



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ลักษณะเฉพาะของการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอเชิงพาณิชย์

Moisture Adsorption Characteristics of Commercial Zeolite A

นามผู้วิจัย นางสาวภัทรณัฐ อินทรวิรัตน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ผ่องผาย พรรณวดี, D.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ผ่องผาย พรรณวดี, D.Sc.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ลักษณะเฉพาะของการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอเชิงพาณิชย์

Moisture Adsorption Characteristics of Commercial Zeolite A

โดย

นางสาวภัทรณัฐ อินทรวีรัตน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2552

ภัทรณัฐ อินทรวีรัตน์ 2552: ลักษณะเฉพาะของการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอเชิงพาณิชย์ ปริญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมีภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ผึ่งผาย พรรณวดี, D.Sc. 64 หน้า

ปริมาณความชื้นสมดุลและอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ถูกตรวจสอบโดยวิธีชั่งน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 °C ตัวอย่างซีโอไลต์เอเชิงพาณิชย์หนัก 1 กรัม ซึ่งความหนาของตัวอย่างเท่ากับหนา 2 มม. ถูกวางในภาชนะปิดสนิทที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว ซึ่งใช้ในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในการทดลอง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์แสดงลักษณะไอโซเทอร์มชนิดที่ II แบบจำลองงานพื้นผิวส่วนเกิน (Excess surface work, ESW) สามารถอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir) และแบบจำลองแลงเมียร์-ฟรุนด์ลิช (Langmuir-Freundlich, L-F) กราฟระหว่างอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในซีโอไลต์เอกับปริมาณความชื้นแสดง อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นคงที่ที่ปริมาณความชื้นต่ำและเริ่มลดลงที่ปริมาณความชื้นวิกฤต จนกระทั่งปริมาณความชื้นมีค่าสูงสุด งานวิจัยนี้รายงานค่าปริมาณความชื้นวิกฤตที่ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่างๆ แบบจำลองแรงขับเชิงเส้น (Linear driving force, LDF) อธิบายอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอได้ดี สัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอจากแบบจำลอง LDF มีค่าสูงตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น

Phattaranat Indarawirat 2009: Moisture Adsorption Characteristics of Commercial Zeolite A. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Phungphai Phanawadee, D.Sc. 64 pages.

Equilibrium moisture content and moisture adsorption rate of zeolite A were determined using the gravimetric method at different relative humidities (%RH) and temperatures of 25, 35 and 45°C. For each test, a commercial zeolite A sample of 1 g corresponding to 2 mm. thickness of sample was placed in a chamber containing specific saturated salt solution to generate the desired level of relative humidity. Correlation between the equilibrium moisture content and the relative humidity over a range of 5.5-100% follows type II isotherm. It was found that the excess surface work (ESW) model describes the isotherm much better than the Langmuir and the Langmuir-Freundlich models. Over the range of relative humidity of 50-100%, plots of adsorption rate versus moisture content show typical characteristics, i.e., the rate is constant at low moisture content and starts to decrease at critical moisture content until the moisture content reaches the maximum. The critical moisture contents at different relative humidity and temperatures are reported. It was also found that the adsorption rates are well described by the Linear Driving Force (LDF) model. The moisture diffusivity in zeolite A calculated from the LDF model increases with increasing temperature and relative humidity.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ดิฉันขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ฝั่งผาย พรรณวดี รองศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช และรองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจฉาย ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง

บริษัท พีคิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติภายใต้สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้ คุณชนาธิป อุทัย และคุณสุพัตรา ศรีจิ๋ว สำหรับคำแนะนำและการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในงานวิจัย

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพึงมีเพียงใด ขอมอบแด่คุณแม่ ครู อาจารย์ รวมถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ไม่ได้เอ่ยนามทุกท่าน ที่ได้เมตตาสนับสนุนช่วยเหลือ อบรมสั่งสอนมาจนถึงปัจจุบัน

ภัทรณัฐ อินทวิรัตน์

เมษายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	28
สรุปและข้อเสนอแนะ	47
สรุป	48
ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	49
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก ข้อมูลปริมาณความชื้นสมดุลของซีโอไลต์เอ	54
ภาคผนวก ข ข้อมูลอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอ	58
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	64

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างกัน	21
2	แสดงข้อกำหนดของตัวอย่างซีโอไลต์เอที่ใช้ในการทดลอง	24
3	แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	24
4	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแลงเมียร์และแลงเมียร์-ฟรุนด์ลิช ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C	33
5	สัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C	45
ตารางผนวกที่		
ก1	ข้อมูลผลการตรวจสอบหาปริมาณความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 25°C	55
ก2	ข้อมูลผลการตรวจสอบหาปริมาณความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 35°C	56
ก3	ข้อมูลผลการตรวจสอบหาปริมาณความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 45°C	57

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะ โครงสร้างของซีโอไลต์เอ	6
2	กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอ	7
3	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับปริมาณการดูดซับของก๊าซ (q) แต่ละชนิดที่ความดัน 101.3 KPa และไอน้ำในที่ความดัน 2.24 KPa ในซีโอไลต์ 4A CO ₂ , H ₂ , H ₂ O (Akten <i>et al.</i> , 2003) และ CH ₄ (Mohr <i>et al.</i> , 1999)	8
4	ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ 5 ชนิด	9
5	ไอโซเทอร์มการดูดซับน้ำของซีโอไลต์เอที่ 298 K (1), ซิลิกาเจลที่ 298 K (2), ซีโอไลต์เอที่ 373 K (3), ซิลิกาเจลที่ 373 K (4) และอะลูมินาที่ 298 K (5) ช่วงความดัน 0-26 torr	10
6	ความสัมพันธ์ระหว่าง Φ กับ n_{ads}	13
7	การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับของไอน้ำในอะลูมินา (Al ₂ O ₃) จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 20°C โดยแบบจำลอง ESW และ BET	15
8	การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์ 13X ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณ โดยใช้แบบจำลอง ESW และ L-F ที่อุณหภูมิ 298 308 และ 318K	15
9	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-heptane ในซีโอไลต์ 5A จากแบบจำลอง solid diffusion กับความเข้มข้นของ n-heptane ที่อุณหภูมิ 409, 309, 462 และ 491K	19
10	สัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์ 13X จากการคำนวณโดยแบบจำลอง solid diffusion ที่อุณหภูมิ 298, 308 และ 318K	20

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
11	ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์	26
12	ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C	28
13	ภาพถ่าย SEM แสดงการเกาะกลุ่มกันของผลึกซีโอไลต์เอ (ก) กำลังขยาย 5,030 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,040 เท่า	30
14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลกับอุณหภูมิที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %RH, 75 %RH และ 5.5 %RH	31
15	กราฟแสดงเส้นตรงระหว่าง $\ln \Delta\mu $ กับ n_{ads}	32
16	ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอจากการทดลองและจากแบบจำลอง ESW แลงเมียร์ และ L-F ที่อุณหภูมิ 25°C	34
17	ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอจากการทดลองและจากแบบจำลอง ESW แลงเมียร์ และ L-F ที่อุณหภูมิ 35°C	35
18	แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอจากการทดลองและจากแบบจำลอง ESW แลงเมียร์ และ L-F ที่อุณหภูมิ 45°C	35
19	ผลการทดลองหาความชื้นในซีโอไลต์เอที่เวลาต่างๆ อุณหภูมิ 45°C	36
20	อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นที่ 100 %RH, 75 %RH และ 57.5 %RH อุณหภูมิ 25°C	37
21	อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นที่ 100 %RH, 75 %RH และ 54.5 %RH อุณหภูมิ 35°C	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นที่ 100 %RH, 75 %RH และ 51.5 %RH อุณหภูมิ 45°C	39
23	อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นที่ 100 %RH อุณหภูมิ 45°C (ก), 35°C (ข), 45°C (ค) และ 75 %RH อุณหภูมิ 45°C (ง), 35°C (จ), 45°C (ฉ)	40
24	ปริมาณความชื้นจากการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 25°C	42
25	ปริมาณความชื้นจากการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 35°C	43
26	ปริมาณความชื้นจากการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 45°C	44
27	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอจากการคำนวณโดยแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C	46
ภาพผนวกที่		
ข1	ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 100 %RH อุณหภูมิ 25°C	59
ข2	ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 100 %RH อุณหภูมิ 35°C	59
ข3	ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 100 %RH อุณหภูมิ 45°C	60
ข4	ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 75 %RH อุณหภูมิ 25°C	60
ข5	ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 75 %RH อุณหภูมิ 35°C	61
ข6	ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 75 %RH อุณหภูมิ 45°C	61
ข7	ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 57.5 %RH อุณหภูมิ 25°C	62
ข8	ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 54.5 %RH อุณหภูมิ 35°C	62
ข9	ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 51.5 %RH อุณหภูมิ 45°C	63

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

b	= ค่าคงที่สมดุลของแบบจำลองแลงเมียร์ L-F และ BET
D	= สัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอ ($\mu\text{m}/\text{min}$)
n	= พารามิเตอร์จากแบบจำลอง L-F
n_{ads}	= ปริมาณตัวถูกดูดซับสมดุล (g/g)
n_c	= ปริมาณความชื้นของจุดที่อัตราเร็วของการดูดซับเริ่มลดลง (g/g)
n_{mono}	= ปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดในชั้นแรก (g/g)
P	= ความดัน (kPa)
P^0	= ความดันอ้างอิง (kPa)
P^{sat}	= ความดันไออิ่มตัว (kPa)
q	= ปริมาณตัวถูกดูดซับ (g/g)
\bar{q}	= ปริมาณตัวดูดซับเฉลี่ย (g/g)
q^*	= ปริมาณตัวถูกดูดซับที่สมดุล (g/g)
q_m	= ปริมาณตัวถูกดูดซับชั้นแรก (g/g)
R	= ค่าคงที่ของก๊าซ ($8.314 \text{ J}/\text{mol}\cdot\text{K}$)
r_c	= รัศมีอนุภาค (μm)
T	= อุณหภูมิ (K)
T_{sat}	= อุณหภูมิไออิ่มตัว (K)
t	= เวลา (min)

สัญลักษณ์อักษรกรีก

Φ	= งานพื้นผิวส่วนเกิน (J/g)
μ	= ศักย์เคมี (J/mol)
μ^0	= ศักย์เคมีมาตรฐาน (J/mol)
$\Delta\mu$	= การเปลี่ยนแปลงของศักย์เคมี (J/mol)
$\Delta\mu_0$	= การเปลี่ยนแปลงของศักย์เคมีที่เวลาเริ่มต้น (J/mol)

ลักษณะเฉพาะของการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอเชิงพาณิชย์

Moisture Adsorption Characteristics of Commercial Zeolite A

คำนำ

ซีโอไลต์เอถูกใช้ผสมในผงซักฟอกเพื่อกำจัดความกระด้างของน้ำทดแทนการใช้ฟอสเฟต เนื่องจากฟอสเฟตเป็นสาเหตุทำให้พีชน้ำเติบโตอย่างรวดเร็วส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอมีหลายข้อกำหนด ข้อกำหนดหนึ่งที่สำคัญคือ ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเกี่ยวข้องกับปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) และอัตราเร็วของการดูดซับความชื้น ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตาม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในสิ่งแวดล้อม ข้อมูลปริมาณความชื้นสมดุลและอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นเป็นประโยชน์ในการออกแบบควบคุมกระบวนการผลิตรวมถึงการจัดเก็บเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอที่มีปริมาณความชื้นต่ำ

ปริมาณความชื้นสมดุลเป็นปริมาณความชื้นสูงสุดที่ซีโอไลต์สามารถดูดซับได้ ปริมาณความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ แสดงในรูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้น แบบจำลองที่อธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับมีหลายแบบ (Adolphs, 2007) แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบจำลองที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองอย่างง่าย (Satterfield, 1993) แบบจำลองแลงเมียร์-ฟรุนด์ลิช (Langmuir-Freundlich, L-F) เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลองแลงเมียร์เพื่อใช้ได้กว้างขวางขึ้น Adolphs and Setzer (1996) ได้นำเสนอแบบจำลองงานพื้นผิวส่วนเกิน (Excess surface work, ESW) เพื่ออธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์พื้นผิว ESW สามารถอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนและเป็นผงฟุ้งกระจายได้ดี (Adolphs and Setzer, 1998) Young *et al.* (2001) พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์ 13X อธิบายด้วยแบบจำลอง ESW ได้ดี

อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นกำหนดระยะเวลาก่อนที่ซีโอไลต์จะดูดซับปริมาณความชื้นได้สูงสุด ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอที่มีอัตราเร็วของการดูดซับต่ำจะทำให้ง่ายต่อการควบคุมกระบวนการผลิต การบรรจุ และการขนส่ง แบบจำลองที่นิยมใช้อธิบายอัตราเร็วของการดูดซับโดยทั่วไปได้แก่ แบบจำลองสมดุล (Equilibrium), แบบจำลองการแพร่ในของแข็ง (Solid diffusion)

และแบบจำลองแรงขับเชิงเส้น (Linear driving force, LDF) แบบจำลอง Equilibrium ไม่สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับได้ถูกต้องตามลักษณะทางกายภาพของการดูดซับ (Wu *et al.*, 2008) แบบจำลอง Solid diffusion เป็นแบบจำลองที่มีความยุ่งยากในการคำนวณ (Li and Yang, 1999; Wu *et al.*, 2008 และ Chahbani *et al.*, 2002) Glueckauf and Coates (1947) จึงได้นำเสนอแบบจำลอง LDF ซึ่งพัฒนามาจาก Solid diffusion เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์แบบจำลอง LDF มีความสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการดูดซับ และมีความถูกต้องแม่นยำ จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย (Sircar and Hufton, 2000) เช่น การศึกษาอัตราเร็วของการดูดซับก๊าซในตัวเร่งปฏิกิริยา (Kim *et al.*, 2006; Goto *et al.*, 1990 และ Goto and Hirose, 1991) กระบวนการดูดซับน้ำในซีโอไลต์ (Wu *et al.*, 2008; Gorbach *et al.*, 2004 และ Ribeiro *et al.*, 2008) อัตราเร็วของการดูดซับตามแบบจำลอง LDF ขึ้นกับความแตกต่างระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลกับปริมาณความชื้นในขณะนั้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในตัวอย่าง

งานวิจัยนี้หาปริมาณความชื้นสมดุลและอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอ เปรียบเทียบแบบจำลองแลงเมียร์ L-F และ ESW สำหรับอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้น ทดสอบแบบจำลอง LDF ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นและหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงวิธีการควบคุมกระบวนการผลิตและการจัดเก็บให้ได้ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอที่มีความชื้นต่ำ ตรงตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ โครงการวิจัยนี้เกิดจากความร่วมมือระหว่างภาควิชาวิศวกรรมเคมีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และบริษัท พีคิว เคมีคอลล์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตซีโอไลต์เอรายใหญ่แห่งหนึ่งในประเทศไทย

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. การหาปริมาณความชื้นสมดุลโดยเปรียบเทียบแบบจำลองแลงเมียร์ L-F และ ESW ในการอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้น
2. การหาอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอ ทดสอบแบบจำลอง LDF ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับความชื้น และหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอโดยใช้แบบจำลอง LDF

ขอบเขตการวิจัย

ตัวอย่างซีโอไลต์เอที่ใช้ในการทดลองเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท พีคิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างเป็นไปตามข้อกำหนดทั่วไปของผลิตภัณฑ์ ขอบเขตการวิจัยมีดังนี้

1. ทดลองหาปริมาณความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอที่ช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ 5.5-100 %RH อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C เปรียบเทียบแบบจำลองแลงเมียร์, L-F และ ESW สำหรับอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอ
2. ทดลองหาอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอที่ช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ 50-100%RH อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C ทดสอบแบบจำลอง LDF ในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับความชื้น และหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอตามแบบจำลอง LDF

การตรวจเอกสาร

1. การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับคือ กระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารหนึ่งยึดติดอยู่กับผิวของอีกสารหนึ่ง เช่น การที่โมเลกุลของก๊าซไปเกาะบนผิวของแข็ง สารที่ไปเกาะบนผิวหน้าเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ตัวถูกดูดซับไปเกาะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับสามารถแบ่งออกได้ตามความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ เป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) และการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวดูดซับทำปฏิกิริยากับผิวของตัวถูกดูดซับ โดยการสร้างพันธะเคมี โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกาะบนพื้นผิวได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่ไม่มีการสร้างพันธะเคมี อนุภาคจะเกาะติดกับพื้นผิวด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's Force) การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้ง่ายใช้พลังงานในการทำให้เกิดการดูดซับน้อย สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับอาจจะเกาะบนพื้นผิวตัวดูดซับในลักษณะซ้อนกันหลายชั้น (Multilayer) ได้ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบกับการดูดซับทางกายภาพได้แก่ สมบัติของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และอุณหภูมิ

1.1 สมบัติของตัวดูดซับได้แก่

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุน พื้นที่ผิวดูดซับจะมีมากขึ้นเมื่อรูพรุนมีมาก ความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่ขนาดเล็กก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ หากพีเอชมีค่าต่ำส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่พื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น (Ford, 1998)

1.2 สมบัติของตัวถูกดูดซับได้แก่

น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่มีน้ำหนักและขนาดโมเลกุลเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

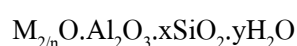
โครงสร้างของตัวถูกดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่มีโครงสร้างเป็นกิ่ง (Brached chain) จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรง (Straight chain) (Ford, 1998)

1.3 อุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปในรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับอ่อนลง (Satterfield, 1993)

2. ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์จัดเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตกับโลหะอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ เช่น โลหะโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) และแคลเซียม (Ca) (Breck, 1974) มีสูตรทางเคมีคือ



เมื่อ n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) โดยมากเท่ากับ 1 และ 2 ของโลหะอัลคาไลน์ หรือ โลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ ตามลำดับ

x คือ จำนวน โมลของ SiO_2 โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

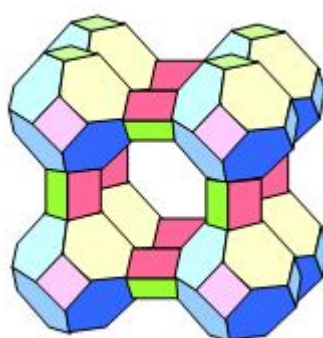
y คือ จำนวน โมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีลักษณะ โครงสร้าง 3 มิติซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างซิลิเกต $[SiO_4]^{4-}$ และ อะลูมิเนต $[AlO_4]^{5-}$ ที่มีลักษณะเป็นทรงสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอนหรือ อะลูมิเนียม อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ โดยอะตอมของออกซิเจน สามารถสร้างพันธะกับ โครงสร้างของซิลิกอนและอะลูมิเนียม โครงสร้างของซีโอไลต์มีลักษณะเป็น รูพรุน มีช่องว่างหรือโพรงที่มีรูปแบบแน่นอน โดยทั่วไปขนาดรูพรุนมีค่าประมาณ 3-10 อังสตรอม

