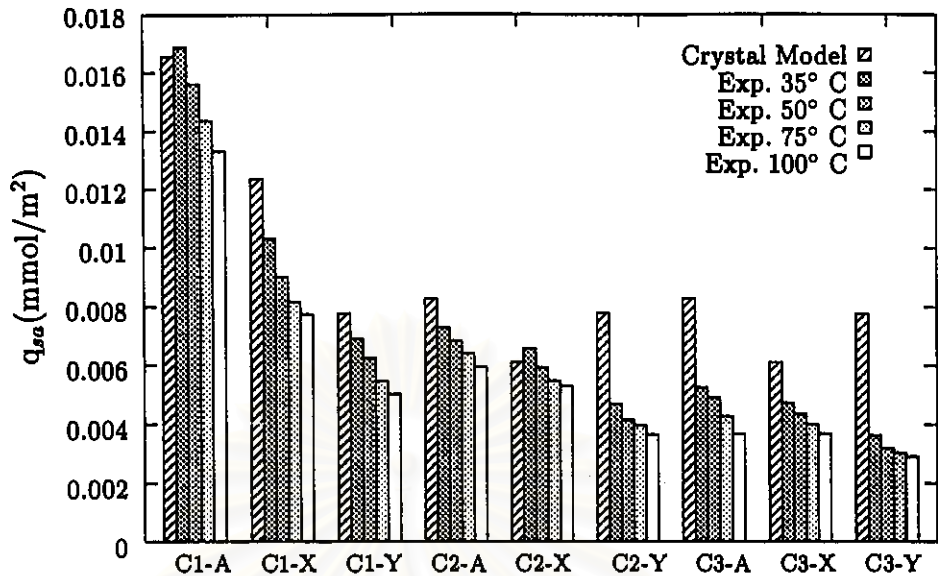
(1) NaA Zeolite



(2) NaX Zeolite

-  Oxygen anion
-  Oxygen atom
-  Al
-  Si

รูปที่ 4.16: ตำแหน่งการดูดซับโมเลกุลแก๊สเอเทน และโพรเพน โดยไม่ซ้อนทับกัน บนภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ เป็นแบบระนาบ (1): NaA (2): NaX

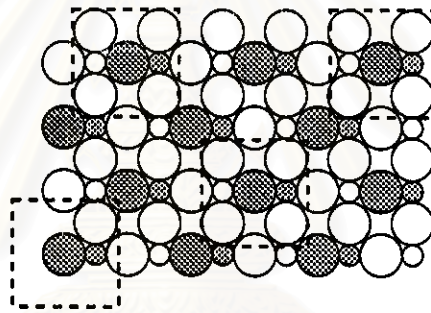
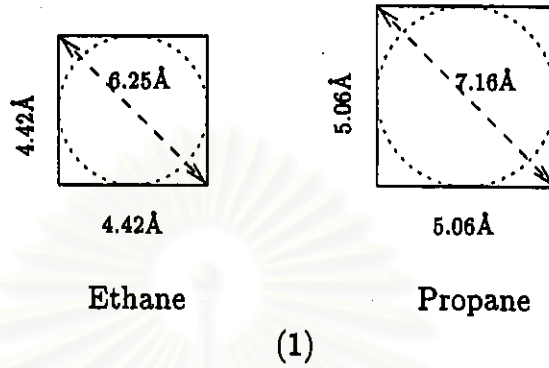


รูปที่ 4.17: การเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ กับข้อมูลจากแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์

การดูดซับของแลงเมียร์อย่างชัดเจน ซึ่งอาจเป็นผลจาก โมเลกุลของแก๊สอีเทน และโพรเพน ซึ่งควรมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ถูกพิจารณาให้มีลักษณะเป็นทรงกลม เพื่อให้ง่ายสำหรับการพิจารณาการดูดซับ ดังนั้น โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับจึงครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่ากรณีพิจารณาโมเลกุลเป็นทรงกระบอก จำนวนโมเลกุลซึ่งถูกดูดซับได้จากผลการทำนาย จึงค่อนข้างมาก

สำหรับกรณีพิจารณาโมเลกุลของอีเทน และโพรเพน เป็นทรงกระบอก เนื่องจากไม่มีข้อมูลของขนาดโมเลกุลที่แน่นอน จึงไม่สามารถทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ได้ อย่างไรก็ตาม เพื่อศึกษาผลของรูปร่างโมเลกุลแก๊สถูกดูดซับ ต่อปริมาณการดูดซับสูงสุด จึงกำหนดให้โมเลกุลของแก๊สทั้งสองชนิดเป็นทรงกระบอก ซึ่งมีด้านยาว และเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลกรณีพิจารณาเป็นทรงกลม สำหรับความยาวของด้านทะแยง อาจพิจารณาจากภาพฉายแนวอนของทรงกระบอก ดังรูปที่ 4.18 (1) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโมเลกุลเป็นทรงกระบอก จึงอาจถูกดูดซับในแนวตั้ง แนวอน หรือแนวเอียง นอกจากนี้ ตำแหน่งการดูดซับมีจำนวนมาก และโมเลกุลสามารถหมุนได้อย่างอิสระพร้อมกัน การดูดซับแต่ละโมเลกุลโดยไม่ซ้อนทับกัน จึงอาจเป็นได้หลายกรณี ดังนั้น เพื่อให้ง่ายสำหรับการพิจารณาการดูดซับ จึงเลือกกรณีซึ่งโมเลกุลไม่มีโอกาสซ้อนทับกัน ไม่ว่าโมเลกุลจะหมุนรอบจุดศูนย์กลางตำแหน่งดูดซับเป็นลักษณะใดก็ตาม





(2) NaA Zeolite

● Oxygen anion

○ Oxygen atom

● Al

○ Si

รูปที่ 4.18: (1): ขนาดภาพฉายแนวอนของโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ทรงกระบอก (2): ตำแหน่งการดูดซับโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ทรงกระบอก โดยไม่ซ้อนทับกัน บนภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaA

ตำแหน่งการดูดซับโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ทรงกระบอก บนภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ เป็นแบบระนาบ โดยไม่ซ้อนทับกัน ไม่ว่าโมเลกุลจะหมุนรอบจุดศูนย์กลาง ตำแหน่งดูดซับเป็นลักษณะใด แสดงได้ดังรูปที่ 4.18 (2), 4.19 และ 4.20 เนื่องจากผลของความยาวด้านทะแยงของโมเลกุลทรงกระบอก การดูดซับจึงครอบคลุมพื้นที่มากกว่าโมเลกุลทรงกลม ดังนั้น บางตำแหน่งซึ่งถูกดูดซับได้กรณีพิจารณาโมเลกุลเป็นทรงกลม จึงซ้อนทับกันเมื่อพิจารณาโมเลกุลเป็นทรงกระบอก ซึ่งส่งผลให้จำนวนโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ซึ่งถูกดูดซับ หรือ ปริมาณการดูดซับสูงสุด บนระนาบพื้นผิวของซีโอไลต์แต่ละชนิด ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีพิจารณาโมเลกุลเป็นทรงกลม ดังสรุปในตารางที่ 4.10, 4.11 ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า ปริมาณการดูดซับสูงสุด ต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ขึ้นกับขนาด และรูปทรงของโมเลกุลแก๊สที่ถูกดูดซับ

ตารางที่ 4.10: การเปรียบเทียบจำนวนโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ซึ่งถูกดูดซับสูงสุดบนภาพจำลองระนาบพื้นผิวของซีโอไลต์ กรณีพิจารณาโมเลกุลเป็นทรงกลม และทรงกระบอก

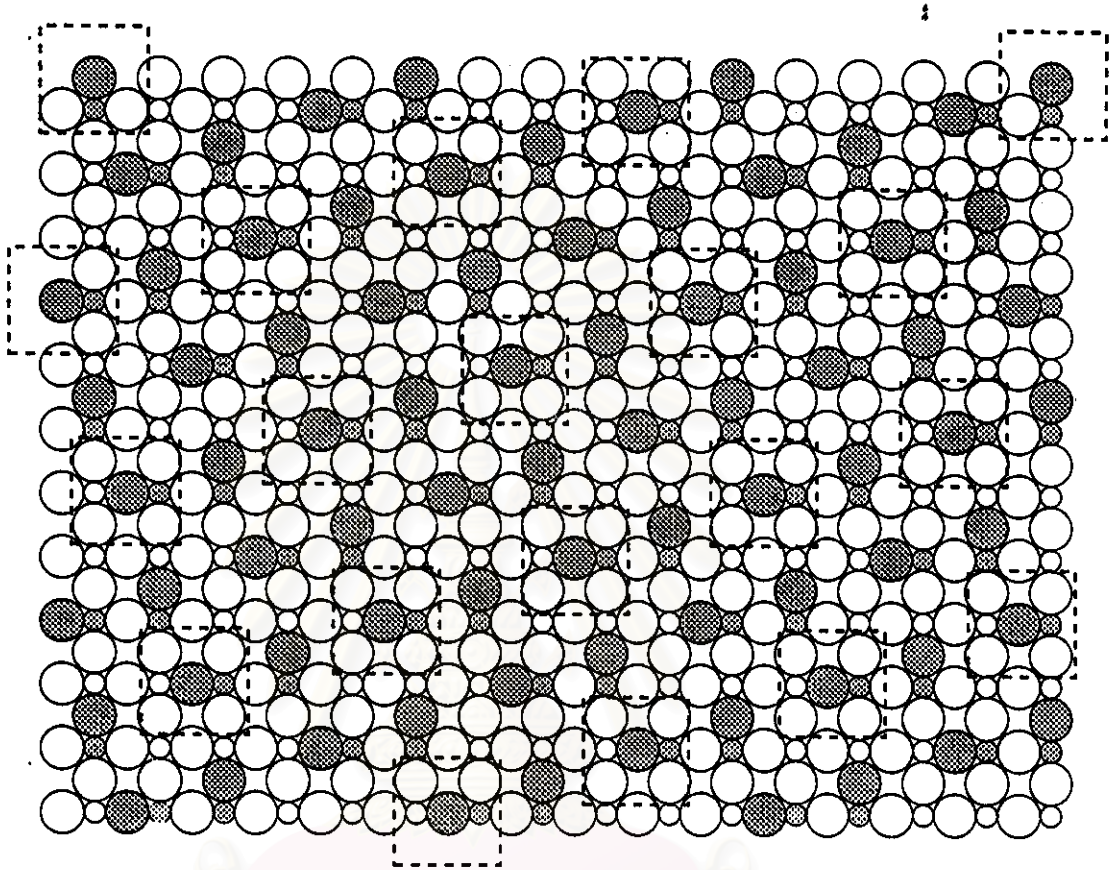
ซีโอไลต์	จำนวนโมเลกุลถูกดูดซับสูงสุด			
	ทรงกลม		ทรงกระบอก	
	อีเทน	โพรเพน	อีเทน	โพรเพน
NaA	6	6	4	4
NaX	38	38	20	20
NaY	48	48	16	16

ตารางที่ 4.11: การเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณการดูดซับแก๊สอีเทน และโพรเพน สูงสุด ต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ กรณีพิจารณาโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน เป็นทรงกลม และทรงกระบอก





ซีโอไลต์	$q_{sa} \times 10^3$ (mmol/m <sup>2</sup> )			
	ทรงกลม		ทรงกระบอก	
	อีเทน	โพรเพน	อีเทน	โพรเพน
NaA	8.28	8.28	5.52	5.52
NaX	6.10	6.10	3.21	3.21
NaY	7.76	7.76	2.59	2.59