ขนาดของโพรงที่สม่ำเสมอของซีโอไลต์ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติของตะแกรงร่อนโมเลกุล (Molecular sieve) คือยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าโพรงเข้าไปในโครงสร้าง ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าโพรงไม่สามารถผ่านเข้าได้ (Breck, 1974) สมบัติของซีโอไลต์ขึ้นกับลักษณะโครงสร้าง ขนาด รูปร่าง และช่องว่างภายในผลึก รวมไปถึงตำแหน่งของประจุและขนาดของไอออนบวกที่อยู่ในโครงสร้าง (Bhatia, 1990) ซีโอไลต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) การดูดซับ (Adsorption) และการเร่งปฏิกิริยา (Catalysis)

3. ซีโอไลต์เอ

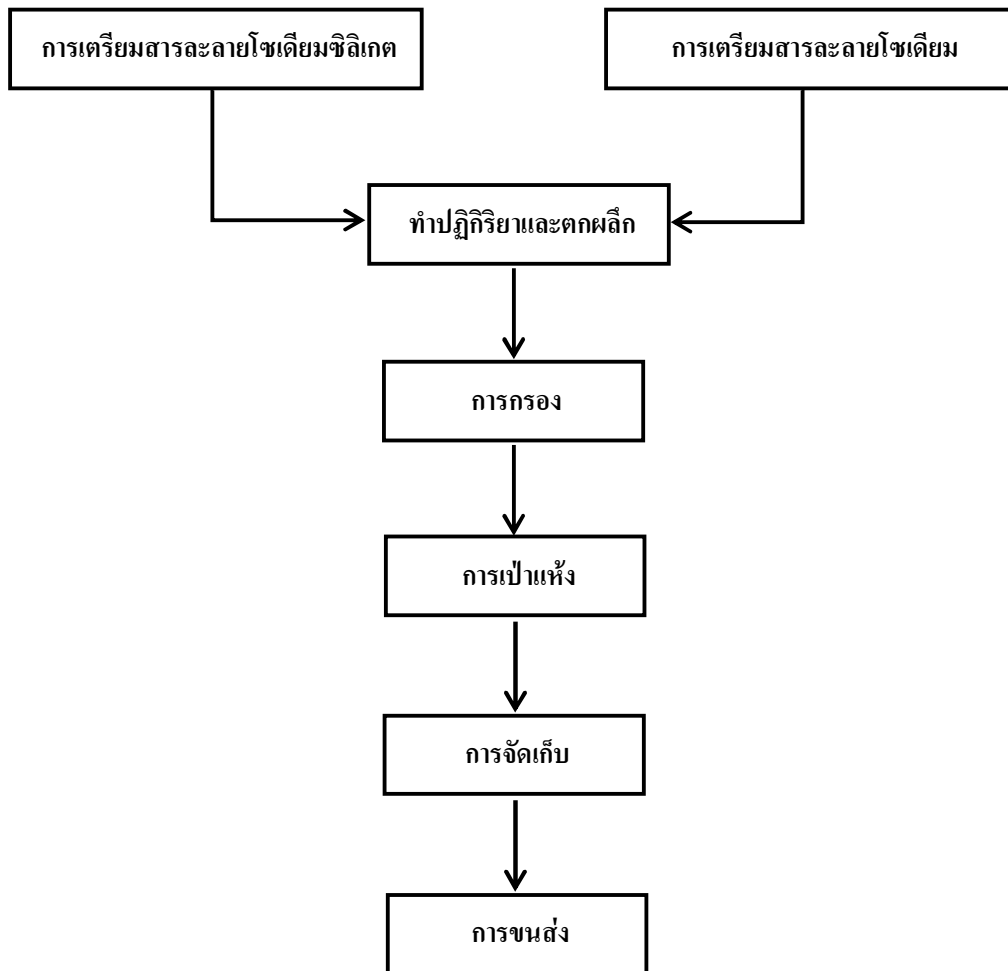
ซีโอไลต์เอมีสูตรโมเลกุล คือ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$ โครงร่างมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม (ภาพที่ 1) ขนาดรูพรุนมีค่าประมาณ 3.5-4.5 อังสตรอม (Bekkum *et al.*, 1991) คุณสมบัติซีโอไลต์เอที่น่าสนใจได้แก่ ความสามารถในการดูดซับน้ำสูง ความหนาแน่นต่ำ พื้นที่ผิวมีค่าสูง มีความเสถียรของโครงสร้างผลึก ขนาดช่องว่างของโมเลกุลมีความสม่ำเสมอ มีความสามารถในการดูดซับก๊าซและไอ มีคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ซีโอไลต์เอถูกนำมาใช้ผสมในผงซักฟอกเพื่อกำจัดความกระด้างของน้ำ โดยโลหะอัลคาไลน์เช่น โซเดียมหรือโพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์เอจะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นสาเหตุทำให้น้ำกระด้าง



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์เอ

ที่มา: Mohamadbeigy *et al.* (2007)

กระบวนการผลิตซีโอไลต์เอในอุตสาหกรรม (ภาพที่2) เริ่มจากกระบวนการเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมอะลูมิเนต โซเดียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับโซเดียมอะลูมิเนตได้เป็นซีโอไลต์เอ ซีโอไลต์เอจะถูกกรองและถูกทำให้แห้งด้วยเครื่องอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอที่ได้จะถูกขนถ่ายด้วยลมไปจัดเก็บเพื่อรอการบรรจุใส่ถุงและขนส่งต่อไป



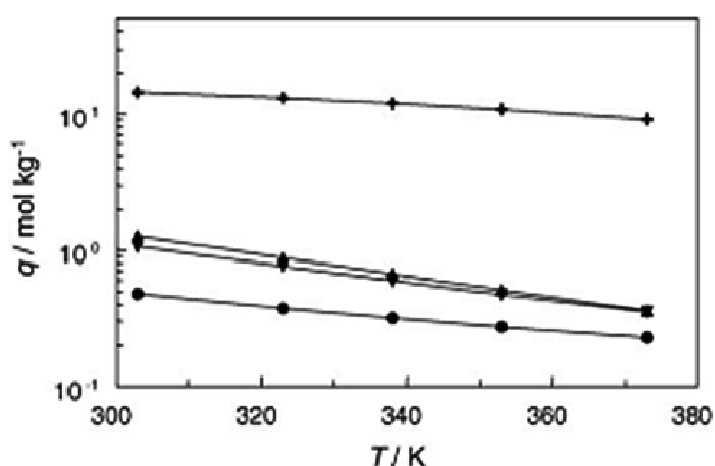
ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอ

ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอมีหลายข้อกำหนด (Specification) เช่น ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ค่าความบริสุทธิ์ ค่าการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน ความเป็นกรดค่า (pH) และ Liquid carry capacity ข้อกำหนดหนึ่งที่สำคัญคือ ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอ ซึ่งจะมากหรือน้อยอยู่ที่สภาพแวดล้อมของซีโอไลต์เอหลังจากการเป่าแห้ง ปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ ขึ้นกับปริมาณความชื้นสูงสุดที่ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอดูดซับได้ (ปริมาณความชื้น

สมดุล) และระยะเวลาก่อนที่ซีโอไลต์เองจะดูดซับความชื้นสูงสุด (อัตราเร็วของการดูดซับ) ข้อมูลของปริมาณความชื้นสมดุลและอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นเป็นประโยชน์ในการออกแบบควบคุมกระบวนการผลิตรวมถึงการจัดเก็บเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอที่มีปริมาณความชื้นต่ำ

4. ปริมาณความชื้นสมดุลในซีโอไลต์เอ

ปริมาณความชื้นสมดุลในซีโอไลต์เอเป็นปริมาณความชื้นสูงสุดที่ซีโอไลต์เอสามารถดูดซับได้ ปริมาณความชื้นสมดุลยังมีส่วนในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในซีโอไลต์เอด้วย ถ้าความแตกต่างระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลกับปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอมีค่ามาก อัตราเร็วของการดูดซับจะมีค่าสูง ปริมาณความชื้นสมดุลมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในสิ่งแวดล้อม Zhu *et al.* (2005) รวบรวมผลการทดลองหาปริมาณความชื้นสมดุลของผลึกซีโอไลต์ 4A พบว่าความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นสมดุลและอุณหภูมิมิมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยปริมาณความชื้นสมดุลมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิ 303K-373K เมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซชนิดอื่น (ภาพที่ 3)



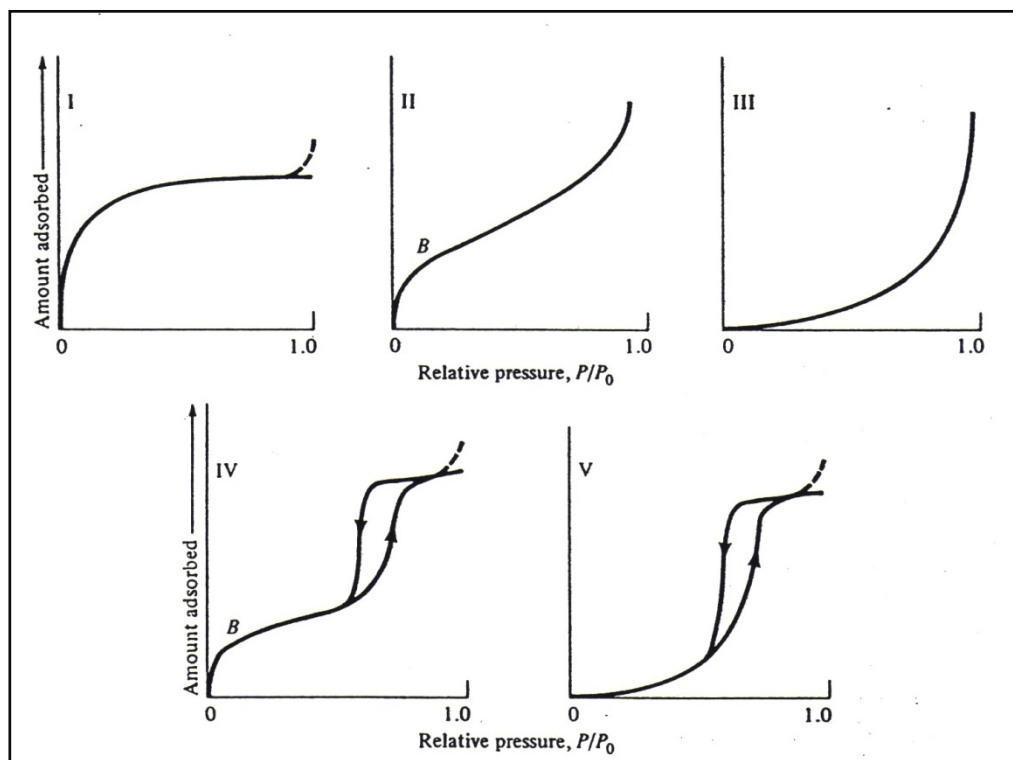
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับ (q) ของก๊าซ CO (▲) H₂ (●) (Akten *et al.*, 2003) และ CH₄ (▼) (Mohr *et al.*, 1999) ที่ความดัน 101.3 kPa และไอน้ำ (+) ที่ความดัน 2.24 kPa ของซีโอไลต์ 4A กับอุณหภูมิ

ที่มา: Zhu *et al.* (2005)

ความสัมพันธ์ในสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อปริมาณความชื้นสมดุลของซีโอไลต์เอ โดยความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูป ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

4.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับทางกายภาพแบ่งเป็น 5 ชนิด (Brunauer *et al.*, 1940) แสดง ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ 5 ชนิด

ที่มา: Satterfield (1993)

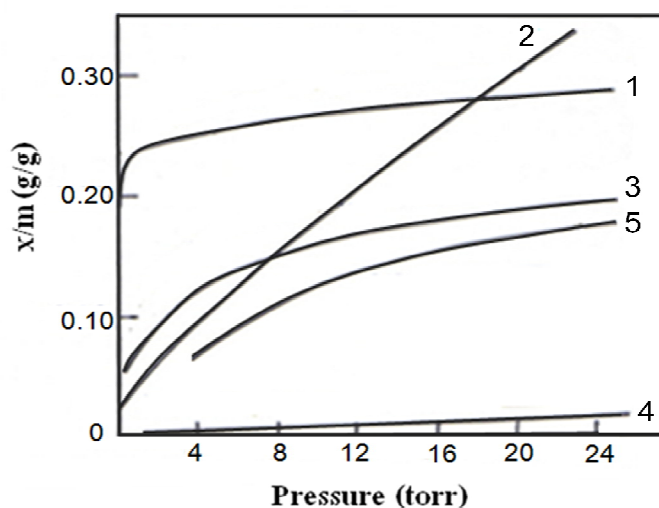
ชนิดที่ I หรือ Langmuir type เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) พบมากในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก (Micropore) เช่น activated carbon ซิลิกาเจล และ ซีโอไลต์

ชนิดที่ II บางครั้งอาจเรียกว่า sigmoid หรือ S-shaped isotherm พบในตัวดูดซับที่มีโครงสร้างแบบที่ไม่มีรูพรุน, มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) หรือ มีช่วงของขนาดรูพรุนกว้างที่จุด B เป็นตำแหน่งที่มีการดูดซับขึ้นเดียวอย่างสมบูรณ์และเริ่มการดูดซับที่เป็นแบบหลายชั้น

ชนิดที่ III เป็นแบบ convex isotherm ที่ไม่มีจุด B เป็นชนิดที่พบได้ยาก จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีแรงดึงดูดที่อ่อน

ชนิดที่ IV พบในตัวถูกดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 nm (Mesopore) ที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำจะมีลักษณะเหมือนกับชนิด II เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นจะเกิดการควบแน่นในรูพรุน (Pore capillary condensation) สามารถนำไปใช้หาการกระจายของรูพรุน (Pore-size distribution)

ชนิดที่ V พบได้ยาก มีลักษณะคล้ายกับชนิดที่ III แต่จะเกิดการควบแน่นในรูพรุนที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับน้ำของซีโอไลต์เอที่ 298 K (1), ซิลิกาเจลที่ 298 K (2), ซีโอไลต์เอที่ 373 K (3), ซิลิกาเจลที่ 373 K (4) และอะลูมินาที่ 298 K (5) ช่วงความดัน 0-26 torr

ที่มา: Breck (1974)

ภาพที่ 5 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับน้ำของซีโอไลต์เอ ซิลิกาเจล และอะลูมินาในช่วงความดัน 0-26 torr อุณหภูมิ 298K และ 373K ไอโซเทอร์มการดูดซับน้ำของซิลิกาเจลมี (เส้นที่ 2 และ 4) ลักษณะเป็นเส้นตรง ไอโซเทอร์มการดูดซับน้ำของซีโอไลต์เอ (เส้นที่ 1 และ 3) และของอะลูมินา (เส้นที่ 5) มีลักษณะเป็นชนิดที่ I เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโค้งไอโซเทอร์มของซีโอไลต์เอ ที่อุณหภูมิ 298K กับ 373K พบว่าความดันส่งผลกระทบต่อปริมาณความชื้นเล็กน้อยในช่วงความดัน 2-24 torr ที่อุณหภูมิ 298K (เส้นที่ 1) และความดันส่งผลกระทบต่อปริมาณความชื้นเล็กน้อยในช่วงความดัน 6-24 torr ที่อุณหภูมิ 373K (เส้นที่ 3)

4.2 แบบจำลองของไอโซเทอร์มการดูดซับ

แบบจำลองที่อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับมีหลายแบบ (Adolphs, 2007) แต่ละแบบมีข้อจำกัดในการนำไปใช้แตกต่างกันขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของการดูดซับ

1. แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir)

แบบจำลองแลงเมียร์เป็นแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Ruthven, 1984) แสดงดังนี้

$$\frac{n_{ads}}{n_{mono}} = \frac{bP}{1+bP} \quad (1)$$

เมื่อ n_{ads} คือปริมาณตัวถูกดูดซับ n_{mono} คือปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดในชั้นแรก b คือค่าคงที่สมดุล จัดสมการที่ (1) ในรูปเส้นตรงได้

$$\frac{P}{n_{ads}} = \frac{1}{n_{mono} b} + \frac{P}{n_{mono}} \quad (2)$$

n_{mono} และ b คำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกนตั้งของกราฟเส้นตรงระหว่าง P/n_{ads} และ P

2. แบบจำลองแลงเมียร์-ฟรอนด์ลิช (Langmuir-Freundlich, L-F)

แบบจำลอง L-F พัฒนามาจากแบบจำลองแลงเมียร์เพื่อใช้ได้กว้างขวางขึ้น โดยเพิ่มพารามิเตอร์ n ในสมการ

$$\frac{n_{ads}}{n_{mono}} = \frac{bP^n}{1+bP^n} \quad (3)$$

พารามิเตอร์ b , n_{mono} และ n คำนวณโดยวิธีวิเคราะห์เชิงถดถอยซึ่งมีค่ากำลังสองน้อยที่สุดเป็นเกณฑ์

3. แบบจำลองงานพื้นผิวส่วนเกิน (Excess surface work, ESW)

แบบจำลอง ESW ถูกนำเสนอโดย Adolphs and Setzer (1996) เพื่ออธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับแบบหลายชั้นโดยใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์พื้นผิว ESW สามารถอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุที่มีรูพรุนและเป็นผงฟุ้งกระจายได้ดี (Adolphs and Setzer, 1998) ที่สภาวะสมดุล ศักย์เคมีของก๊าซที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว (μ_{ads}) และที่อยู่ในวัฏภาคก๊าซมีค่าเท่ากัน จึงเขียนได้ดังนี้

$$\mu_{ads} = \mu_g = \mu_g^0 + RT \ln(P/P^0) \quad (4)$$

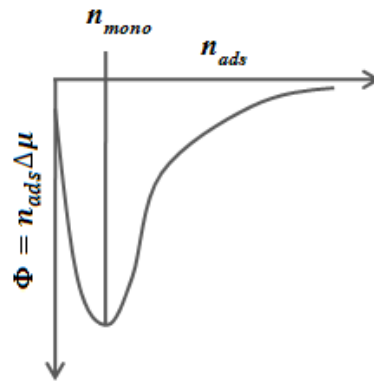
μ_g^0 คือศักย์เคมีมาตรฐานของสถานะที่เป็นไอ (Vapor phase) หรือศักย์เคมีที่ความดันอ้างอิง (P^0) Adolphs and Setzer (1995) สมมติให้ความดันไออิ่มตัว (P^{sat}) เป็นความดันอ้างอิง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงศักย์เคมีเป็นดังนี้

$$\Delta\mu = RT \ln\left(\frac{P}{P^{sat}}\right) \quad (5)$$

งานพื้นผิวส่วนเกิน (Φ) ถูกกำหนดโดยผลคูณของปริมาณตัวถูกดูดซับ (n_{ads}) กับการเปลี่ยนแปลงศักย์เคมี ($\Delta\mu$) ดังนี้

$$\Phi = n_{ads}\Delta\mu \quad (6)$$

Φ มีค่าเป็นลบ เมื่อ n_{ads} ถูกกำหนดให้มีค่าเป็นบวก



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Φ กับ n_{ads}

ที่มา: Adolphs and Setzer (1996)