อย่างไรก็ตาม การทำนายผลปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ เป็นแนวความคิดง่าย ๆ ซึ่งไม่คำนึงถึงอิทธิพลของปัจจัยอื่น เช่น อุณหภูมิ ดังนั้น การทำนายผลจึงยังคงมีข้อจำกัด ซึ่งอาจสังเกตได้จากกรณีการดูดซับแก๊สมีเทน ผลการทำนายใกล้เคียงกับข้อมูลจากแบบ

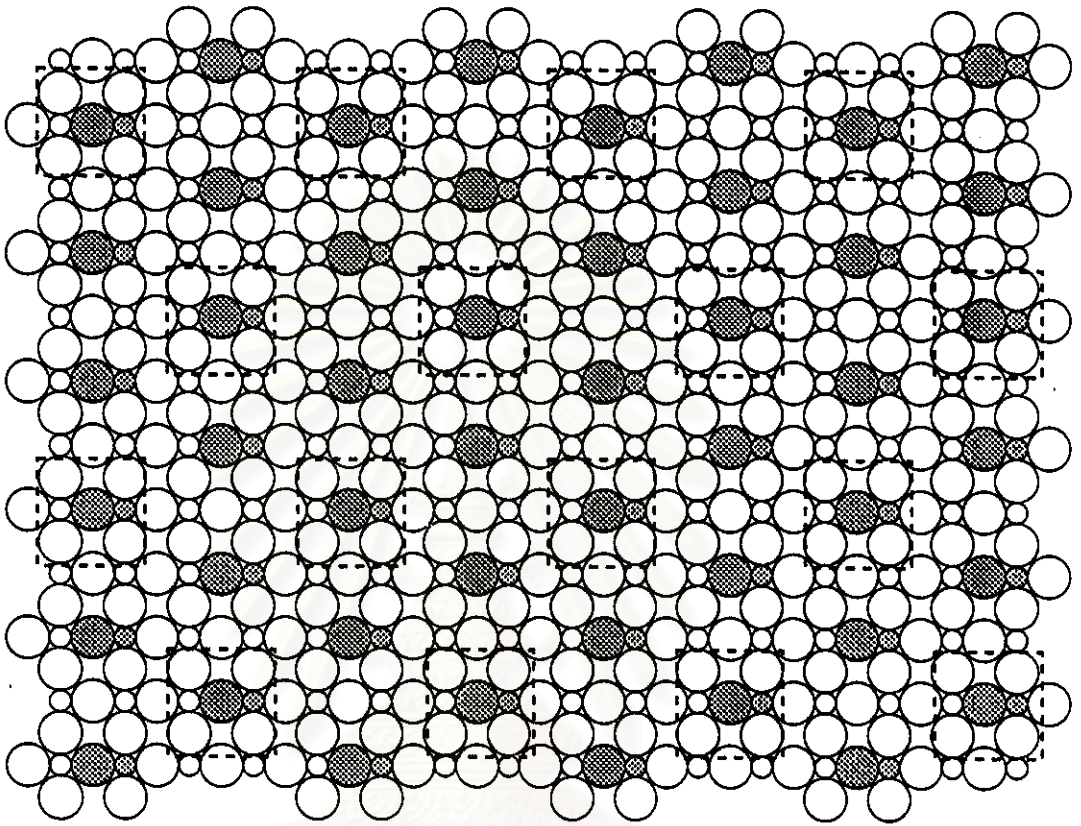




NaX Zeolite

-  Oxygen anion
-  Oxygen atom
-  Al
-  Si

รูปที่ 4.19: ตำแหน่งการดูดซับโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ทรงกระบอก โดยไม่ซ้อนทับกัน บนภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaX เป็นแบบระนาบ



NaY Zeolite

- Oxygen anion
- Oxygen atom
- Al
- Si

รูปที่ 4.20: ตำแหน่งการดูดซับโมเลกุลแก๊สอีเทน และโพรเพน ทรงกระบอก โดยไม่ซ้อนทับกัน บนภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์ NaY เป็นแบบระนาบ

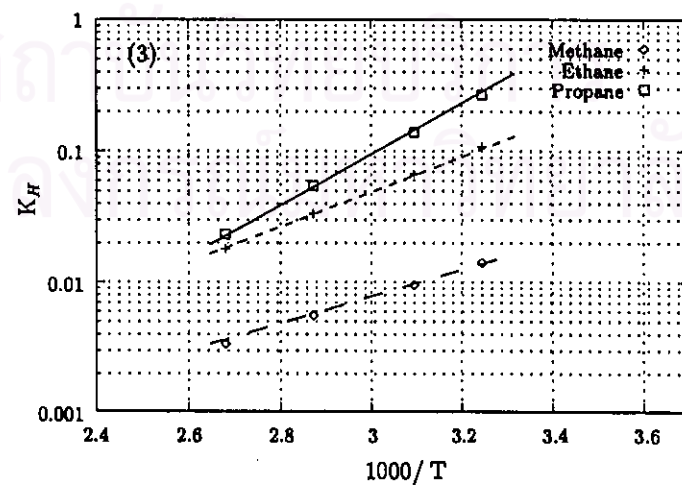
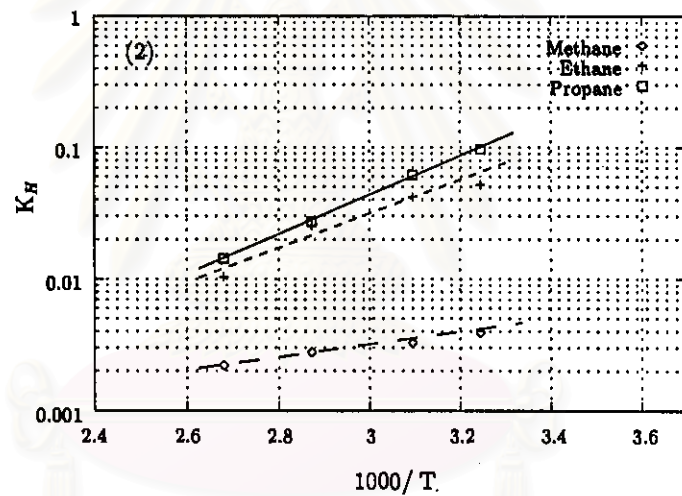
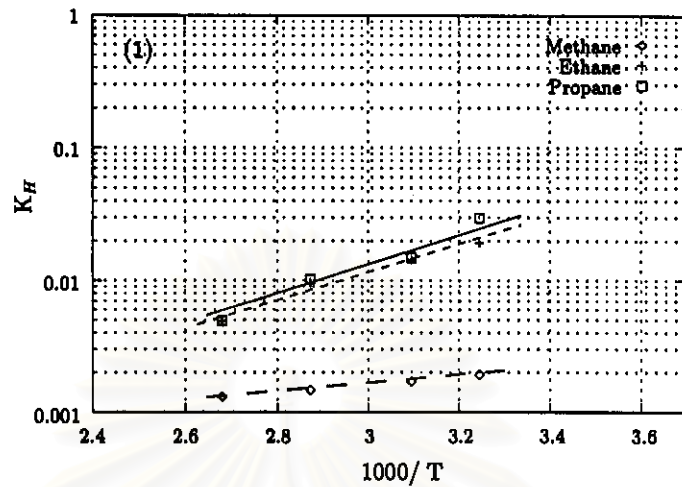
จำลองสมมูลการดูดซับของแลงเมียร์ ในช่วงอุณหภูมิต่ำเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจาก อิทธิพลของไฟฟ้าสถิตย์บนพื้นผิว ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งประจุลบของอะตอมออกซิเจน มีผลลดลงในช่วงอุณหภูมิสูง เนื่องจากโมเลกุลของสารมีพลังงานจลน์สูง การดูดซับจึงอาจได้รับอิทธิพลของแรงดึงดูดระหว่างมวลค่อนข้างชัดเจน ดังนั้น ตำแหน่งการดูดซับซึ่งใช้ประกอบการพิจารณาทำนายผล จึงอาจเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องทราบขนาดโมเลกุล และตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน ตลอดจน ทฤษฎี หรือปัจจัยอื่นๆประกอบการพิจารณา เพื่อให้การทำนายผลมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

#### 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงเมียร์ และเฮนรี

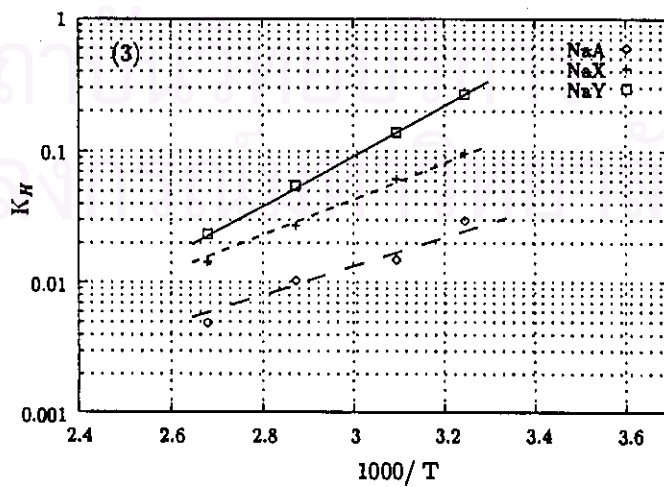
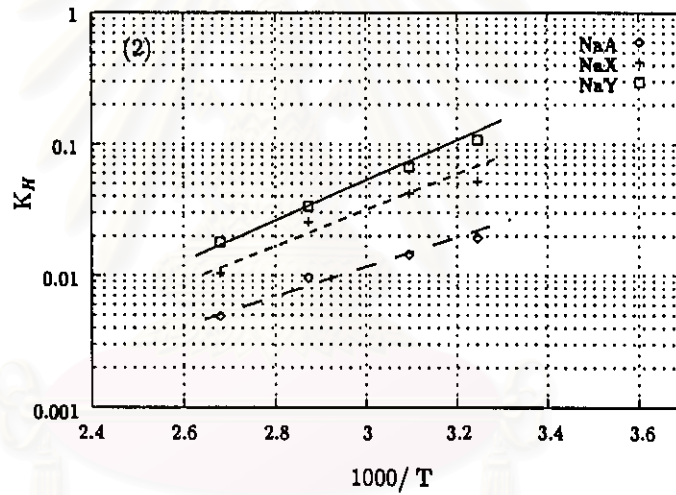
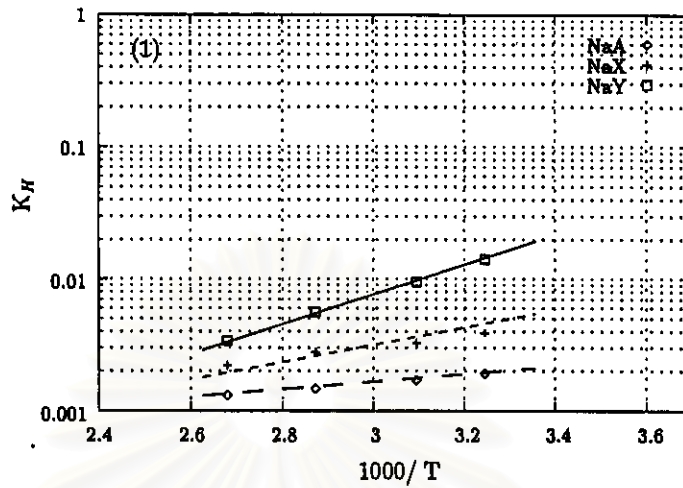
เมื่อความเข้มข้นของแก๊สถูกดูดซับเจือจาง หรือความดันย่อยมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ไอโซเทิร์มของแลงเมียร์จะเข้าสู่ไอโซเทิร์มเชิงเส้น ดังนั้น ค่าคงที่สมมูลของแบบจำลองทั้งสองจึงมีความสัมพันธ์กัน โดยค่าคงที่ของเฮนรีมีค่าเท่ากับ ผลคูณของปริมาณการดูดซับสูงสุด และค่าคงที่ของแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ ค่าคงที่ของเฮนรีกรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อมวลของซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22