ภาพที่ 6 แสดง Φ ที่ขึ้นกับ n_{ads} Φ มีค่าเป็นศูนย์เมื่อไม่เกิดการดูดซับ ($n_{ads}=0$) และเมื่อความดันเท่ากับความดันไออิ่มตัว ($n_{ads} \rightarrow \infty$) Φ มีจุดที่ต่ำที่สุดระหว่างสองจุดนี้ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่จุดต่ำสุดนี้คือปริมาณตัวถูกดูดซับที่ชั้นแรก (n_{mono}) ผลของการเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ที่ $n_{ads} = n_{mono}$ แสดงดังนี้

$$d\Phi = \Delta\mu \cdot dn_{ads} + n_{ads} \cdot d(\Delta\mu) = 0 \quad (7)$$

อินทิเกรตและจัดรูปสมการเส้นตรงได้

$$\ln|\Delta\mu| = -\frac{1}{n_{mono}} n_{ads} + \ln|\Delta\mu_0| \quad (8)$$

เมื่อ n_{mono} คือปริมาณตัวถูกดูดซับชั้นแรก $\Delta\mu_0$ คือการเปลี่ยนแปลงของศักย์เคมีที่เวลาเริ่มต้นของการดูดซับ พารามิเตอร์ n_{mono} และ $|\Delta\mu_0|$ คำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกนตั้ง ของเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln|\Delta\mu|$ กับ n_{ads} ดังนั้นไอโซเทอร์มการดูดซับคำนวณได้โดย

$$n_{ads} = -n_{mono} \cdot \ln \left| \frac{\Delta\mu}{\Delta\mu_0} \right| \quad (9)$$

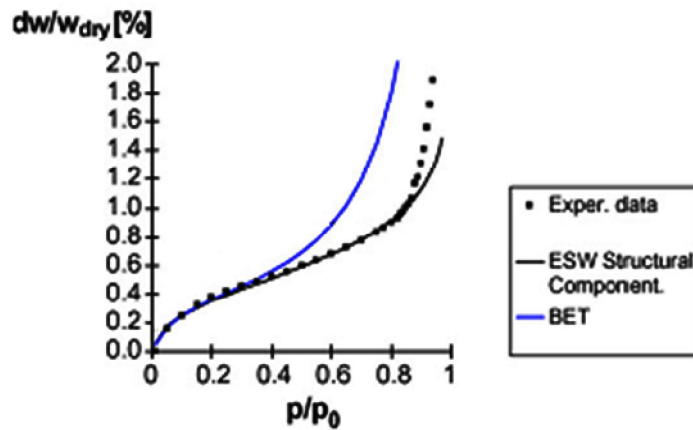
4. แบบจำลอง Brunauer-Emmett-Teller (Brunauer-Emmett-Teller, BET)

แบบจำลอง BET พัฒนามาจากแบบจำลองแลงเมียร์สำหรับอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบหลายชั้น ใช้อธิบายการดูดซับได้ดีในช่วงความดันสัมพัทธ์ 0.05-0.35 (Ruthven, 1984 and Satterfield, 1993) สมการ BET แสดงดังนี้

$$\frac{n_{ads}}{n_{mono}} = \frac{b (P/P^{sat})}{(1-P/P^{sat})(1-P/P^{sat}+bP/P^{sat})} \quad (10)$$

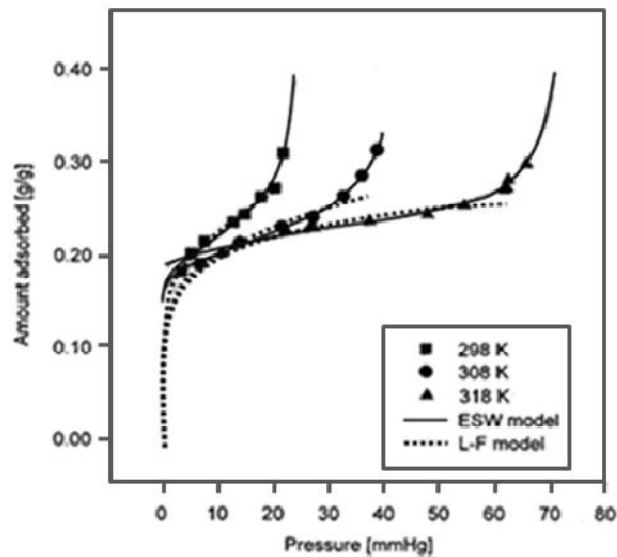
n_{ads} คือปริมาณตัวถูกดูดซับ n_{mono} คือปริมาณตัวถูกดูดซับสูงสุดในชั้นแรก b คือค่าคงที่สมดุล และ P^{sat} คือความดันไออิ่มตัว

แบบจำลองสำหรับอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยทั่วไปเช่น แลงเมียร์ L-F และ BET สามารถอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับได้ดีเป็นบางช่วงความชื้นสัมพัทธ์เท่านั้น (Adolphs and Zetzer, 1996) Adolphs (2007) แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองสำหรับอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับระหว่างแบบจำลอง ESW กับแบบจำลอง BET (ภาพที่ 7) และพบว่าแบบจำลอง ESW สามารถอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับได้ดีกว่ากับแบบจำลอง BET ตลอดช่วงความดันสัมพัทธ์ที่ทดลอง Young *et al.* (2001) พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นในซีโอไลต์ 13X มีลักษณะเป็นไอโซเทอร์มชนิด II (ภาพที่ 8) แบบจำลอง L-F ให้ค่าปริมาณความชื้นสมดุลต่ำกว่าการทดลองในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่มีค่าสูง แต่แบบจำลอง ESW สามารถอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นได้ครอบคลุมตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่ทดลอง (15-90 %RH) มากกว่าแบบจำลอง L-F



ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับของไอน้ำในอะลูมินา (Al_2O_3) จากการทดลองกับการคำนวณที่อุณหภูมิ 20°C โดยแบบจำลอง ESW และ BET

ที่มา: Adolphs (2007)



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์ 13X ที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง ESW และ L-F ที่อุณหภูมิ 298, 308 และ 318K

ที่มา: Young *et al.* (2001)

5. อัตราเร็วของการดูดซับความชื้น

แบบจำลองสำหรับอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับที่รู้จักโดยทั่วไปได้แก่ แบบจำลองสมดุล (Equilibrium), การแพร่ในของแข็ง (Solid diffusion) และแรงขับเชิงเส้น (Linear driving force) (Wu *et al.*, 2009) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองสมดุล (Equilibrium)

แบบจำลองสมมติให้ไม่มีความต้านทานของการแพร่ วัฏภาคของก๊าซและของแข็งอยู่ในสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ปริมาณตัวถูกดูดซับขึ้นกับความดันของก๊าซและอุณหภูมิตัวดูดซับเท่านั้น แบบจำลองแสดงดังนี้

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial q^*}{\partial t} \quad (11)$$

q คือปริมาณตัวถูกดูดซับ และ q^* คือปริมาณตัวถูกดูดซับที่สมดุล โดยคำนวณได้จากสมการ Dubinin-Astakhov ประยุกต์ (Chabani *et al.*, 2002) ดังนี้

$$q^* = q_0 \exp\left(-K \left(\frac{T}{T_{sat}} - 1\right)^n\right) \quad (12)$$

q_0 คือปริมาณการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว K และ n คือพารามิเตอร์ของการดูดซับ ขึ้นกับลักษณะของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ T คืออุณหภูมิตัวดูดซับ และ T_{sat} คืออุณหภูมิอิ่มตัว

การแพร่ของก๊าซในรูพรุนของตัวดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดได้ช้า วัฏภาคของก๊าซและของแข็งไม่สามารถเข้าสู่สมดุลได้ทันที ต้องใช้ช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งขึ้นกับลักษณะของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ดังนั้นแบบจำลองสมดุลจึงไม่ได้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับตามลักษณะทางกายภาพของการดูดซับที่เกิดขึ้นจริง

2. แบบจำลองการแพร่ในของแข็ง (Solid diffusion)

แบบจำลองสมมติให้การถ่ายเทความร้อนเกิดอย่างรวดเร็ว ไม่เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอนุภาคกับสิ่งแวดล้อมและอนุภาคตัวดูดซับมีลักษณะเป็นทรงกลม สมการอธิบายการแพร่ของตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นทรงกลมแสดงดังนี้

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (13)$$

q คือปริมาณตัวถูกดูดซับ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในผลึก t คือเวลา และ r คือรัศมี เมื่อปริมาณตัวดูดซับเฉลี่ยคือ

$$\bar{q} = \frac{3}{r_c^3} \int_0^{r_c} q(r, t) r^2 dr \quad (14)$$

r_c คือรัศมีของอนุภาค ที่สภาวะขอบ $t = 0, q = 0$; $t > 0, q(t, r_c) = q^*$ ผลเฉลยของสมการที่ 14 (Cooper, 1965) แสดงดังนี้

$$\bar{q} = q^* - 6q^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\pi)^2} \exp(-n\pi)^2 \frac{Dt}{r_c^2} \quad (15)$$

อัตราเร็วของการดูดซับเฉลี่ยภายในอนุภาคแสดงดังนี้

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 6q^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D}{r_c^2} \exp\left(-n\pi)^2 \frac{Dt}{r_c^2}\right) \quad (16)$$

สมการที่ 16 เป็นอนุกรมอนันต์ลู่เข้าอย่างช้าๆ ซึ่งมีความยุ่งยากในการคำนวณ

3. แบบจำลองแรงขับเชิงเส้น (Linear driving force, LDF)

LDF พัฒนามาจากแบบจำลอง Solid diffusion เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ Glueckauf and Coates (1947) เสนอแบบจำลอง LDF สำหรับหาอัตราเร็วของการดูดซับดังนี้

$$\frac{d\bar{q}}{dt} = k(q^* - \bar{q}) \quad (17)$$

\bar{q} คือปริมาณตัวถูกดูดซับเฉลี่ยที่เวลา t q^* คือปริมาณตัวถูกดูดซับที่สมดุล และ k คือค่าคงที่สำหรับตัวดูดซับ และมีค่าเท่ากับ $15D/r_c^2$ (Glueckauf, 1955) อัตราเร็วของการดูดซับคำนวณได้โดย

$$\frac{d\bar{q}}{dt} = \frac{15D}{r_c^2} (q^* - \bar{q}) \quad (18)$$

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่และ r_c คือรัศมีของอนุภาคตัวถูกดูดซับเฉลี่ย

LDF เป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ มีความสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการดูดซับ และมีความถูกต้องแม่นยำสูง (Sircar and Hufton, 2000) LDF ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการอธิบายอัตราเร็วของการดูดซับน้ำในซีโอไลต์ (Wu *et al.*, 2009; Gorbach *et al.*, 2004 และ Young *et al.*, 2001)

ซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ผ่านเข้าไปใน รูพรุนจะถูกขัดขวางด้วยแรงผลักระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลในโครงสร้างของซีโอไลต์เอส่งผลให้การแพร่เกิดได้ช้า สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าต่ำ โดยทั่วไปมีค่าประมาณต่ำกว่า $10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Ruthven, 1984) ค่าที่แท้จริงนั้นถูกกำหนดโดยหลายปัจจัยดังนี้

1. ขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

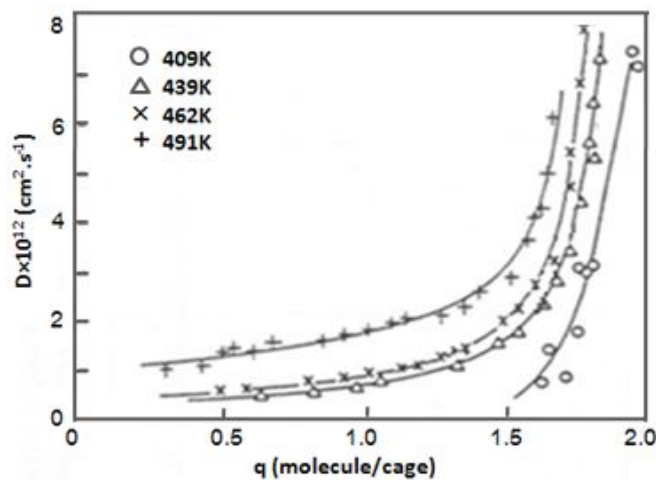
สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะเกิดการแพร่ได้เร็วกว่าสารโมเลกุลใหญ่ เนื่องจากตัวถูกดูดซับที่โมเลกุลมีขนาดเล็กสามารถแทรกไปในรูพรุนของซีโอไลต์ได้ดีกว่าสารโมเลกุลใหญ่ สารโมเลกุลเล็กจึงแพร่ได้ดี

2. อุณหภูมิ

ในขณะที่อุณหภูมิสูง โมเลกุลของสารมีพลังงานจลน์มากขึ้น ทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ การแพร่จึงเกิดขึ้นได้เร็ว

3 ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย

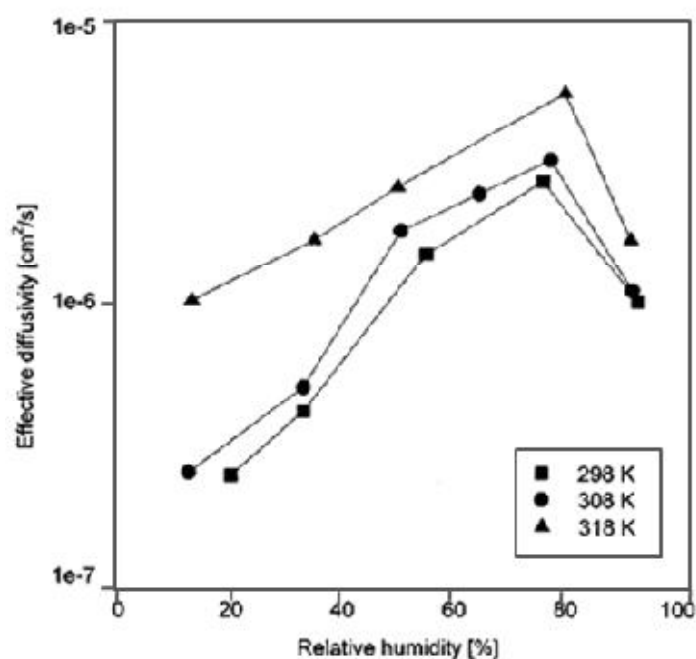
การแพร่เกิดได้เร็วเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีค่าสูง เนื่องจากโมเลกุลมีโอกาสชนและกระแทกกันมากทำให้โมเลกุลแพร่เข้าไปในรูพรุนได้เร็วขึ้น



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-heptane ในซีโอไลต์ 5A จากแบบจำลอง solid diffusion กับความเข้มข้นของ n-heptane ที่อุณหภูมิ 409K (○) 439K (△) 462K (×) และ 491K (+)

ที่มา: Doetsch *et al.* (1973)

ภาพที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-heptane จากแบบจำลอง solid diffusion กับความเข้มข้นของ n-heptane ที่อุณหภูมิ 409, 439, 462 และ 491K มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ในช่วงความเข้มข้นของ n-heptane ประมาณ 0.3-1.5 molecule/cage ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิ 409, 439 และ 462K ค่อยๆสูงขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น จากนั้นในช่วงความเข้มข้นของ n-heptane ประมาณ 1.5-2 molecule/cage ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิ 409, 439, 462 และ 491K สูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามความเข้มข้นของ n-heptane ที่สูงขึ้น



ภาพที่ 10 สัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์ 13X จากการคำนวณโดยแบบจำลอง solid diffusion ที่อุณหภูมิ 298, 308 และ 318K

ที่มา: Young *et al.* (2001)

ภาพที่ 10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์ 13X จากแบบจำลอง solid diffusion ที่อุณหภูมิ 298, 308 และ 318K ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 15-90 %RH สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงตามความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น แต่สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงประมาณ 80 %RH การลดลงของสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงเนื่องจากเกิดการควบแน่นในรูพรุน (Pore capillary condensation) (Young *et al.*, 2001) เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นและมีค่าสูงมากที่อุณหภูมิ 318K

วิธีควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในการทดลอง

วิธีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ทำได้โดยการควบคุมปริมาณไอน้ำในอากาศโดยใช้เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Togrul and Arslan, 2006 และ Dawoud and Aristov, 2003) หรือใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว (Kumar *et al.*, 2005; Ariahu *et al.*, 2006; Young *et al.*, 2001 และ Sanni *et al.*, 1997) การควบคุมปริมาณไอน้ำโดยใช้เครื่องกำเนิดไอน้ำต้องใช้อุปกรณ์หลายชนิดทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง งานวิจัยนี้จึงใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ สารละลายอิ่มตัวของเกลือแต่ละชนิดให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกันที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างกัน

สารละลายเกลืออิ่มตัว	อุณหภูมิ (°C)								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)								
ZnCl ₂	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
NaOH	8.5	8.0	7.5	7.0	7.0	7.0	6.6	6.6	6.3
LiCl	14.5	14.0	13.5	13.0	11.5	11.5	11.0	11.0	11.0
KC ₂ H ₃ O ₂	25.5	25.0	25.0	25.0	22.0	22.0	22.0	20.0	19.5
MgCl ₂	34.0	33.0	32.8	32.5	32.5	32.5	32.0	31.5	31.5
NaI	38.0	38.0	38.0	38.0	36.0	34.0	32.5	-	29.0
K ₂ CO ₃	47.0	44.0	-	43.0	-	41.5	41.0	41.0	41.0
KNO ₂	49.0	48.5	48.5	47.5	47.0	46.5	46.0	-	-
NaBr	63.9	61.0	-	57.5	-	54.5	53	51.5	49.5
NaNO ₂	66.0	66.0	65.5	64.0	63.0	62.0	61.5	61.0	60.0
NaCl	75.5	75.5	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	74.5

ที่มา: Hong *et al.* (2002)

ชนิดของเกลือที่เหมาะสมในการทดลองคือ ZnCl_2 , $\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$, K_2CO_3 , NaBr , NaNO_2 , NaCl , KCl และ KNO_3 เนื่องจากครอบคลุมช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่ต้องการและที่อุณหภูมิในการทดลอง 25, 35 และ 45°C เกลือแต่ละชนิดให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่ต่างกันมาก