การประเมินความสามารถในการดูดซับ อาจพิจารณาจากค่าคงที่ของเฮนรี นั่นคือ กรณีความสามารถในการดูดซับสูง ค่าคงที่ของเฮนรีมักมีค่ามาก หรือไอโซเทิร์มการดูดซับในช่วงความดันต่ำมีลักษณะชัน อย่างไรก็ตาม สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ ค่าคงที่ของเฮนรี มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าคงที่ของแลงเมียร์ นั่นคือ แก๊สโพรเพนถูกดูดซับบนซีโอไลต์ชนิดเดียวกันได้ดีกว่าแก๊สอีเทน และมีเทน ตามลำดับ ในขณะที่ การดูดซับแก๊สชนิดเดียวกัน ซีโอไลต์ NaY สามารถดูดซับได้ดีกว่าซีโอไลต์ NaX และ NaA ตามลำดับ สำหรับกรณีพิจารณาปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ค่าคงที่ของเฮนรีมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม เพื่อวัตถุประสงค์ในการแยกแก๊สผสม โดยอาศัยความแตกต่างของสมมูลการดูดซับของแต่ละองค์ประกอบ บนตัวดูดซับที่เลือกใช้ อาจพิจารณาจากดัชนีการแยก (separation factor,  $\alpha_{ij}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับสัดส่วนของค่าคงที่ของเฮนรี ขององค์ประกอบ



รูปที่ 4.21: ค่าคงที่ของเฮนรี สำหรับการดูดซับแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพน บนซีโอไลต์ (1): NaA (2): NaX (3): NaY



รูปที่ 4.22: ค่าคงที่ของเฮนรี สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ NaA, NaX และ NaY  
 (1): แก๊สมีเทน (2): แก๊สอีเทน (3): แก๊สโพรเพน

ซึ่งต้องการแยก ดังสมการที่ 4.4 [13]

$$\alpha_{ij} = \frac{K_{Hi}}{K_{Hj}} \quad (4.4)$$

สำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์ ดัชนีการแยกแก๊สผสมสององค์ประกอบด้วยซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.12 สำหรับที่สภาวะอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.12: ดัชนีการแยกแก๊สผสมสององค์ประกอบด้วยซีโอไลต์ ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

แก๊สผสม	$\alpha_{ij}$		
	NaA	NaX	NaY
โพรเพน/อีเทน	1.53	1.88	2.49
อีเทน/มีเทน	10.07	13.29	7.65
โพรเพน/มีเทน	15.44	24.92	19.06

อื่น ดัชนีการแยกมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ดังนั้น ซีโอไลต์ NaX เหมาะสำหรับแยกแก๊สผสมของ อีเทน/มีเทน และโพรเพน/มีเทน ในขณะที่ การแยกแก๊สผสมของโพรเพน/อีเทน ควรเลือกใช้ซีโอไลต์ NaY

## 4.5 ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสารภายในหลอดดูดซับ

ขนาดสัมพัทธ์ระหว่างขนาดและรูปร่างของโมเลกุลแก๊สไฮโดรคาร์บอน กับขนาดและรูปร่างของรูพรุนซีโอไลต์ มีผลกระทบต่ออัตราการดูดซับ ซึ่งขึ้นกับ อัตราการแพร่ของโมเลกุลแก๊สไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิด ไปบนพื้นผิวของซีโอไลต์ อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบอัตราการดูดซับโดยประมาณ อาจพิจารณาจากความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสาร (length of mass transfer zone, MTZ Length) ภายในหลอดดูดซับ ภายใต้สภาวะเดียวกัน ซึ่งวัดจากกราฟการกระจายความเข้มข้นภายในหลอดดูดซับ ณ เวลาเริ่มไหลผ่านทะเลหอดูดซับ สำหรับกราฟการกระจายความเข้มข้น คำนวณจากเส้นโค้งไหลผ่านทะเลหอดูดซับ ซึ่งกรณีนี้มีความยาวของส่วนบรรจุซีโอไลต์ 8 เซนติเมตร และเวลาเริ่มไหลผ่านทะเลหอดูดซับ ( $t_b$ ) กำหนดให้เป็นเวลา ณ สัดส่วนความเข้มข้นที่ไหลผ่านทะเลหอดูดซับ ( $c/c_o$ ) เท่ากับ 0.001 สำหรับความเร็วของการกระจายเฉลี่ย ณ สัดส่วนความเข้มข้นใดๆ ที่ไหลผ่านทะเลหอดูดซับ ( $w_{c/c_o}$ ) คำนวณได้จาก สัดส่วนของความยาวของส่วนบรรจุซีโอไลต์ในหลอดดูดซับ ต่อ



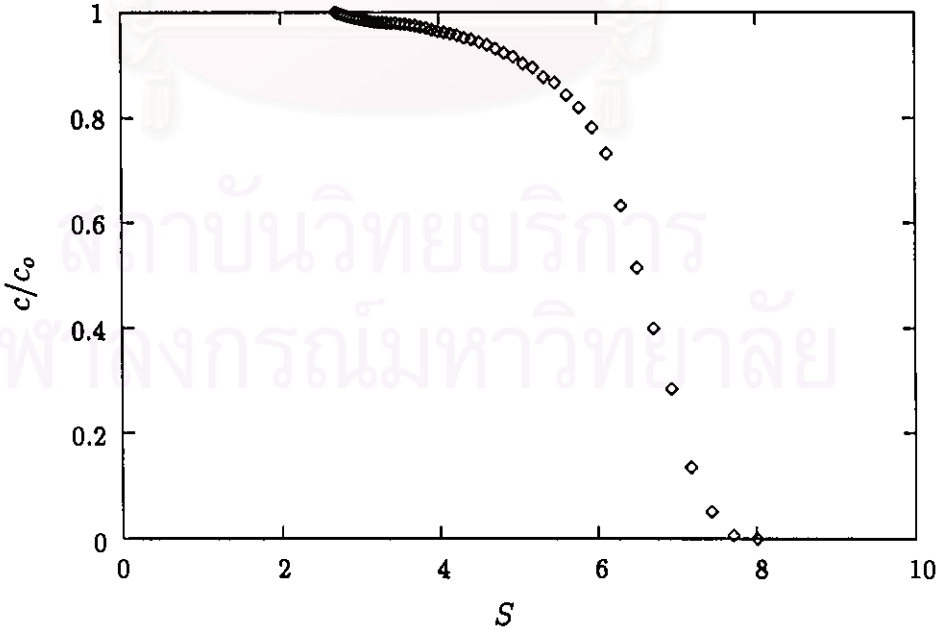
เวลา ณ สัดส่วนของความเข้มข้นนั้นๆ ที่ไหลผ่านทะลุออกมา ( $t_c/c_o$ ) นั่นคือ

$$w_{c/c_o} = \frac{8}{t_c/c_o} \tag{4.5}$$

ตำแหน่งตามแนวความยาวของหลอดซับ ณ สัดส่วนความเข้มข้นใดๆ ณ เวลาเริ่มไหลผ่าน ทะลุหลอดซับ ( $S_{c/c_o}$ ) คำนวณได้จาก

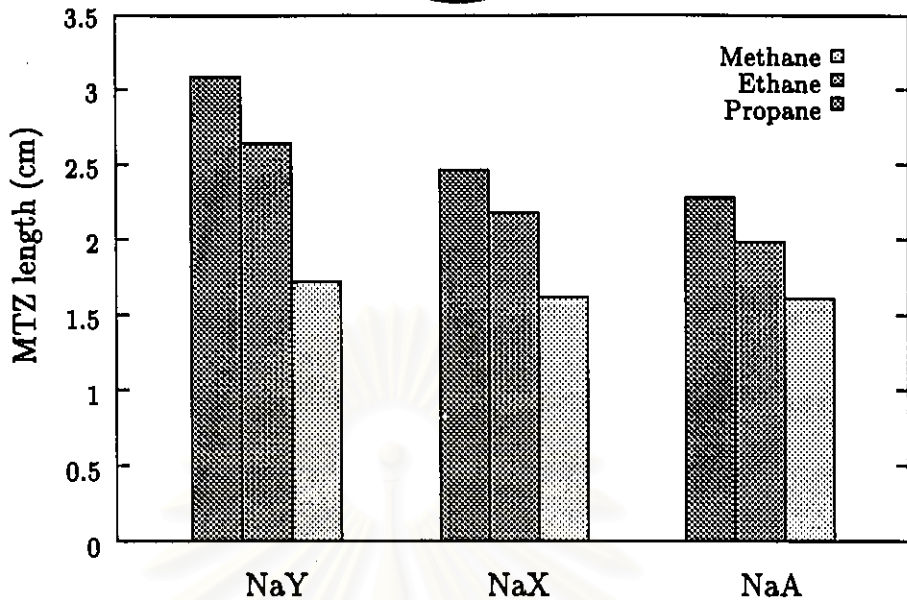
$$S_{c/c_o} = w_{c/c_o} t_b \tag{4.6}$$

ตัวอย่างกราฟการกระจายความเข้มข้นของแก๊สโพเพนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ภายในหลอดซับซึ่งบรรจุซีโอไลต์ NaY ยาว 8 เซนติเมตร ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.23 ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.4 สำหรับบริเวณถ่ายเทมวลสารใน ทางทฤษฎี หมายถึง บริเวณซึ่งความเข้มข้นเริ่มเพิ่มขึ้น โดยปกติหมายถึงศูนย์ จนกระทั่งเท่ากับ ความเข้มข้นของสารป้อน ดังนั้น ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสาร จึงเท่ากับระยะระหว่างความเข้มข้น ที่เริ่มเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นเท่ากับสารป้อน ซึ่งในทางปฏิบัติ ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสาร วัดจากระยะระหว่างร้อยละ 5-95 ของความเข้มข้นสารป้อน บนกราฟการกระจายความเข้มข้น



รูปที่ 4.23: กราฟการกระจายความเข้มข้นของแก๊สโพเพนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ภายในหลอดซับซึ่งบรรจุซีโอไลต์ NaY ยาว 8 เซนติเมตร ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