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (ออกแบบโดยผู้วิจัย) (ภาพที่ 11) ทำจากอะคริลิก ตู้ทดลองมี 2 ชั้น ชั้นนอกกว้าง 45 ซม. ยาว 70 ซม. และสูง 35 ซม. ชั้นในกว้าง 30 ซม. ยาว 50 ซม. และสูง 30 ซม.
2. ตู้อบ (Hot oven air) รุ่น ED 53 ผลิตโดยบริษัท ED binder
3. ชุดเครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ
4. โถดูดความชื้น (Desicator)
5. อุปกรณ์ให้ความร้อนที่มีกำลัง 500 และ 25 วัตต์
6. เครื่องให้ความร้อนและกวนแบบแท่งแม่เหล็ก
7. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204-S ผลิตโดยบริษัท METTLER TOLEDO
8. เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Hygrometer) รุ่น 608-H1 ผลิตโดยบริษัท TESTO
9. งานแก้วสำหรับวางตัวอย่าง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 1.3 ซม.) และฝาปิด
10. ภาชนะพลาสติกปิดสนิท (เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 8 ซม.)
11. ภาชนะใส่สารละลายเกลืออิ่มตัว (เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 5 ซม.) ทำจากสแตนเลส
12. คอมพิวเตอร์

สารเคมี

1. ผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอกจากบริษัท พีคิว เคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดของตัวอย่างซีโอไลต์เอที่ใช้ในการทดลอง

ข้อกำหนด	ค่า
ความบริสุทธิ์ (% ซีโอไลต์เอ)	100
ความหนาแน่นรวม (กรัม/ลิตร)	319
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	3.79
ความสามารถในการดูดซับของเหลว (กรัม/กรัม)	32.7
ความเป็นด่าง (pH)	11.14
ปริมาณความชื้น (%)	3.89

2. สารเคมีที่ใช้ในการทำละลายเกลืออิมตัวแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	Grade	บริษัท, ประเทศ
KNO_3	Analytical	Nuplex, Australia
KCl	Laboratory	Nuplex, Australia
NaNO_2	Analytical	Ajax Finechem Pty, Australia
NaBr	Laboratory	Nuplex, Australia
K_2CO_3	Laboratory	Nuplex, Australia
$\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$	Laboratory	Nuplex, Australia
ZnCl_2	Laboratory	APS, Australia

วิธีการ

การทดลองมี 2 ส่วน ได้แก่ การทดลองหาไอโซเทอร์มการดูดซับและการทดลองอัตราเร็วการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอ

1.การทดลองหาไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้น

การหาไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอมีวิธีการทดลองดังนี้

1.1. การเตรียมสถานะความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิสำหรับการทดลอง

นำภาชนะพลาสติกปิดสนิทซึ่งภายในบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไว้ในตู้อบจนกระทั่งอุณหภูมิและความชื้นภายในภาชนะคงที่

1.2. การเตรียมตัวอย่างซีโอไลต์เอก่อนการทดลอง

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอน้ำหนัก 1 กรัมวางบนจานแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. เคาะเบาๆให้ตัวอย่างกระจายทั่วจานแก้ว โดยตัวอย่างมีความสูงประมาณ 2 มม. นำไปอบพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 12 ชม. เมื่อเปิดตู้อบปิดฝาของจานแก้วที่ใส่ตัวอย่างทันที นำมาชั่งและบันทึกน้ำหนัก โดยปกติการชั่งน้ำหนักของวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงจะทำให้น้ำหนักไม่คงที่ เพราะความร้อนจากวัตถุที่ชั่งจะส่งผลให้อากาศร้อนลอยตัวขึ้นสูง และอากาศที่เย็นกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่ กระแสของอากาศเย็นจะดันวัตถุขึ้น ทำให้ชั่งวัตถุได้น้อยกว่าค่าจริง แต่เนื่องจากซีโอไลต์เอเป็นสารที่มีคุณสมบัติของการดูดซับ สามารถดูดซับความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ในการทดลองจึงต้องตรวจวัดน้ำหนักโดยเร็วเพื่อให้ซีโอไลต์เอดูดซับความชื้นในบรรยากาศได้น้อยที่สุด

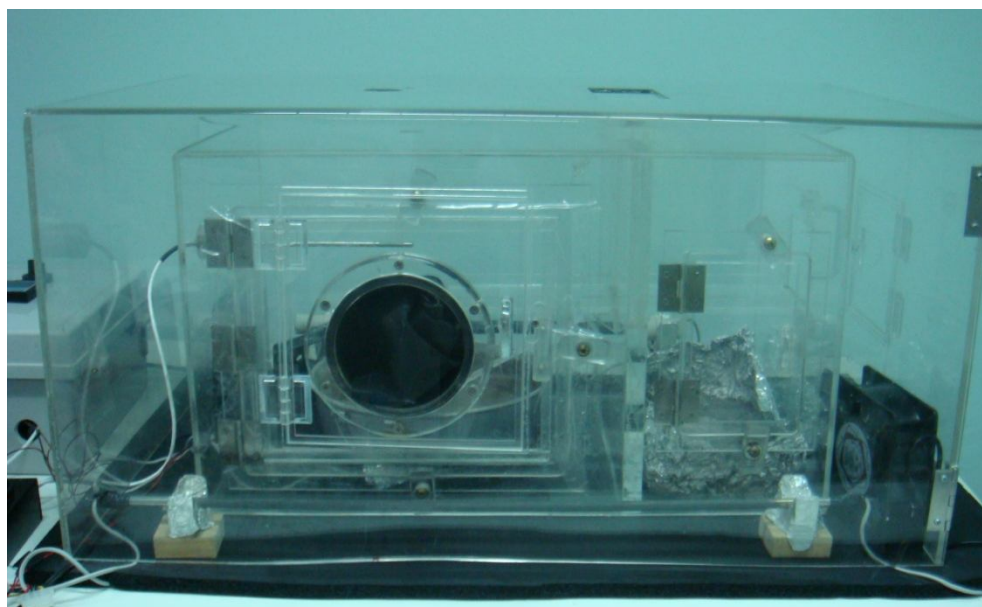
1.3. การทดลอง

นำตัวอย่างซีโอไลต์เอจากข้อ 1.2 มาวางในภาชนะพลาสติกปิดสนิทที่เตรียมไว้ในข้อ 1.1 จากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบ นำตัวอย่างออกมาชั่งทุก 12 ชม. และบันทึกน้ำหนัก จนตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่

2.การทดลองหาอัตราเร็วการดูดซับความชื้น

2.1 การออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์การทดลอง

การทดลองหาอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอทำได้โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สถานะความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิคงที่ ในการทดลองตัวอย่างถูกวางบนตะแกรงที่แขวนอยู่กับเครื่องชั่งน้ำหนักที่วางอยู่เหนือตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์ที่ต่อเข้ากับเครื่องชั่งน้ำหนักบันทึกค่าน้ำหนักตัวอย่างตลอดช่วงการทดลอง ตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ (ภาพที่ 11) มี 2 ชั้นทำจากอะคริลิกซึ่งมีลักษณะโปร่งใสสามารถมองเห็นภายในได้ ตู้ชั้นในมีขนาดกว้าง 30 ซม. ยาว 50 ซม. และสูง 30 ซม. ภายในบรรจุภาดใส่สารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ตู้ชั้นนอกมีขนาดกว้าง 45 ซม. ยาว 70 ซม. และสูง 35 ซม. อุณหภูมิในตู้ถูกควบคุมโดยอุปกรณ์ให้ความร้อน 2 ชุด ซึ่งติดตั้งไว้ภายในตู้ชั้นในและชั้นนอก เพื่อให้อุณหภูมิในการทดลองมีความสม่ำเสมอและป้องกันการเกิดฝ้าภายในผนังตู้ชั้นใน



ภาพที่ 11 ตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ

2.2 วิธีการทดลองหาอัตราเร็วการดูดซับความชื้น

อัตราเร็วการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จะถูกตรวจสอบโดยใช้ผู้ควบคุม อุณหภูมิและความชื้น การทดลองหาอัตราเร็วการดูดซับมีขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมสถานะความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิสำหรับการทดลอง

เปิดเครื่องทำความร้อนในตู้ชั้นนอก แล้วจึงเปิดเครื่องทำความร้อนใต้ถาดน้ำเกลือเพื่อ ป้องกันการเกิดฝ้าภายในตู้ชั้นใน ทิ้งไว้จนกว่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในตู้คงที่

2. การทดลอง

เตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ได้ตามข้อ 1.2 จากนั้นวางในโถดูดความชื้นเพื่อลด อุณหภูมิตัวอย่างให้เท่ากับอุณหภูมิในการทดลองซึ่งได้แก่ 45, 35 และ 25°C จากนั้นนำตัวอย่างวาง ในตะแกรงภายในตู้ทดลอง เปิดฝาตัวอย่าง คอมพิวเตอร์ที่ต่อเข้ากับเครื่องชั่งน้ำหนักจะบันทึก น้ำหนักของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น

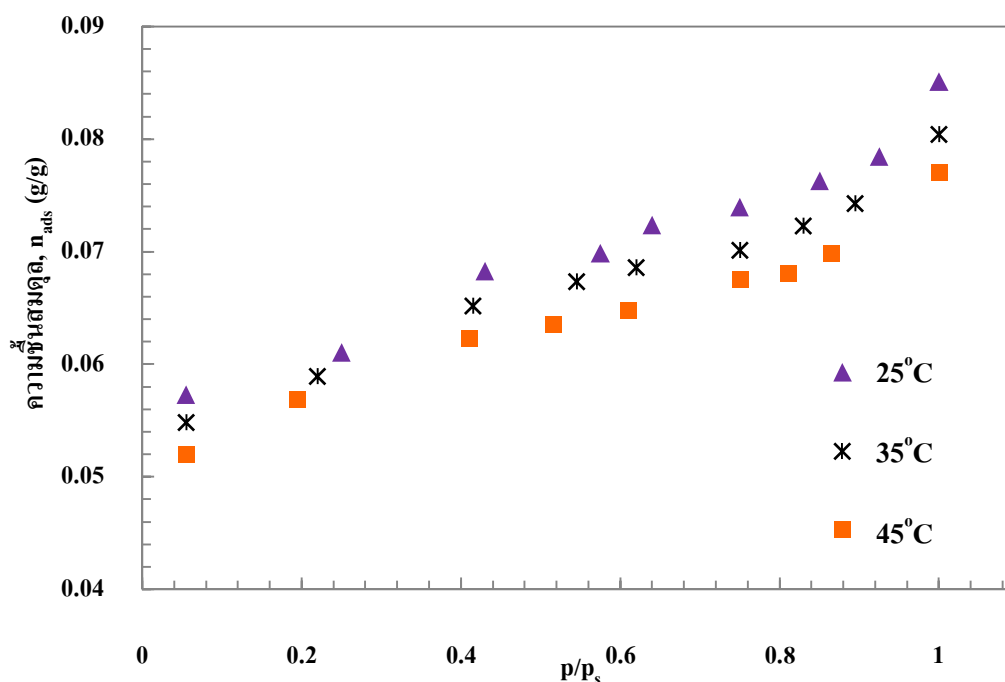
ผลและวิจารณ์

1. ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้น

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุล ($n_{ads, g}$ ของน้ำที่ดูดซับ/ g ของน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง) กับค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P_s) แสดงในภาพที่ 12 โดยค่าความดันสัมพัทธ์มีความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ดังนี้

$$\%RH = \frac{P}{P_s} \times 100 \quad (19)$$

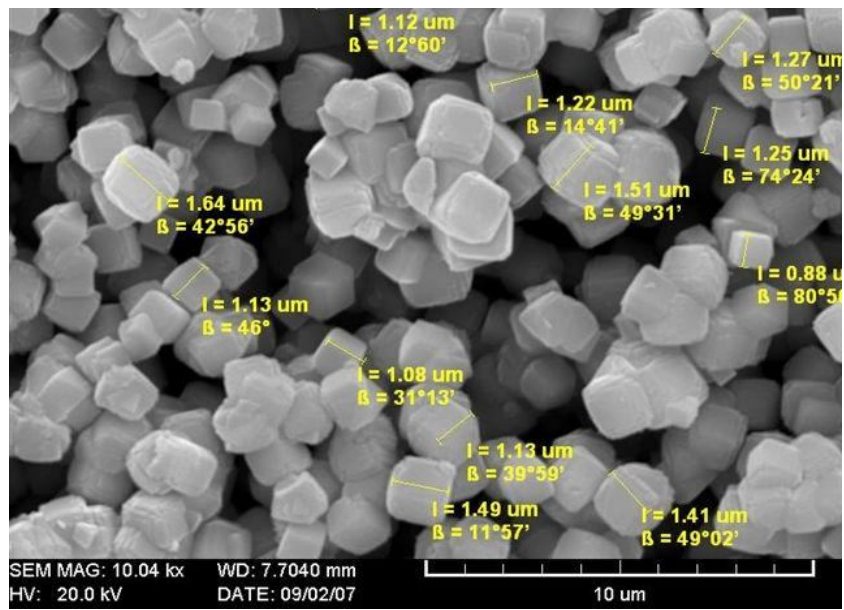
ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 7 ซ้ำ ค่าที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้งและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ก



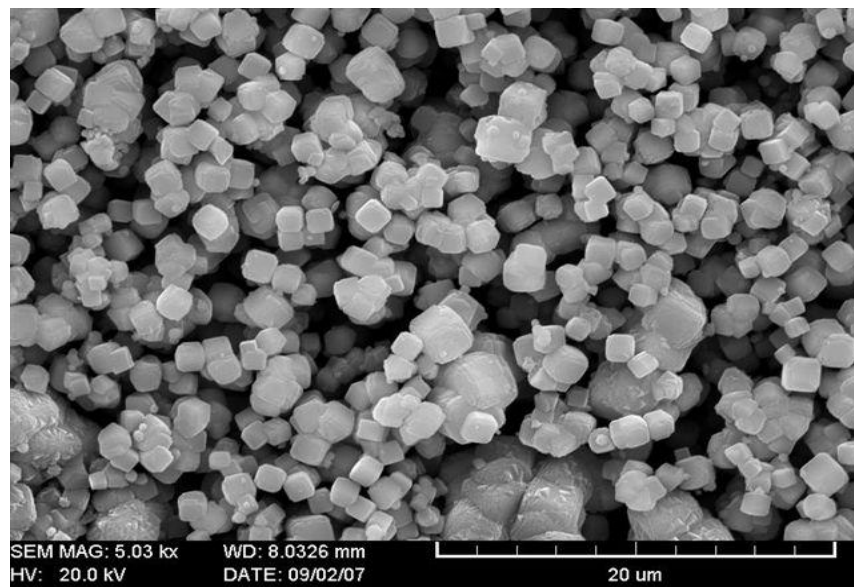
ภาพที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C

ภาพที่ 12 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C เมื่อ $P/P_s=1$ (100 %RH) n_{ads} มีค่าเท่ากับ 0.0851 g/g (8.51%), 0.0804 g/g (8.04%) และ 0.0771 g/g (7.71%) ตามลำดับ ค่า n_{ads} ลดลงตามการลดลงของ P/P_s เมื่อ P/P_s มีค่าลดลงจนถึง 0.055 (5.5 %RH) ค่า n_{ads} เท่ากับ 0.0573 (5.73%), 0.0548 (5.48%) และ 0.0520 (5.20%) ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C ตามลำดับข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าในการควบคุมปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอที่มีปริมาณความชื้นต่ำเช่น 5% เราไม่สามารถทำเพียงการจัดเก็บในบรรยากาศที่รักษาระดับของความชื้นสัมพัทธ์ได้ เพราะความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิสูงถึง 45°C ก็ยังมีค่าเกิน 5% ดังนั้นการควบคุมความชื้นในผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอต้องเริ่มตั้งแต่ผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องอบแห้ง โดยการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ การขนถ่ายผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอด้วยลมหลังออกจากเครื่องอบแห้งเพื่อไปจัดเก็บ ลมที่นำมาใช้ในการขนส่งควรเป็นลมที่มีความชื้นต่ำ เพื่อให้ซีโอไลต์เอดูดซับความชื้นได้น้อยที่สุดก่อนถึงการบรรจุ นอกจากนั้นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอต้องสามารถป้องกันไม่ให้ความชื้นผ่านเข้าได้

ลักษณะไอโซเทอร์มที่แสดงในภาพที่ 12 เป็นไอโซเทอร์มชนิดที่ II ซึ่งเป็นลักษณะไอโซเทอร์มของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ หรือมีรูพรุนหลายขนาด (Ruthven, 1984) ลักษณะของอนุภาคซีโอไลต์เอในงานวิจัยนี้แสดงโดยภาพถ่าย SEM ในภาพที่ 13 กำลังขยาย 10,040 เท่า (ก) และกำลังขยาย 5,080 เท่า (ข) ขนาดของผลึกซีโอไลต์เอส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 0.88-1.64 μm แต่ผลึกซีโอไลต์เอเกิดการเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น บางก้อนมีขนาดใหญ่ถึงประมาณ 8 μm (ภาพที่ 13ข) การเกาะกลุ่มกันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึกและช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มีหลากหลายขนาด โมเลกุลของน้ำถูกดูดซับผ่านช่องว่างเหล่านี้ จึงทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอกับความดันสัมพัทธ์มีลักษณะเป็นชนิดที่ II

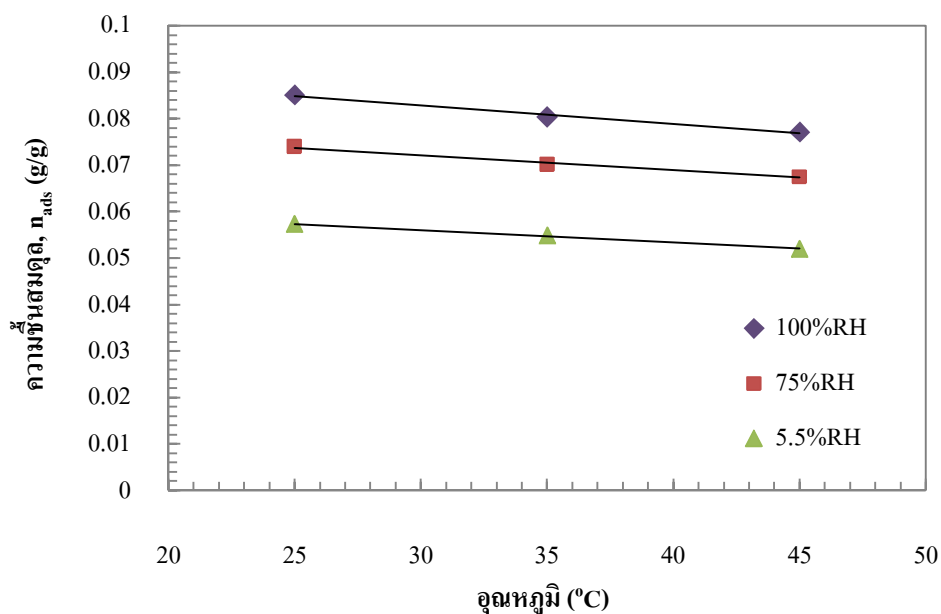


(ก)



(ข)

ภาพที่ 13 ภาพถ่าย SEM แสดงการเกาะกลุ่มกันของผลึกซีโพลีเอ (ก) กำลังขยาย 10,040 เท่า
 (ข) กำลังขยาย 5,030 เท่า



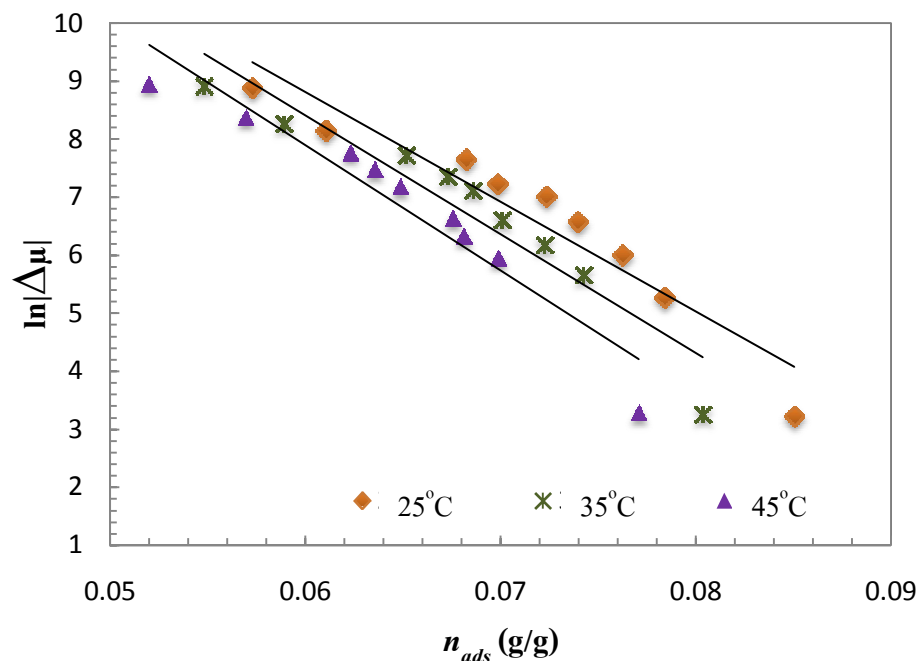
ภาพที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลกับอุณหภูมิที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %RH, 75 %RH และ 5.5 %RH

ภาพที่ 14 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณการดูดซับที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %RH, 75 %RH และ 5.5 %RH ข้อมูลในภาพนี้เป็นข้อมูลเดียวกับข้อมูลของภาพที่ 12 โดยเลือกเฉพาะจุดที่ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากันที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C ปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น กระบวนการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการคายความร้อน โมเลกุลของตัวถูกดูดซับต้องคายพลังงานเพื่อสร้างพันธะกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึงถูกดูดซับได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลของซีโอไลต์เอกับอุณหภูมิมักมีลักษณะเส้นตรง ความชันของเส้นตรงทั้ง 3 มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยตามความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ 100 %RH, 75% RH และ 5.5 %RH ความชันมีค่า 3.98×10^{-4} , 3.19×10^{-4} และ $2.65 \times 10^{-4} \text{ g/g} \cdot ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ความชันของเส้นตรงมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Zhu *et al.* (2005) ที่พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลของซีโอไลต์ 4A ที่ความดัน 2.24 kPa กับอุณหภูมิ มีลักษณะเส้นตรงและมีความชันเท่ากับ $2.4 \times 10^{-4} \text{ g/g} \cdot ^\circ\text{C}$

2. ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองงานพื้นผิวส่วนเกิน (ESW) แลงเมียร์ และ แลงเมียร์-ฟรุนด์ลิช (L-F)

แบบจำลอง ESW แลงค์เมียร์ และ L-F สำหรับอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับถูกทดสอบกับไอโซเทอร์มของการดูดซับที่ได้จากการทดลอง แบบจำลอง ESW แสดงความชื้นสมดุล (n_{ads}) ที่เป็นฟังก์ชันของ $\ln|\Delta\mu|$ โดยมีพารามิเตอร์ n_{mono} และ $\ln|\Delta\mu_0|$ ตามสมการที่ (9) ข้อมูลของปริมาณความชื้นสมดุลกับความดันสัมพัทธ์จากการทดลอง (ภาพที่12) ถูกนำมาหาค่า $\ln|\Delta\mu|$ โดยค่า $\Delta\mu$ คำนวณได้จากสมการที่ (5) เนื่องจากการใช้สมการที่ (5) เมื่อ $P/P_s = 1$ (100%RH) จะไม่สามารถหาค่า $\ln|\Delta\mu|$ ได้ การคำนวณจึงสมมติว่าค่า n_{ads} ที่วัดได้ที่ $P/P_s = 1$ เป็นค่า n_{ads} ที่ $P/P_s = 0.99$

ภาพที่15 แสดงกราฟเส้นตรงระหว่าง $\ln|\Delta\mu|$ กับ n_{ads} $\ln|\Delta\mu_0|$ และ n_{mono} คำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกนตั้งของเส้นตรงเหล่านี้ ผลการคำนวณที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C ให้ค่า n_{mono} เท่ากับ 0.0053, 0.0049 และ 0.0046 ค่า $\ln|\Delta\mu_0|$ เท่ากับ 20.15, 20.68 และ 20.84 ตามลำดับ



ภาพที่ 15 กราฟแสดงเส้นตรงระหว่าง $\ln|\Delta\mu|$ กับ n_{ads}

แบบจำลองแลงก์เมียร์แสดงดังสมการที่ (2) ค่าพารามิเตอร์ n_{mono} และ b จากแบบจำลองแลงก์เมียร์คำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกนตั้ง ของกราฟเส้นตรงระหว่างอัตราส่วนของความดันกับปริมาณความชื้นจากการทดลอง (P/n_{ads}) และความดัน แบบจำลอง L-F แสดงดังสมการที่ (3) ค่าพารามิเตอร์ n_{mono} b และ n คำนวณโดยการวิเคราะห์ถดถอยที่มีค่ากำลังสองน้อยที่สุดเป็นเกณฑ์

ตารางที่ 4 แสดงค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองแลงก์เมียร์และ L-F ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C n_{mono} จากแบบจำลองแลงก์เมียร์และ L-F ซึ่งแสดงปริมาณตัวถูกดูดซับในชั้นแรก มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น เพราะว่าโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่ได้เร็วที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้เกิดการดูดซับได้น้อยลง ค่าคงที่ของการดูดซับ (b) จากแบบจำลองแลงก์เมียร์และ L-F มีค่าลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ การลดลงนี้ตรงกับความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของการดูดซับกับอุณหภูมิตามสมการของ Vant hoff (Ruthven, 1984) ซึ่งแสดงดังนี้

$$b = b_0 \exp(-\Delta H_0/RT)$$

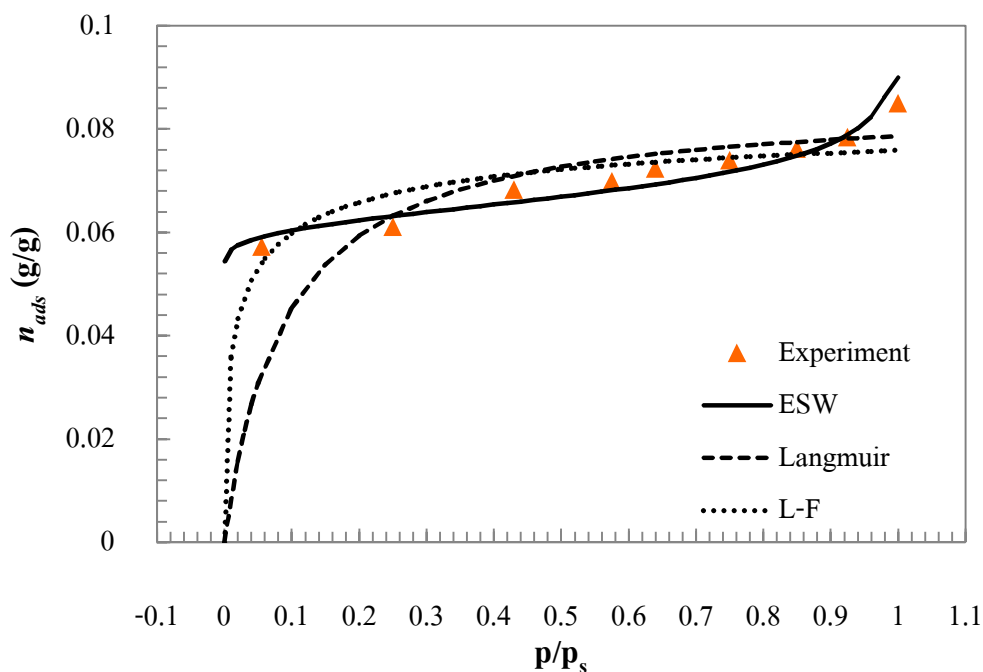
b_0 คือค่าคงที่ และ ΔH_0 คือความแตกต่างเอนทัลปีมาตรฐาน กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน (ΔH มีค่าเป็นลบ) b จึงมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแลงก์เมียร์และแลงก์เมียร์-ฟรุนด์ลิช ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C

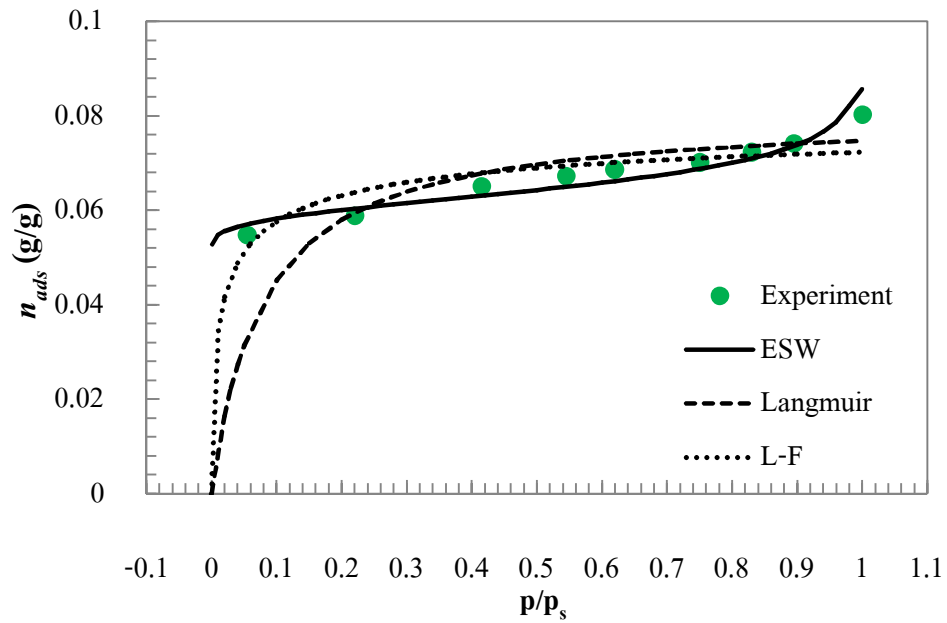
อุณหภูมิ (°C)	แลงก์เมียร์		แลงก์เมียร์-ฟรุนด์ลิช (L-F)		
	n_{mono}	b	n_{mono}	b	n
25	0.0856	3.57	0.0865	4.00	0.50
35	0.0805	2.29	0.0813	3.27	0.52
45	0.0763	1.42	0.0775	2.61	0.50

ภาพที่ 16 17 และ 18 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C ตามลำดับ ภาพที่ 16 แสดงว่า n_{ads} จากแบบจำลองแลงเมียร์มีค่าสูงกว่าการทดลองเล็กน้อยในช่วง P/P_s เท่ากับ 0.4-0.8 ที่ $P/P_s=0.05$ n_{ads} มีค่าต่ำกว่าการทดลองมาก แบบจำลอง L-F ให้ค่า n_{ads} ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าแบบจำลองแลงเมียร์ ค่า n_{ads} จากแบบจำลอง ESW มีค่าสูงกว่าการทดลองเล็กน้อยในช่วง P/P_s เท่ากับ 0.05-0.2 และที่ P/P_s เท่ากับ 1 n_{ads} จาก ESW ที่ P/P_s เท่ากับ 0.4-0.8 มีค่าต่ำกว่าการทดลองเล็กน้อย ภาพที่ 17 (35°C) และภาพที่ 18 (45°C) แสดงผลลัพธ์ของ n_{ads} จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณในลักษณะเดียวกับภาพที่ 5

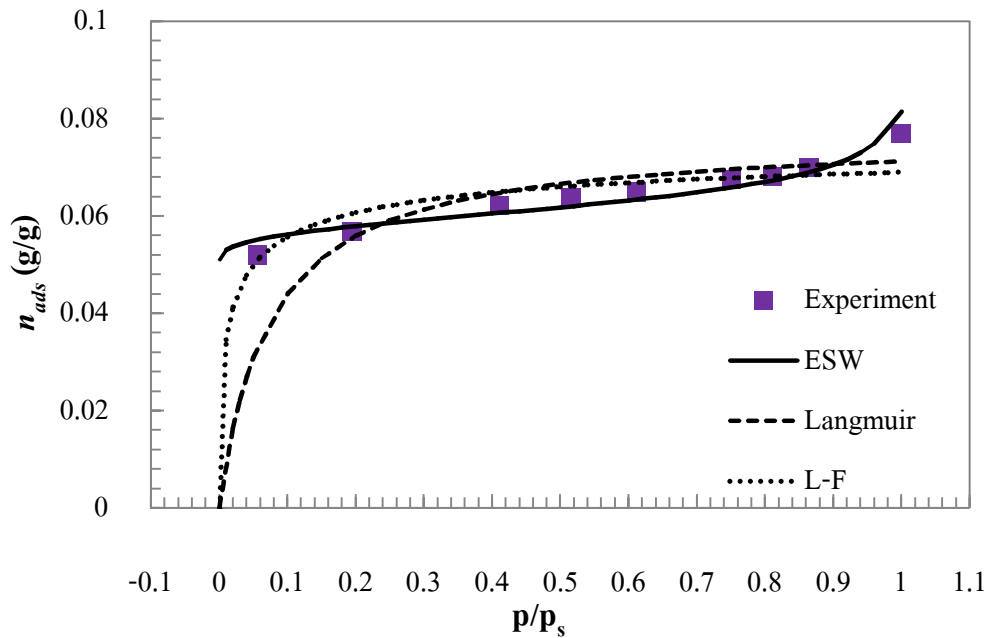
เมื่อเปรียบเทียบ n_{ads} จากแบบจำลอง ESW กับ n_{ads} จากแบบจำลองแลงเมียร์และ L-F ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C พบว่า n_{ads} จาก ESW มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าแบบจำลองแลงเมียร์และ L-F ตลอดช่วงความดันสัมพัทธ์ที่ทดลอง ไอโซเทอร์มของการดูดซับความชื้นในซีโอไลต์แสดงลักษณะไอโซเทอร์มเป็นชนิดที่ II ซึ่งเป็นชนิดที่เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น ดังนั้น ESW ซึ่งเหมาะกับการอธิบายการดูดซับแบบนี้จึงอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับได้ดีกว่าแบบจำลองแลงเมียร์และ L-F ที่เหมาะสำหรับอธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียว



ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์จากการทดลองและจากแบบจำลอง ESW (—), แลงเมียร์ (- - -) และ L-F (.....) ที่อุณหภูมิ 25°C

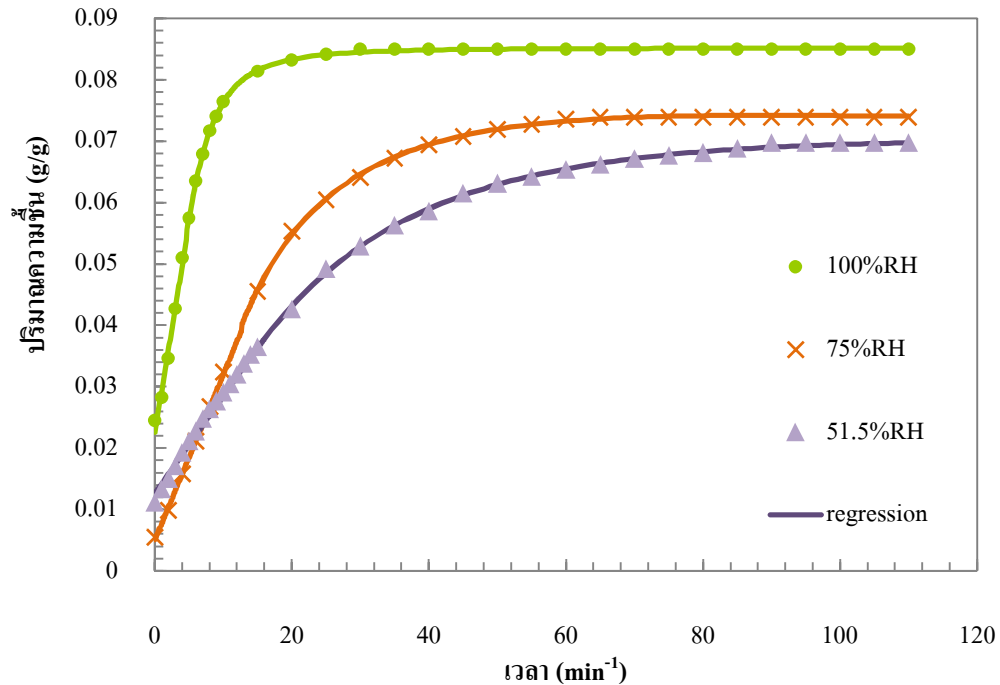


ภาพที่ 17 ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอจากการทดลองและจากแบบจำลอง ESW (—), แลงเมียร์ (- -) และ L-F (.....) ที่อุณหภูมิ 35°C