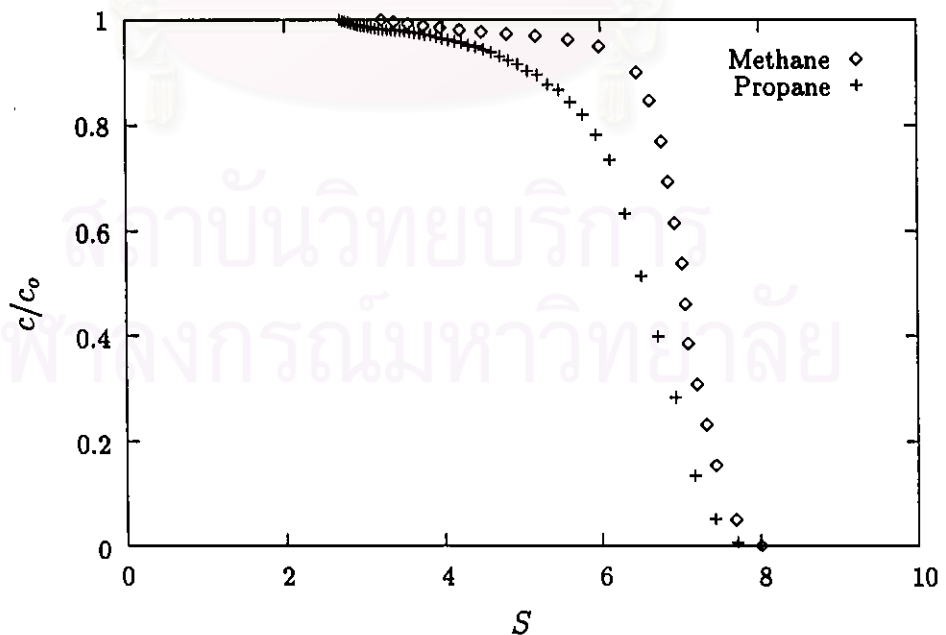


รูปที่ 4.24: ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสารภายในหอดูดซับซีโอไลต์ สำหรับการดูดซับแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพน ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

จากกราฟการกระจายความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรคาร์บอน ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสารภายในหอดูดซับซีโอไลต์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 สำหรับการดูดซับบนซีโอไลต์ชนิดเดียวกัน ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสารสำหรับการดูดซับแก๊สโพรเพน มากกว่าการดูดซับแก๊สอีเทน และมีเทน จึงอาจกล่าวได้ว่า อัตราการดูดซับแก๊สโพรเพน ช้ากว่าการดูดซับแก๊สอีเทน และมีเทน ตามลำดับ เนื่องจากโมเลกุลของโพรเพนมีลักษณะคล้ายทรงกระบอก และมีขนาดใหญ่กว่า จึงสามารถเคลื่อนผ่านรูพรุนไปบนพื้นผิวซีโอไลต์ได้ช้ากว่า สำหรับการดูดซับแก๊สชนิดเดียวกันบนซีโอไลต์ NaA ซึ่งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี BET ใหญ่กว่าซีโอไลต์ NaX และ NaY โมเลกุลของแก๊สจึงเคลื่อนผ่านรูพรุนไปบนพื้นผิวได้เร็วกว่า จึงมีผลให้อัตราการดูดซับแก๊สชนิดเดียวกันบนซีโอไลต์ NaA เร็วกว่าการดูดซับบนซีโอไลต์ NaX และ NaY ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อาจสังเกตได้ว่า ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสารสำหรับการดูดซับแก๊สมีเทนบนซีโอไลต์ทั้งสามชนิด ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากโมเลกุลของมีเทนมีขนาดค่อนข้างเล็ก และเป็นทรงกลม ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ทั้งสามชนิด จึงไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถของการเคลื่อนผ่านรูพรุนไปบนพื้นผิว ดังนั้น อัตราการดูดซับแก๊สมีเทนบนซีโอไลต์ทั้งสามชนิด จึงค่อนข้างใกล้เคียงกัน

สำหรับการประยุกต์ใช้การดูดซับเพื่อการแยกแก๊สผสม โดยเลือกใช้ความแตกต่างของอัตรา การดูดซับของแต่ละองค์ประกอบ บนตัวดูดซับที่เลือกไว้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราการดูด ซับโดยประมาณ จากความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสารภายในหอดูดซับ ภายใต้สภาวะเดียวกัน อาจสังเกตได้ว่า ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสารสำหรับการดูดซับแก๊ส มีเทน และโพรเพน บนซีโอไลต์ NaY แตกต่างกันอย่างมากที่สุด นั่นคือ อัตราการดูดซับแก๊สทั้งสองชนิดบนซีโอไลต์ NaY แตกต่างกันอย่างมากกว่า เมื่อเทียบกับการดูดซับบนซีโอไลต์ NaA และ NaX อย่างไรก็ตาม การแยก แก๊สผสมโดยเลือกใช้ความแตกต่างของอัตราการดูดซับของแต่ละองค์ประกอบ บนตัวดูดซับที่เลือก ไว้ จำเป็นต้องพิจารณาลักษณะการกระจายความเข้มข้นภายในหอดูดซับของแต่ละองค์ประกอบ เพื่อ ตรวจสอบอัตราการดูดซับ มีความแตกต่างกันมากพอสำหรับการแยกอย่างเหมาะสม เมื่อบริเวณ ถ่ายเทมวลสารขององค์ประกอบซึ่งต้องการแยก ไม่ซ้อนทับกัน

เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายความเข้มข้นของแก๊สมีเทน และโพรเพน ภายในหอดูด ซับซีโอไลต์ NaY ดังรูปที่ 4.25 อาจสังเกตได้ว่า แม้ความยาวของบริเวณถ่ายเทมวลสาร สำหรับการดูดซับแก๊สทั้งสองชนิดบนซีโอไลต์ NaY แตกต่างกันอย่างมากกว่า เมื่อเทียบกับการดูดซับบนซีโอไลต์



รูปที่ 4.25: กราฟการกระจายความเข้มข้นของแก๊สมีเทน และโพรเพนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดย ปริมาตร ภายในหอดูดซับซึ่งบรรจุซีโอไลต์ NaY ยาว 8 เซนติเมตร ณ สภาวะอุณหภูมิ 35 องศา เซลเซียส