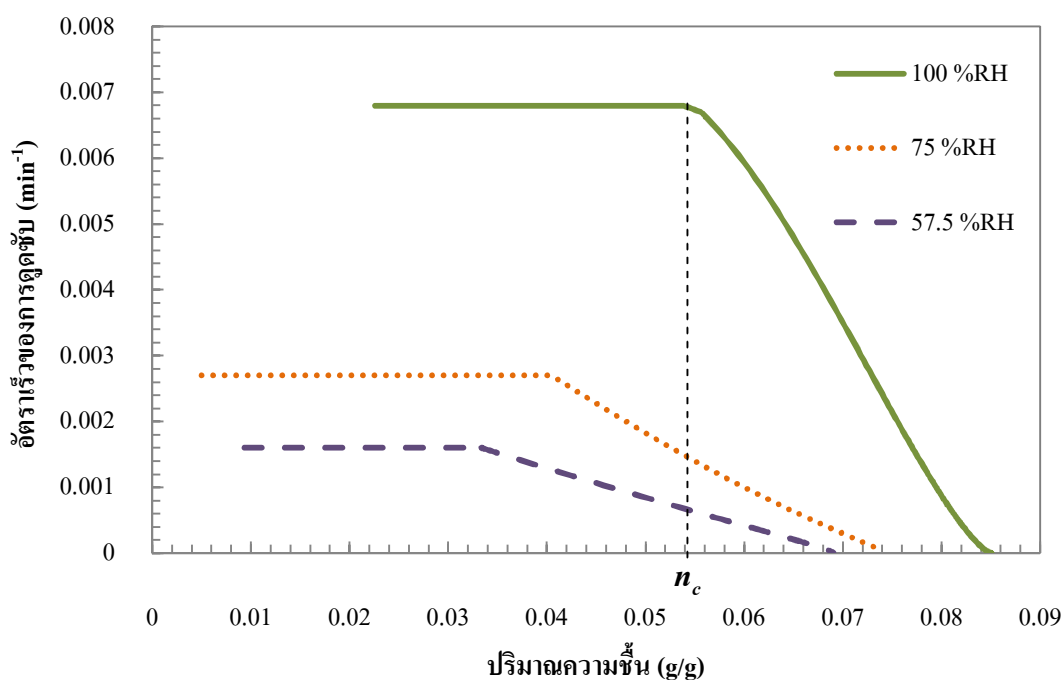
ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอจากการทดลองและจากแบบจำลอง ESW (—), แลงเมียร์ (- -) และ L-F (.....) ที่อุณหภูมิ 45°C

3. ผลการทดลองหาอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอ



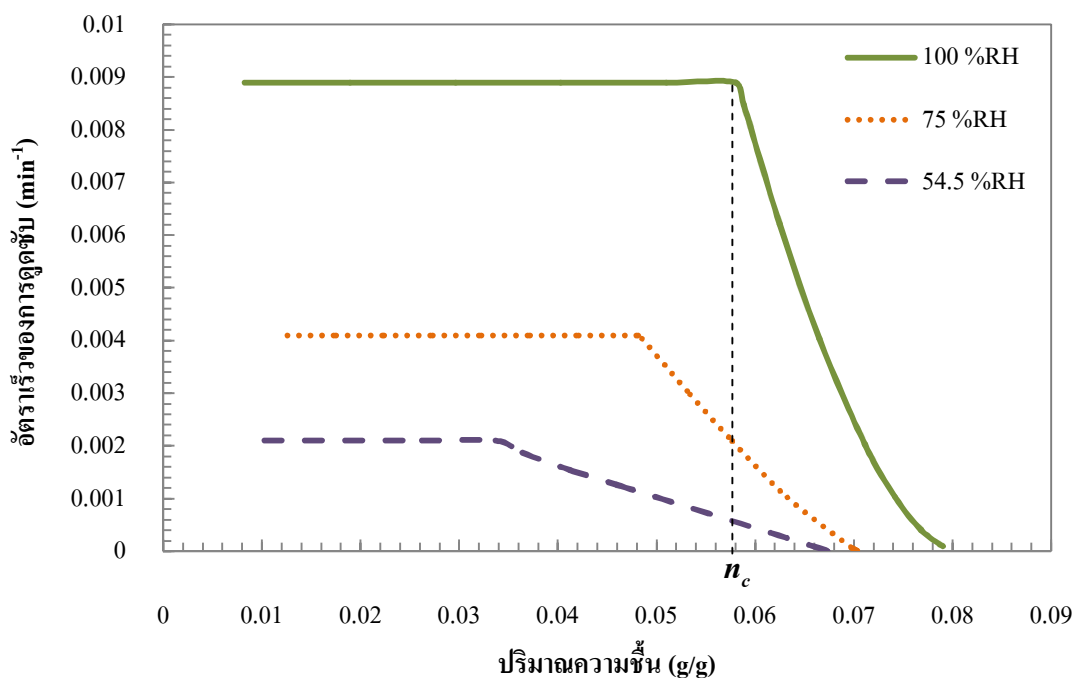
ภาพที่ 19 ผลการทดลองหาความชื้นในซีโอไลต์เอที่เวลาต่างๆ อุณหภูมิ 45°C

ภาพที่ 19 แสดงโค้งของปริมาณความชื้นที่ซีโอไลต์เอที่ดูดซับได้กับเวลาจากการทดลองที่ 100 %RH (●), 75 %RH (×) และ 51.5 %RH (▲) ที่อุณหภูมิ 45°C โค้งที่แสดงสำหรับแต่ละความชื้นสัมพัทธ์ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย อัตราเร็วของการดูดซับคำนวณได้จากอนุพันธ์ของโค้ง



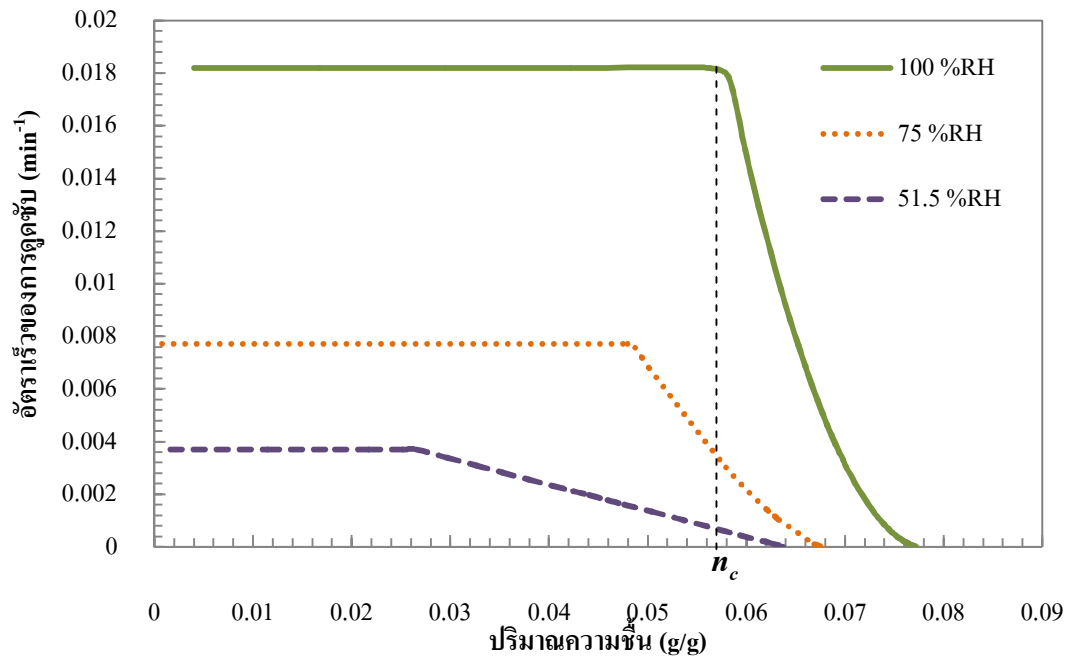
ภาพที่ 20 อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นที่ 57.5 %RH (---) 75 %RH (.....) และ 100%RH (—) อุณหภูมิ 25 °C

ภาพที่ 20 แสดงปริมาณความชื้นกับอัตราเร็วของการดูดซับในซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 57.5 %RH 75 %RH และ 100 %RH ภาพที่ 20 แสดงให้เห็นว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 57.5 %RH อัตราเร็วของการดูดซับมีค่าคงที่ในช่วงแรกที่ 0.0016 min⁻¹ จนถึงปริมาณความชื้นวิกฤต (n_c) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0334 g/g จากนั้นอัตราเร็วของการดูดซับค่อยๆ ลดลงจนถึงปริมาณความชื้นสมดุล ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นเท่ากับ 75 %RH อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงแรกคงที่เท่ากับ 0.0027 min⁻¹ n_c มีค่าเท่ากับ 0.0406 g/g และที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 100 %RH อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นมีค่าคงที่ในช่วงแรกที่ 0.0068 min⁻¹ ซึ่งสูงกว่าอัตราเร็วในช่วงแรกที่ 57.5 %RH และ 75 %RH ถึง 4.3 และ 2.5 เท่า n_c มีค่าสูงกว่าที่ 57.5 %RH และ 75 %RH โดยมีค่าเท่ากับ 0.0539 g/g



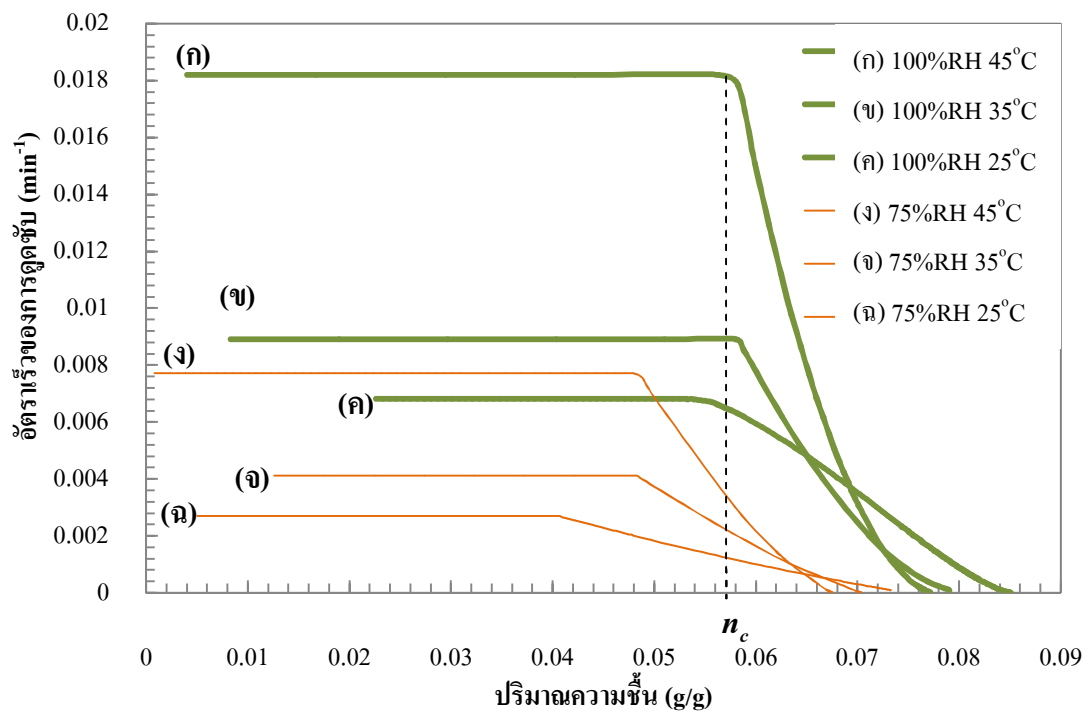
ภาพที่ 21 อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นที่ 54.5 %RH (---), 75 %RH (.....) และ 100 %RH (—) อุณหภูมิ 35°C

ปริมาณความชื้นกับอัตราเร็วของการดูดซับในซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิ 35 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 54.5 %RH, 75 %RH และ 100 %RH ถูกแสดงในภาพที่ 21 เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 54.5 %RH อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงแรกคงที่ที่ 0.0021 min^{-1} n_c มีค่าเท่ากับ 0.0337 g/g เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นเป็น 75 %RH อัตราเร็วของการดูดซับมีค่าคงที่ในช่วงแรกที่ 0.0041 min^{-1} ซึ่งมากกว่าที่ 57.5 %RH 1.9 เท่า n_c มีค่าเท่ากับ 0.0486 g/g และที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด 100 %RH อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นคงที่ในช่วงแรกที่ 0.0089 min^{-1} ซึ่งสูงกว่าอัตราเร็วของการดูดซับช่วงแรกที่ 54.5 %RH และ 75 %RH ถึง 4.2 และ 2.2 เท่า n_c มีค่าเท่ากับ 0.0589 g/g ซึ่งสูงกว่าที่ 57.5 %RH และ 75 %RH



ภาพที่ 22 อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นที่ 51.5%RH (---), 75%RH (.....) และ 100%RH (—) อุณหภูมิ 45°C

ทำนองเดียวกันกับที่อุณหภูมิ 25 และ 35°C ปริมาณความชื้นกับอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิ 45°C ความชื้นสัมพัทธ์ 51.5 %RH, 75 %RH และ 100 %RH แสดงในภาพที่ 22 อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงแรกมีค่าคงที่เท่ากับ 0.0037 min^{-1} , 0.0077 min^{-1} และ 0.0182 min^{-1} ที่ 51.5 %RH, 75 %RH และ 100 %RH ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงแรกมีค่าสูงตามความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น โดยที่ 100 %RH มีค่าสูงกว่าที่ 75 %RH และ 51.5 %RH ถึง 4.9 และ 2.4 เท่า n_c มีค่าสูงขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น โดย n_c มีค่าเท่ากับ 0.0265 g/g, 0.0487 g/g และ 0.0582 g/g ที่ 51.5 %RH, 75 %RH และ 100 %RH ตามลำดับ



ภาพที่ 23 อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นที่ 100%RH (—) อุณหภูมิ 45°C (ก), 35°C (ข), 45°C (ค) และ 75%RH (—) อุณหภูมิ 45°C (ง), 35°C (จ), 45°C (ฉ)

โค้งของปริมาณความชื้นกับอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในซีโอไลต์เอที่ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน (100 %RH และ 75 %RH) ถูกนำมาแสดงในภาพที่ 23 เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในซีโอไลต์เอและ n_c ภาพที่ 23 แสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงแรกที่มีความชื้นสัมพัทธ์เดียวกันมีค่าสูงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 100 %RH อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงแรกที่มีอุณหภูมิ 45°C (เส้น ก) มีค่าสูงกว่าที่ 35°C (เส้น ข) และ 25°C (เส้น ค) 2.0 และ 2.7 เท่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 75 %RH อุณหภูมิ 45°C (เส้น ง) อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงแรกมีค่าเป็น 1.9 และ 2.9 เท่าของอัตราเร็วของการดูดซับที่มีอุณหภูมิ 35°C (เส้น จ) และ 25°C (เส้น ฉ) เมื่อเปรียบเทียบ n_c ที่อุณหภูมิ 45, 35 และ 25°C พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100 %RH n_c มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 อุณหภูมิ

4. การทดสอบโค้งปริมาณความชื้นกับเวลาด้วยแบบจำลอง LDF และการหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้น

การทดสอบแบบจำลอง LDF สำหรับใช้อธิบายอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอนาทำโดยการเปรียบเทียบโค้งของปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอนากับเวลาจากการทดลองกับโค้งของปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอนากับเวลาจากแบบจำลอง LDF โดยวิธีวิเคราะห์ถดถอยซึ่งมีค่ากำลังสองน้อยที่สุดเป็นเกณฑ์ สมการสำหรับหาโค้งของปริมาณความชื้นกับเวลาได้จากผลการอินทิเกรตสมการหาอัตราเร็วของแบบจำลอง LDF (สมการที่ 18) โดยวิธีอินทิเกรตแสดงนี้

$$\int \frac{1}{(q^* - \bar{q})} d\bar{q} = \frac{15D}{r_c^2} \int dt \quad (20)$$

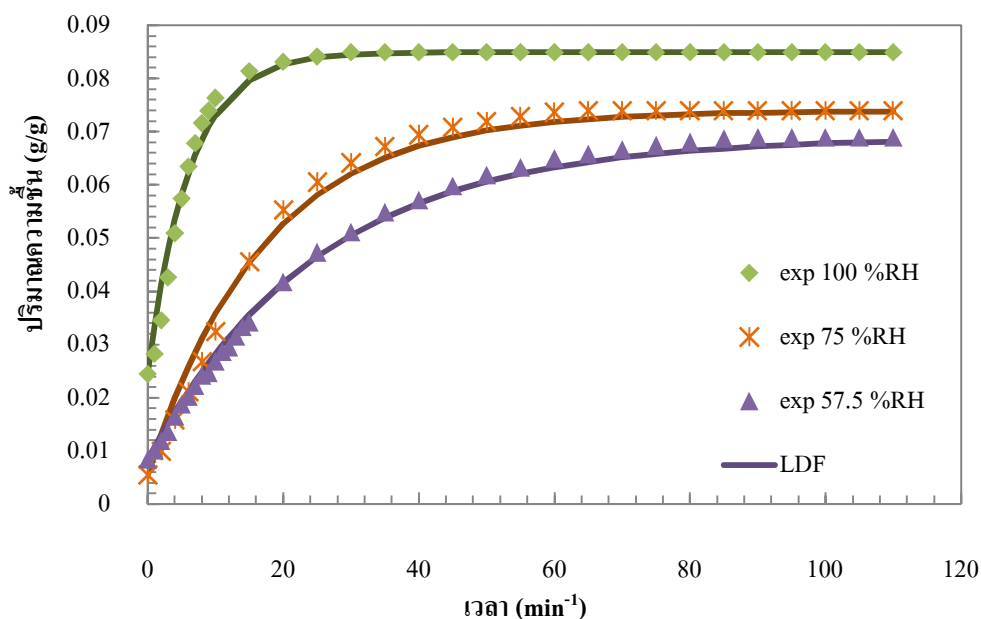
ผลการอินทิเกรตสมการที่ (ข-1) แสดงดังนี้

$$\ln(q^* - \bar{q}) = \ln q^* - \frac{15Dt}{r_c^2} - c \quad (21)$$

ปริมาณความชื้น (\bar{q}) แสดงดังนี้

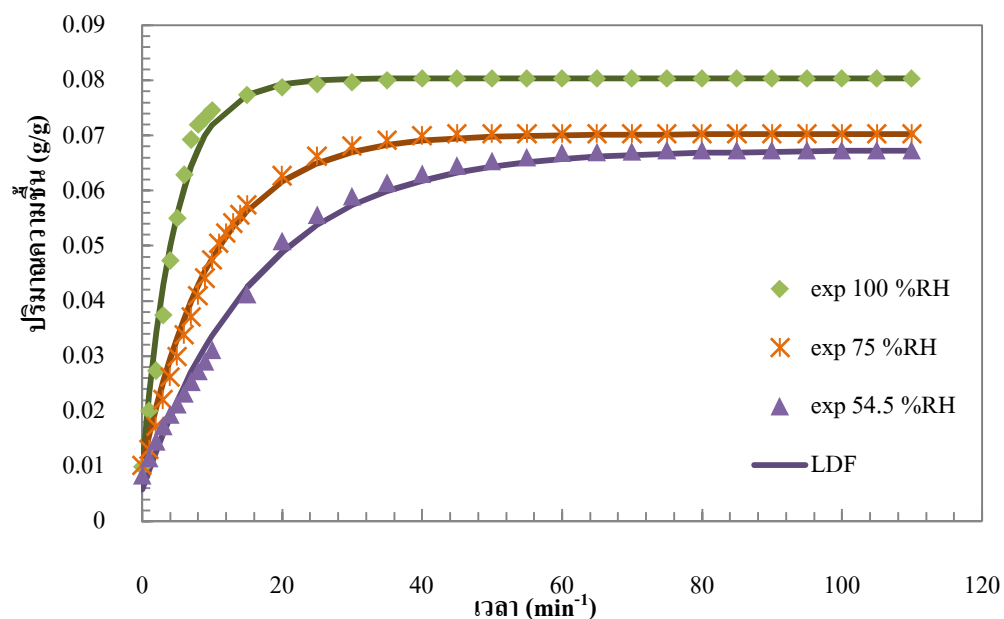
$$\bar{q} = q^* - e^{(\ln q^* - 15Dt/r_c^2 - c)} \quad (22)$$

c คือค่าคงที่ ซึ่งคำนวณได้จากสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นของแต่ละการทดลอง



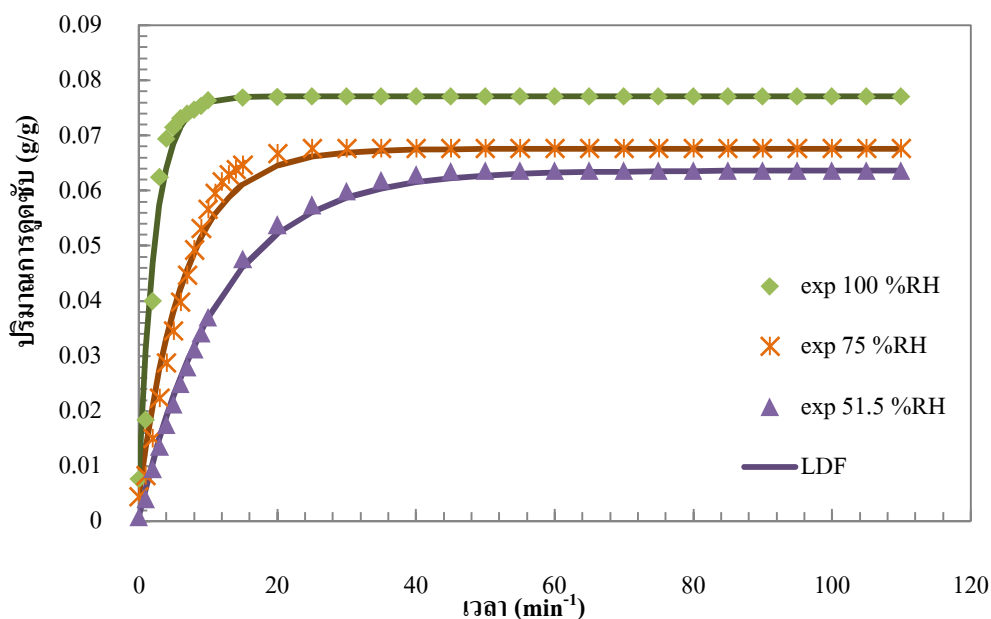
ภาพที่ 24 ปริมาณความชื้นที่ขึ้นกับเวลาจากผลการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 25°C

ภาพที่ 24 แสดงการเปรียบเทียบโค้งของปริมาณความชื้นในซีโอดีที่ขึ้นกับเวลาจากผลการทดลองกับโค้งจากแบบจำลอง LDF ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %RH, 75 %RH และ 57.5 %RH อุณหภูมิ 25°C เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 100 %RH ปริมาณความชื้นในซีโอดีจากแบบจำลอง LDF มีค่าสูงกว่าการทดลองเล็กน้อยในช่วงเวลา 0-4 นาที และมีค่าต่ำกว่าการทดลองเล็กน้อยในช่วงเวลา 8-18 นาที ปริมาณความชื้นในซีโอดีจากแบบจำลอง LDF ที่ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 75 %RH มีค่าสูงกว่าการทดลองเล็กน้อยในช่วงเวลา 0-8 นาที จากนั้นมีค่าต่ำกว่าการทดลองเล็กน้อยจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ที่ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 57.5 %RH ปริมาณความชื้นในซีโอดีจากแบบจำลอง LDF มีค่าสูงกว่าการทดลองเล็กน้อยในช่วงเวลา 0-15 นาที จากนั้นปริมาณความชื้นจากแบบจำลอง LDF มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากจนถึงปริมาณความชื้นสมดุล



ภาพที่ 25 ปริมาณความชื้นที่ขึ้นกับเวลาจากผลการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 35°C

ผลการเปรียบเทียบโค้งของปริมาณความชื้นในซีโอดีกับเวลาจากการทดลองกับโค้งจากแบบจำลอง LDF ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %RH, 75 %RH และ 54.5 %RH อุณหภูมิ 35°C แสดงในภาพที่ 25 โค้งผลของปริมาณความชื้นในซีโอดีกับเวลาจากแบบจำลอง LDF ของทั้ง 3 ความชื้นสัมพัทธ์ให้ค่าสูงกว่าผลจากการทดลองเล็กน้อยในช่วงแรกของโค้ง โดยปริมาณความชื้นจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าจากการทดลองในช่วงเวลา 0-5 นาที เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 100 %RH 0-10 นาที เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 75 %RH และ 0-16 นาที เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 54.5 %RH จากนั้นโค้งของปริมาณความชื้นกับเวลาจากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าโค้งผลการทดลองเล็กน้อยจนกระทั่งปริมาณความชื้นมีค่าสูงสุด



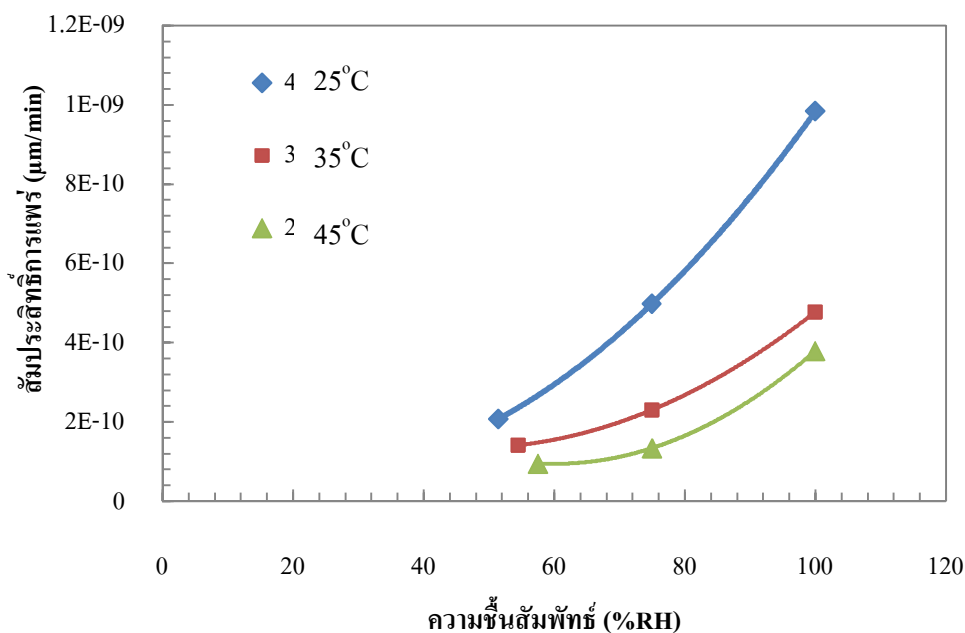
ภาพที่ 26 ปริมาณความชื้นที่ขึ้นกับเวลาจากผลการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 45°C

ทำนองเดียวกับที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C ผลของการเปรียบเทียบ โค้งของปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอากับเวลาจากการทดลองกับโค้งจากแบบจำลอง LDF ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %RH, 75 %RH และ 51.5 %RH อุณหภูมิ 45°C แสดงในภาพที่ 26 เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 100 %RH ปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอจากแบบจำลอง LDF ที่เวลา 0-2 นาที มีค่าสูงกว่าปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอจากการทดลองเล็กน้อย ปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอจากแบบจำลอง LDF ที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 75 %RH มีค่าสูงกว่าการทดลองเล็กน้อยในช่วงเวลา 0-8 นาที หลังจากนั้น ปริมาณความชื้นจากแบบจำลอง LDF มีค่าต่ำกว่าการทดลองจนกระทั่งปริมาณความชื้นมีค่าสูงสุด และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 51.5 %RH ปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอจากแบบจำลอง LDF มีค่าสูงกว่าการทดลองเล็กน้อยในช่วงเวลา 0-10 นาที นอกนั้นปริมาณความชื้นจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอล์ต์เอจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 25°C
35°C และ 45°C

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	สัมประสิทธิ์การแพร่ $\times 10^{-10}$ (cm/min)		
	25°C	35°C	45°C
100	3.79	4.77	9.83
75	1.34	2.31	4.98
57.5	0.95	-	-
54.5	-	1.42	-
51.5	-	-	2.08

ตารางที่ 5 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอล์ต์เอจากแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าประมาณ 10^{-10} cm/min อุณหภูมิส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอล์ต์เอ โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอล์ต์เอมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิมียุคสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง สัมประสิทธิ์การแพร่จึงมีค่าสูง ผลการเปรียบเทียบของสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอล์ต์เอที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นมีค่าสูงขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกัน



ภาพที่ 27 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์จากการคำนวณโดยแบบจำลอง LDF ที่อุณหภูมิ 25 35 และ 45°C

ข้อมูลจากตารางที่ 5 ถูกนำมาแสดงในภาพที่ 27 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C ได้ชัดเจน ภาพที่ 27 แสดงให้เห็นว่าเส้นความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับผลการทดลองของ Doetsch *et al.* (1973) ที่พบว่าความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ n-heptane (ช่วง 0.3-2 molecule/cage) กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-heptane ในซีโอไลต์ 5A จากแบบจำลองการแพร่ในของแข็งที่อุณหภูมิ 136, 166, 189 และ 218°C มีลักษณะเป็นเส้นโค้งและที่ช่วงความเข้มข้นของ n-heptane สูง (1.5-2 molecule/cage) สัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-heptane มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามความเข้มข้นที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์ที่แต่ละอุณหภูมิพบว่า ส่วนโค้งนั้นโค้งน้อยลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นความชื้นสัมพัทธ์ส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การแพร่มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การทดลองหาปริมาณความชื้นสมดุลและอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอ โดยเปรียบเทียบแบบจำลองแลงเมียร์ L-F และ ESW ในการอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้น และหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอจากแบบจำลอง LDF สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ปริมาณความชื้นสมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ แสดงในรูปไอโซเทอร์มชนิดที่ II ปริมาณความชื้นสมดุลที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 5.5 %RH มีค่าสูงถึง 5.73%, 5.48% และ 5.20% ที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C ตามลำดับ ดังนั้นการผลิตผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอให้มีค่าต่ำกว่า 5% ซีโอไลต์เอต้องถูกควบคุมปริมาณความชื้นหลังออกจากเครื่องอบแห้งทันที
2. แบบจำลองแลงเมียร์และ L-F ให้ค่าปริมาณความชื้นสมดุลได้ใกล้เคียงกับการทดลองเป็นบางช่วงความชื้นสัมพัทธ์ แต่แบบจำลอง ESW สามารถอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นได้ครอบคลุมตลอดช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่ทดลองได้ดีกว่าแบบจำลองแลงเมียร์และ L-F
3. อัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอก่อนปริมาณความชื้นวิกฤต (n_c) มีค่าสูงตามความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่สูงขึ้น n_c มีค่าลดลงอย่างชัดเจนตามความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลง
4. แบบจำลอง LDF สามารถอธิบายปริมาณความชื้นในซีโอไลต์เอที่ขึ้นกับเวลาในกระบวนการดูดซับความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลองที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45°C
5. สัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอจากแบบจำลอง LDF มีค่าสูงตามความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่สูงขึ้น ที่อุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ส่งผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นในซีโอไลต์เอมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ทดลองหาอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในตัวอย่างซีโอไลต์เอที่สภาพแวดล้อมที่ไม่มีความเร็วของลม ซึ่งอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นจะมีค่าน้อยกว่าอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นที่สถานะที่มีความเร็วของลม เนื่องจากความเร็วของลมจะส่งผลกระทบต่อโมเลกุลของน้ำผ่านเข้าไปในซีโอไลต์เอได้เร็วขึ้น (สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าสูงขึ้น) ขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอในอุตสาหกรรมนั้น หลังออกจากเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอจะถูกขนถ่ายด้วยลมเพื่อไปจัดเก็บ ดังนั้นที่สถานะนี้ความเร็วของลมจะส่งผลทำให้อัตราเร็วของการดูดซับมีค่าต่างไปจากการทดลอง จึงควรศึกษาผลกระทบของลมต่ออัตราเร็วของการดูดซับความชื้นในซีโอไลต์เอต่อไป

2. นอกจากปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอจะขึ้นกับสถานะแวดล้อมหลังจากผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องอบแห้งแล้ว ปริมาณความชื้นยังขึ้นกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ด้วยเช่น ถ้าอนุภาคซีโอไลต์เอมีขนาดเล็ก จะทำให้พื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น ซีโอไลต์เอสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น ดังนั้นถ้าข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์เอเปลี่ยนไปจากตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ปริมาณความชื้นสมดุลและอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นก็จะมีค่าต่างไปจากการทดลอง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Adolphs, J. 2007. Excess surface work-A modeless way of getting surface energies and specific surface areas directly from sorption isotherm. **Appl. Surf. Sci.** 253: 5645-5649.
- Adolphs, J. and M.J. Setzer. 1998. Description of Gas Adsorption Isotherm on Porous and Dispersed Systems with the Excess Surface Work Model. **J. Colloid Interf sci.** 207: 349-354.
- Adolphs, J. and M.J. Setzer. 1996. A Model to Describe Adsorption Isotherm. **J. Colloid Interf sci.** 180: 70-76.
- Ariahu, C.C., S.A. Kaze and C.D. Achem. 2006. Moisture sorption characteristics of tropical fresh water crayfish (*Procambarus clarkii*). **J. Food Eng.** 75 : 355–363.
- Breck, D.W. 1974. **Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use**. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Brunauer, S., L. S. Deming, W. E. Deming and E.Teller. 1940. On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. **Am. Chem. Soc.** 62 (7): 1723-1732.
- Bhatia, S. 1990. **Zeolite Catalysis: Principles and Applications**. CRC Press, Inc., New York.
- Cooper, R.S. 1965. Slow particle diffusion in ion exchange columns. **Ind. Eng. Chem. Fundamen.** 4 (3): 308-313.
- Dawoud, B. and Y. Aristov. 2003. Experimental study on the kinetics of water vapor sorption on selective water sorbents, silica gel and alumina under typical operating conditions of sorption heat pumps. **Int. J. Heat Mass Transfer.** 46: 273–281.

- Doetsch, I.H., P.M. Ruthven and K.F. Loughcin. 1974. Sorption and Diffusion of n-Heptane in 5A Zeolite. **Can. J. Chem.** 52: 2717-2724.
- Fang, J., F. Moore, E. Roos and C. Walters. 1998. Three-dimensional models represent seed moisture content as a function of relative humidity and temperature. **Hort. Sci.** 33: 1207–1209.
- Ford, D.L. 1998. **Toxicity Reduction: Evaluation and Control**. CRC Press, Inc., Pennsylvania.
- Gleuckauf, E. 1955. Theory of Chromatography Part10: Formula for Diffusion into Spheres and Their Applications in Chromatography. **Trans. Faraday Soc.** 51: 1540–1551.
- Gleuckauf, E. and J.I.Coates. 1947. Theory of chromatography PartIV: The Influence of Incomplete Equilibrium on the Front Boundary of Chromatograms and the Effectiveness of Separation. **J. Chem.Soc.** 1315–1321.
- Gorbach, A., M. Stegmaier and G. Eigenberger. 2004. Measurement and modeling of water vapor adsorption on zeolite-4A-equilibrium and kinetics. **Adsorption.** 10: 29-46.
- Hong, T.D., R.H. Ellis, J. Gunn and D. Moore. 2002. Relative humidity, temperature and the equilibrium moisture content of conidia of *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin: a quantitative approach. **J. Stored Products Res.** 38: 33–41.
- Kim, D. H. 1989. Linear Driving Force Formulas for Diffusion and Reaction in Porous Catalysis. **AIChE J.** 35: 343-346.-
- Kim, M.B., Y.S. Bae, D.K. Choi and C.H Lee. 2006. Kinetic separation of land fill gas by a two-bed pressure swing adsorption process packed with carbon molecular sieve: nonisothermal operation. **Ind. Eng. Chem. Res.** 45: 5050-5058

- Kumar, A.J., R.R.B. Singh, G.R. Patil and A.A. Patel. 2005. Effect of temperature on moisture desorption isotherms of kheer. **LWT**. 38: 303–310.
- Mohamadbeigy, Kh., Kh. Forsat and R. Binesh. 2007. Experimental Studying on gas Dewatering by Molecular Sieve. **Pet. Coal**. 49 (1): 41-45.
- Ruthven, D.M.1984. **Principles of Adsorption and Adsorption Processes**, John wiley & sons, Inc., New York.
- Satterfield, C.N. 1993. **Heterogeneous Catalyst in Industrial Practice**, McGraw-Hill, New York.
- Sicar, S. and J.R. Hufton. 2000. Why Does the Linear Driving Force Model for Adsorption Kinetics Work?. **Adsorption**. 6: 137-147.
- Sanni, L.O., C. Ateren and A. Kuye. 1997. Moisture Sorption Isotherms of Fufu and Tapioca at Different Temperatures. **J. Food Eng**. 34: 203-212
- Togrul, H. and N. Arslan. 2006. Moisture Sorption Behaviour and Thermodynamic Characteristics of Rice stored in a Chamber under Controlled Humidity. **Biosystems Eng**. 95 (2):181–195
- Wei-Dong, W., H. Zhang and D.W. Sun. 2009. Mathematical simulation and experimental study of a modified zeolite13X–water adsorption refrigeration module. **Appl. Therm. Eng**. 29: 645-651.
- Young, K.R., J.L. Seung, W.K. Jong and H.L. Chang. 2001. Adsorption Equilibrium and Kinetics of H₂O on Zeolite 13X. **Korean J. Chem. Eng**. 18(4): 525-530.