NaA และ NaX แต่บริเวณถ่ายเทมวลสารของแก๊สทั้งสองชนิดภายในหอดูดซับ ยังคงมีลักษณะซ้อนทับกัน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการดูดซับแก๊สทั้งสองชนิดบนซีโอไลต์ NaY แตกต่างกันไม่มากพอ ในขณะที่ การดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดบนซีโอไลต์ NaA และ NaX ซึ่งมีความแตกต่างของความยาวบริเวณถ่ายเทมวลสารน้อยกว่า จึงเป็นที่ชัดเจนว่า บริเวณถ่ายเทมวลสารของแก๊สแต่ละชนิดภายในหอดูดซับซีโอไลต์ NaA และ NaX มีลักษณะซ้อนทับกัน ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า ไม่สามารถเลือกใช้ความแตกต่างของอัตราการดูดซับ สำหรับแยกแก๊สผสมของมีเทน อีเทน และโพรเพน โดยซีโอไลต์ NaA, NaX หรือ NaY

#### 4.6 ปริมาณความร้อนของการดูดซับ

จากค่าคงที่ของแลงเมียร์ และเฮนรี ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ โดยสอดคล้องกับสมการของแวนต์ฮอฟฟ์ ปริมาณความร้อนของการดูดซับบนซีโอไลต์ สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง ค่าคงที่ดังกล่าว และส่วนกลับของอุณหภูมิ ดังสรุปในตารางที่ 4.13 ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.5

ตารางที่ 4.13: ปริมาณความร้อนของการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนซีโอไลต์

ซีโอไลต์	แก๊ส	$\Delta H$ (kJ/mol)		
		แลงเมียร์	เฮนรี	เอกสารอ้างอิง [16, 42]
NaA	มีเทน	2.10	5.54	—
	อีเทน	16.73	19.63	—
	โพรเพน	19.35	24.63	—
NaX	มีเทน	4.10	8.10	—
	อีเทน	19.27	22.65	22–26
	โพรเพน	24.63	28.58	—
NaY	มีเทน	16.18	20.91	12–18
	อีเทน	23.00	26.39	24
	โพรเพน	32.85	35.89	—

เนื่องจากการดูดซับบนพื้นผิวซีโอไลต์ เกิดขึ้นด้วยอิทธิพลของแรงดึงดูดเนื่องจากไฟฟ้าสถิตย์บนพื้นผิว ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติการถูกเหนี่ยวนำให้เกิดความเป็นขั้ว ของโมเลกุลสารถูกดูดซับแต่ละชนิด สำหรับการดูดซับบนซีโอไลต์ชนิดเดียวกัน คุณสมบัติดังกล่าวที่มากกว่า ส่งผลให้โมเลกุลของ

ไพโรเพนได้รับอิทธิพลของแรงดึงดูดเนื่องจากไฟฟ้าสถิตย์มากกว่า ดังนั้น พลังงานความร้อนซึ่งปลดปล่อยเนื่องจากการดูดซับโมเลกุลของไพโรเพน จึงมากกว่าการดูดซับโมเลกุลของอีเทน และมีเทนตามลำดับ

สำหรับการดูดซับแก๊สชนิดเดียวกัน การเกิดแรงผลักระหว่างประจุลบบนพื้นผิว ซึ่งขึ้นกับความถี่ของตำแหน่งประจุลบที่เกิดจากอะตอมออกซิเจน ส่งผลให้แรงดึงดูดโมเลกุลของแก๊สบนพื้นผิวของซีโอไลต์ลดลง จากความถี่ของตำแหน่งประจุลบที่มากกว่า ส่งผลให้แรงผลักระหว่างประจุลบบนพื้นผิวของซีโอไลต์ NaA มีมากกว่า ดังนั้น แรงดึงดูดโมเลกุลของแก๊สบนพื้นผิวซีโอไลต์ NaA จึงน้อยกว่าแรงดึงดูดโมเลกุลของแก๊สชนิดเดียวกันบนพื้นผิวซีโอไลต์ NaX และ NaY จึงส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยเนื่องจากการดูดซับบนซีโอไลต์ NaA น้อยกว่าการดูดซับบนซีโอไลต์ NaX และ NaY ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อาจสังเกตได้ว่า ปริมาณความร้อนของการดูดซับซึ่งคำนวณได้เมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ของเฮนรี มีค่ามากกว่ากรณีพิจารณาจากค่าคงที่ของแลงเมียร์ เนื่องจากผลของปริมาณการดูดซับสูงสุด ซึ่งคูณร่วมกับค่าคงที่ของแลงเมียร์ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของเฮนรี

อย่างไรก็ตาม ปริมาณความร้อนของการดูดซับแก๊สมีเทนบนซีโอไลต์ NaA และ NaX น้อยกว่าความร้อนแฝงของการควบแน่น ในขณะที่ ปริมาณความร้อนของการดูดซับแก๊สมีเทนบนซีโอไลต์ NaY และการดูดซับแก๊สอีเทน และไพโรเพน บนซีโอไลต์ทั้งสามชนิด มากกว่าความร้อนแฝงของการควบแน่น สำหรับปริมาณความร้อนของการดูดซับแก๊สอีเทนบนซีโอไลต์ NaX และการดูดซับแก๊สมีเทน และอีเทนบนซีโอไลต์ NaY ซึ่งพิจารณาจากค่าคงที่ทั้งสองชนิด มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลปริมาณความร้อนของการดูดซับจากเอกสารอ้างอิง ซึ่งประเมินได้โดยเทคนิคโครมาโทกราฟี

เมื่อพิจารณาปริมาณความร้อนของการดูดซับ อาจกล่าวได้ว่า การคืนสภาพซีโอไลต์ NaA เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ใช้พลังงานความร้อนน้อยที่สุด