Zhu W., L. Gora, A.W.C. van den Berg, F. Kapteijn, J.C. Jansen and J.A. Moulijn. 2005. Water vapour separation from permanent gases by a zeolite-4A membrane. **Membr. Sci.** 253: 57–66

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลปริมาณความชื้นสมมูลของซีโอไลต์เอ

ข้อมูลปริมาณความชื้นสมมูลจากการทดลอง

ปริมาณความชื้นสมมูลคำนวณได้จาก

$$\text{ปริมาณความชื้นสมมูล} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดลอง} - \text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง}}$$

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลผลการตรวจสอบหาปริมาณความชื้นสมมูลที่อุณหภูมิ 25°C

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความชื้นสมมูล (g/g)							เฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ครั้งที่6	ครั้งที่7		
100	0.0853	0.0851	0.0852	0.0829	0.0852	0.0866	0.0851	0.0851	0.0011
92.5	0.0791	0.0778	0.0780	0.0782	0.0788	0.0785	0.0781	0.0784	0.0005
85	0.0768	0.0755	0.0762	0.0759	0.0766	0.0762	0.0770	0.0763	0.0005
75	0.0738	0.0737	0.0742	0.0744	0.0737	0.0732	0.0750	0.0740	0.0006
64	0.0721	0.0728	0.0726	0.0710	0.0715	0.0732	0.0726	0.0723	0.0008
57.5	0.0697	0.0699	0.0670	0.0706	0.0698	0.0705	0.0709	0.0698	0.0013
43	0.0692	0.0677	0.0680	0.0682	0.0679	0.0687	0.0679	0.0682	0.0005
25	0.0613	0.0607	0.0608	0.0612	0.0613	0.0611	0.0611	0.0611	0.0002
5.5	0.0577	0.0565	0.0581	0.0574	0.0568	0.0578	0.0569	0.0573	0.0006

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลผลการตรวจสอบหาปริมาณความชื้นสมมูลที่อุณหภูมิ 35°C

ความชื้น สัมพัทธ์ (%RH)	ความชื้นสมมูล (g/g)							เฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ครั้งที่6	ครั้งที่7		
100	0.0809	0.0795	0.0798	0.0799	0.0808	0.0809	0.0810	0.0804	0.0006
89.5	0.0739	0.0743	0.0740	0.0756	0.0734	0.0742	0.0746	0.0743	0.0007
83	0.0716	0.0722	0.0734	0.0714	0.0722	0.0728	0.0719	0.0722	0.0007
75	0.0698	0.0704	0.0705	0.0704	0.0702	0.0695	0.0701	0.0701	0.0004
62	0.0686	0.0686	0.0681	0.0681	0.0687	0.0688	0.0692	0.0686	0.0004
54.5	0.0678	0.0681	0.0669	0.0676	0.0668	0.0668	0.0669	0.0673	0.0005
41.5	0.0652	0.0651	0.0653	0.0654	0.0657	0.0650	0.0647	0.0652	0.0003
22	0.0592	0.0599	0.0578	0.0586	0.0595	0.0579	0.0596	0.0589	0.0008
5.5	0.0551	0.0544	0.0553	0.0540	0.0549	0.0548	0.0550	0.0548	0.0004

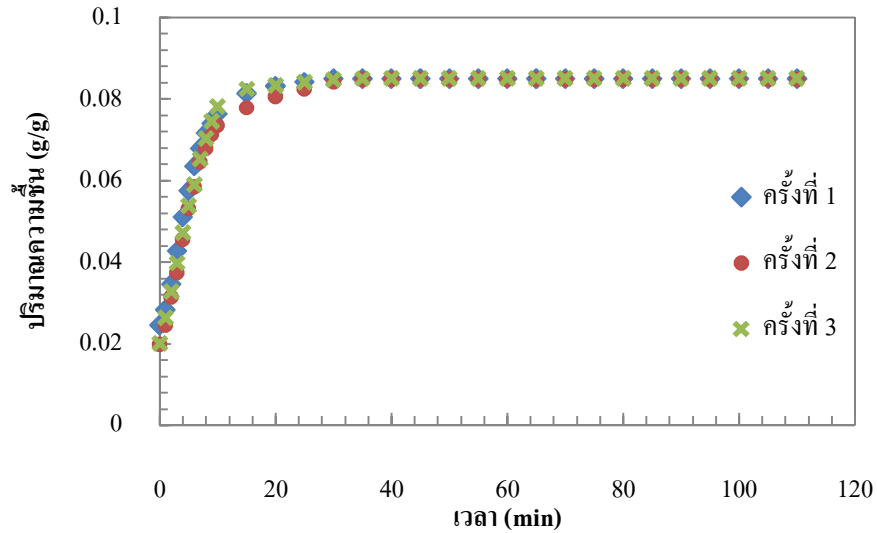
ตารางผนวกที่ ก3 ข้อมูลผลการตรวจสอบหาปริมาณความชื้นสมมูลที่อุณหภูมิ 45°C

ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ความชื้นสมมูล (g/g)							เฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5	ครั้งที่6	ครั้งที่7		
100	0.0754	0.0770	0.0769	0.0756	0.0770	0.0806	0.0771	0.0771	0.0017
86.5	0.0706	0.0697	0.0697	0.0705	0.0696	0.0694	0.0696	0.0699	0.0005
81	0.0672	0.0692	0.0678	0.0673	0.0670	0.0682	0.0700	0.0681	0.0011
75	0.0683	0.0679	0.0668	0.0671	0.0681	0.0678	0.0670	0.0676	0.0006
61	0.0643	0.0638	0.0649	0.0645	0.0656	0.0654	0.0656	0.0649	0.0007
51.5	0.0640	0.0631	0.0638	0.0632	0.0638	0.0634	0.0636	0.0636	0.0003
41	0.0619	0.0618	0.0612	0.0629	0.0625	0.0623	0.0636	0.0623	0.0008
19.5	0.0565	0.0578	0.0563	0.0562	0.0569	0.0581	0.0571	0.0570	0.0007
5.5	0.0504	0.0513	0.0527	0.0525	0.0528	0.0520	0.0524	0.0520	0.0009

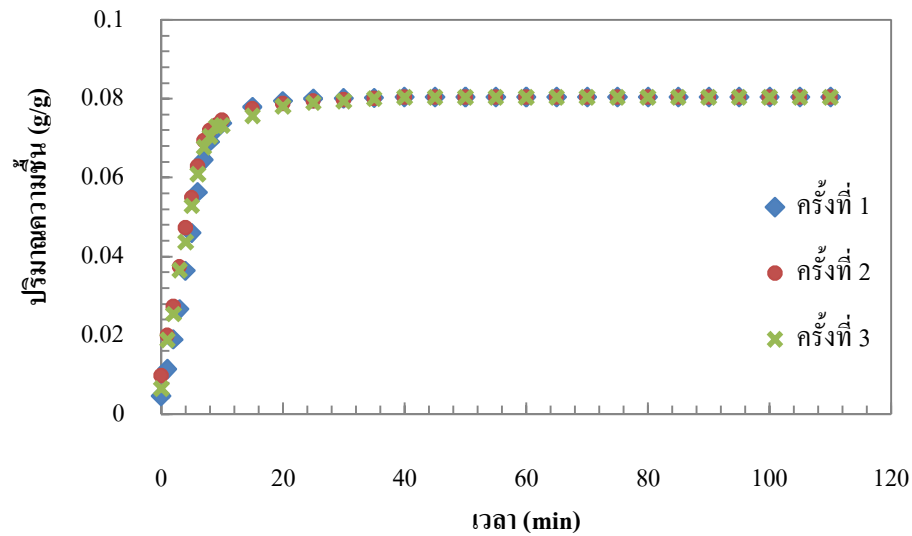
ภาคผนวก ข

ข้อมูลอัตราเร็วของการดูดซับความชื้นของซีโอไลต์เอ

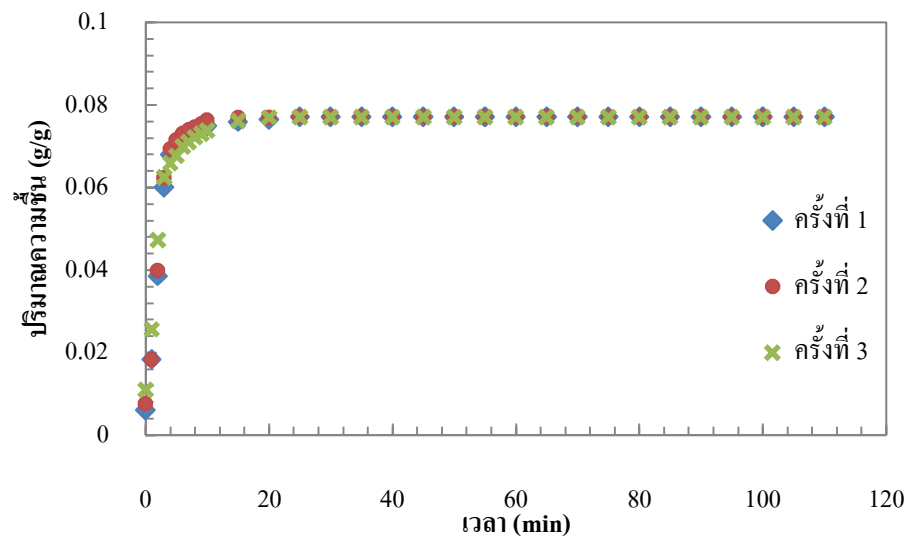
ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



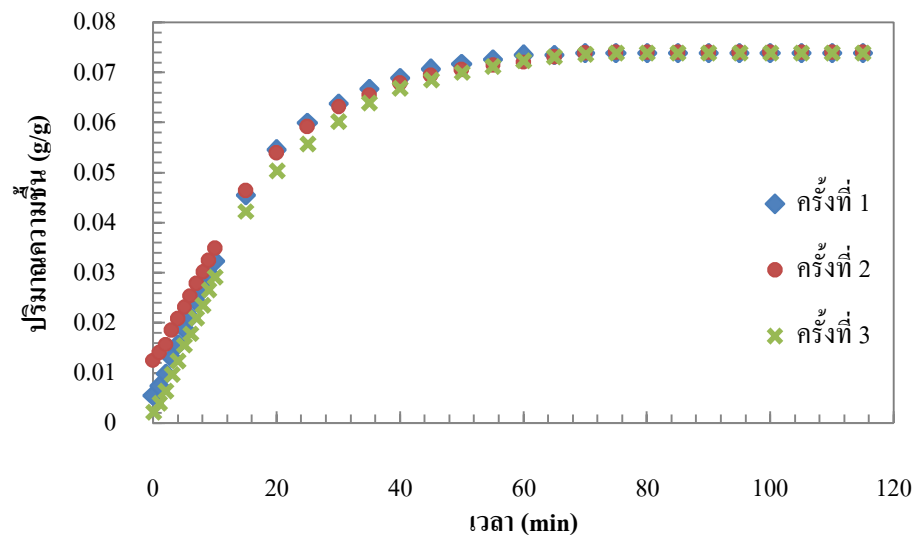
ภาพผนวกที่ ข1 ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 100 %RH อุณหภูมิ 25°C



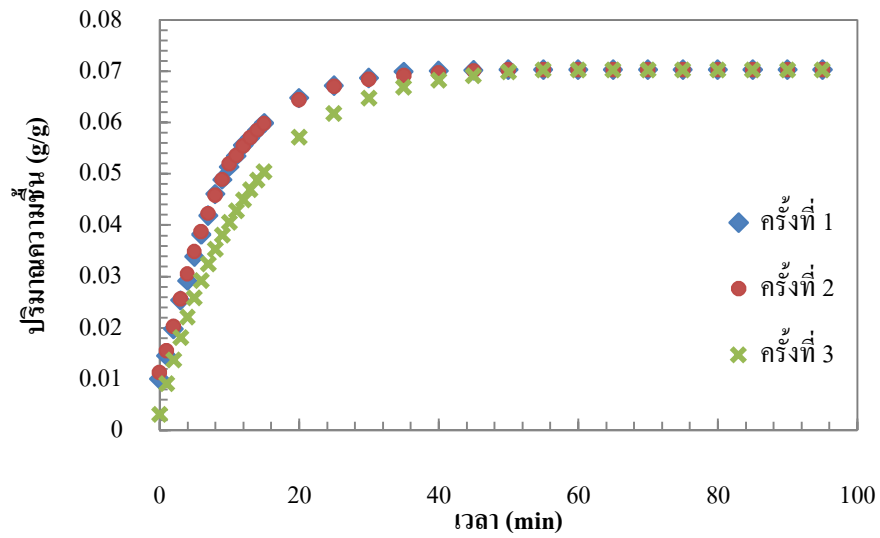
ภาพผนวกที่ ข2 ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 100 %RH อุณหภูมิ 35°C



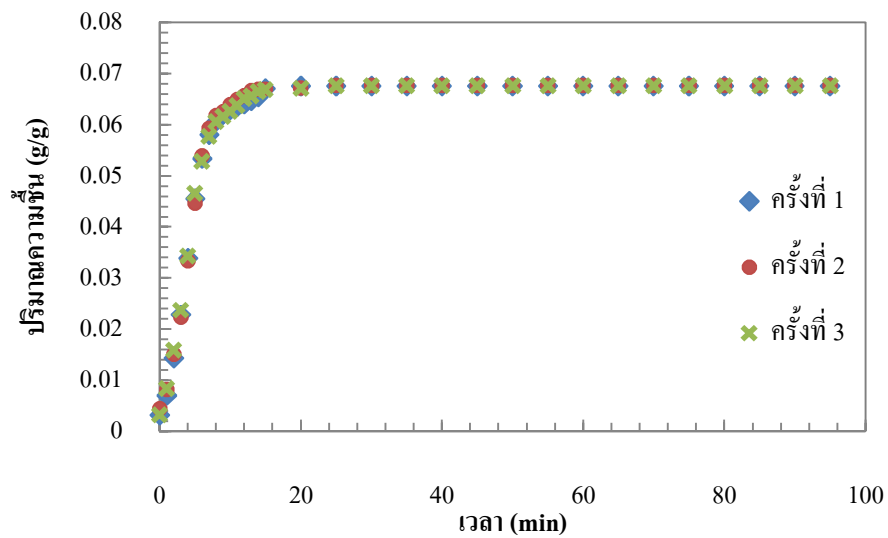
ภาพผนวกที่ ข3 ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 100 %RH อุณหภูมิ 45°C



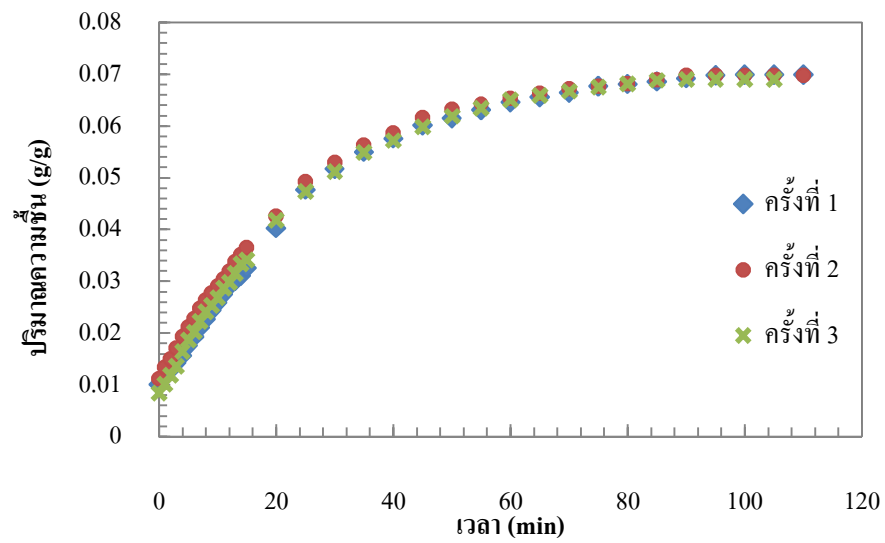
ภาพผนวกที่ ข4 ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 75 %RH อุณหภูมิ 25°C



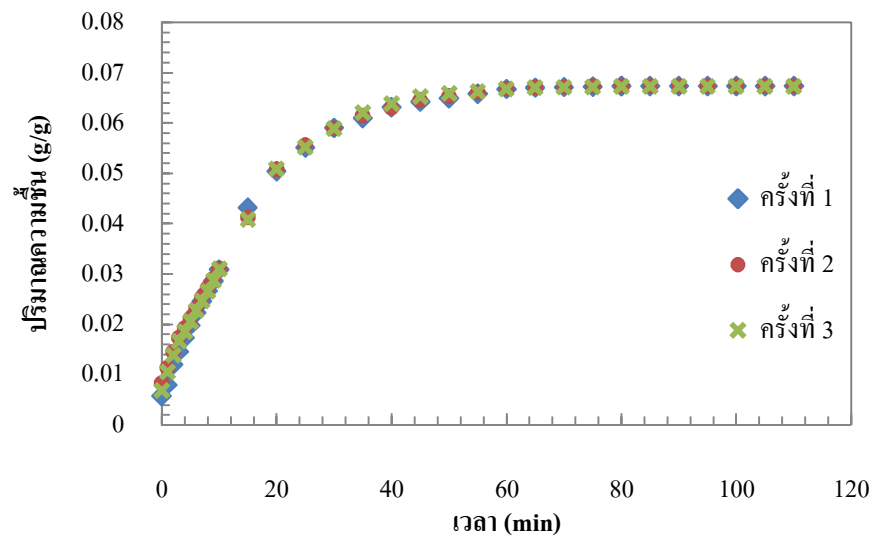
ภาพผนวกที่ ข5_ ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 75 %RH อุณหภูมิ 35°C



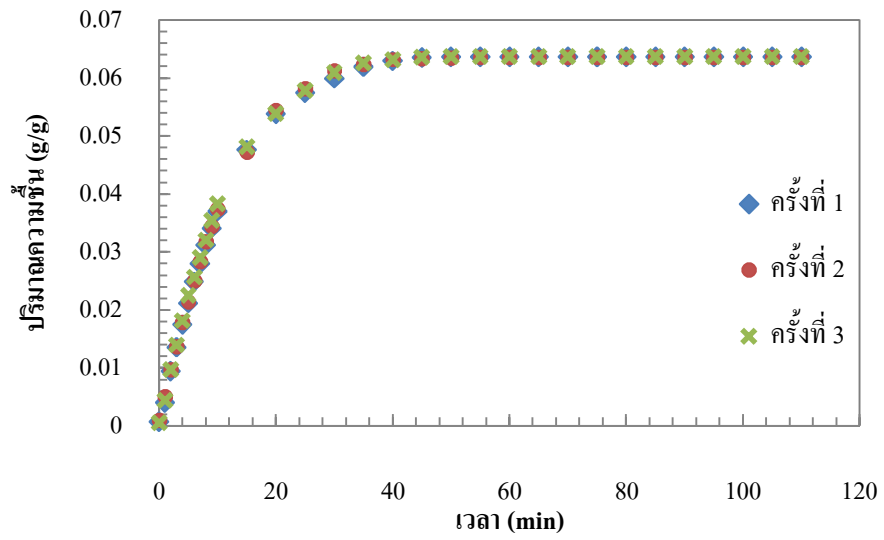
ภาพผนวกที่ ข6_ ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 75 %RH อุณหภูมิ 45°C



ภาพผนวกที่ ข7 ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 57.5 %RH อุณหภูมิ 25°C



ภาพผนวกที่ ข8 ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 54.5 %RH อุณหภูมิ 35°C



ภาพผนวกที่ ข9 ปริมาณความชื้นกับเวลาจากการทดลองที่ 51.5 %RH อุณหภูมิ 45°C

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวภัทรณัฐ อินทวิรัตน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	11 มิถุนายน 2527
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศบ.(วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยบูรพา, 2549
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นิสิตปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ ทุนการศึกษาที่ได้รับ	งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท พีคิวเคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติภายใต้สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)