

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์สารดูความชื้นที่เติมสารอินทรีย์และซีโอไลต์ด้วยวิธีการโซลเจล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน...50264

วันเดือนปี 28 เม.ย. 2547

Box containing text: .b.....
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SYNTHESIS OF INORGANIC AND ZEOLITE – HYBRID DESICCANT
BY SOL-GEL METHOD**



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง

การสังเคราะห์สารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์และซีโอไลต์
ด้วยวิธีการโซลเจล

โดย

นางสาวทิพวรรณ ศรีไกรสิทธิ์

นางสาวเบญจวรรณ พลศักดิ์

นายประพนธ์ ฐานะจินดานนท์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

รศ.ดร. วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

ประธานกรรมการ
(รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

Viron Boon-anang-uthayaกรรมการ
(รศ.ดร. วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา)

Suphat Nakhonกรรมการ
(ดร. ดวงกมล ณ ระนอง)

Prasert Kanyasakulกรรมการ
(ดร. พรสวรรค์ กาญจนวณิชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรินญาณิพนธ์เรื่อง การสังเคราะห์สารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์และซีโอไลต์
 ด้วยวิธีการโซลเจล
 โดย นางสาวทิพวรรณ ศรีไกรสิทธิ์
 นางสาวเบญจวรรณ พลศักดิ์
 นายประพนธ์ ฐานะจินคานนท์
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร. วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สังเคราะห์สารดูดความชื้นด้วยวิธีโซลเจลที่อุณหภูมิห้องและความดัน
 บรรยากาศ และเติมแคลเซียมคลอไรด์ 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ
 ในการดูดความชื้น พบว่าประสิทธิภาพการดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแคลเซียม
 คลอไรด์เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเติมซีโอไลต์ 10%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนัก สำหรับ
 คุณสมบัติด้านความพรุนและความแข็งแรง

จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเมื่อเติม
 แคลเซียมคลอไรด์ 20% และ 30% โดยน้ำหนักแห้ง พื้นที่ผิวภายนอกของสารดูดความชื้นจะไม่เรียบ
 และเมื่อเติมซีโอไลต์จะเห็นความเป็นรูพรุน ประสิทธิภาพการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นที่
 เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ
 ประสิทธิภาพการดูดความชื้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 40%, 60%, 85% และ 100% พบว่า SiO_2 -
 (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) มีประสิทธิภาพการดูดความชื้นสูงสุดที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์
 100%

Report Title Synthesis of Inorganic and Zeolite – Hybrid Desiccant by Sol-Gel Method
By Miss Tippawan Sreekaisit
 Miss Benjawan Ponsak
 Mr. Prapon Thanajindanon
Advisor Assoc. Prof. Dr. Anchaleephorn Waritswat Lothongkum
Co-Advisor Assoc. Prof. Dr. Virote Boonamnuayvitaya
 Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's University of Technology Thonburi
Report for Bachelor Degree in Chemical Engineering
 Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

In this work, we synthesized the desiccant by Sol-Gel method at room temperature and atmospheric pressure. Calcium chloride 20%, 30% and 40% by weight was added to investigate the efficiency of water vapor adsorption. Subsequently, zeolite 10%, 20%, 30% and 40% by weight was added for porosity and strength of the desiccant. The adsorption efficiency of the desiccant increased with an increase in calcium chloride. From SEM micrographs, the surfaces of the desiccant adding calcium chloride 20% and 30% by weight were not smooth and showed porous structures after adding zeolite. The adsorption efficiency of the desiccant adding calcium chloride and zeolite increased to zeolite of about 40% by weight. The SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) had highest adsorption efficiency at 100% RH comparing to 40%, 60% and 85% RH.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนบางส่วนจากโครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว.-ศ.คร. วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล ปีงบประมาณ 2545 และโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชนของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2545 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และใคร่ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ได้แก่ รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท รศ.ดร. วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร. ชราธร มงคลศรี ดร. สุพจน์ พัฒนศรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ซีไอโอดี (JRC-Z-HY5.3) กรมสรรพากร กองบัญชาการทหารอากาศ กรมทหารอากาศ ที่เอื้อเพื่อเครื่อง Supercritical Fluid Extraction ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยบูรพา และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่เอื้อเพื่อการใช้เครื่อง Surface Area and Pore Size Analyzer ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและเครื่อง Thermalgravimetric Analyzer นางสาวชฎาภา ฐยามานนท์ นางสาวปัทมัญญา รัตนสัมฤทธิ์ นายพงษ์ศักดิ์ วัฒนจรูญโรจน์ นายไชยยันต์ ไชยยะ และนายนิตินัย ขำมาลา ที่ตลอดเวลาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ในการทำงานวิจัยนี้

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวนาม ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใด ในรายงานนี้ผู้วิจัยขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้

นางสาวทิพวรรณ ศรีไกรสิทธิ์
นางสาวเบญจวรรณ พลศักดิ์
นายประพนธ์ ธนะจินดานนท์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 เทคโนโลยีโซลเจล	3
2.2 กระบวนการโซลเจล	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.4 ซีไอไลต์	8
2.5 การดูดซับ	11
2.5.1 สารดูดซับ	11
2.5.2 การจำแนกขนาดของรูพรุน	12
2.5.3 กลไกการดูดซับ	12
2.6 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ	13
2.6.1 สมการ Langmuir	14
2.6.2 สมการของ Branuer-Emmett-Teller(BET)	15
2.6.3 สมการ Dubinin - Astakhov (DA)	16
2.7 ค่าความชื้นคงที่ของสารละลาย	17
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	19
3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง	19
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 วิธีทดลอง	20
3.3.1 การสังเคราะห์สารดูดความชื้นด้วยวิธีการ โซลเจล	20
3.3.2 การปรับปรุงประสิทธิภาพในการดูดความชื้น	20
3.3.2.1 การเลือกสารอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี	20
3.3.2.2 การสังเคราะห์สารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์	20
3.3.2.3 การสังเคราะห์สารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์และซีโอไลต์	21
3.3.3 การนำไปดูดความชื้น	22
3.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	24
4.1 การผลิตสารดูดความชื้นด้วยวิธีการ โซลเจล	24
4.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดความชื้น	25
4.2.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของสารดูดความชื้นด้วยแคลเซียมคลอไรด์	25
4.2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์	25
4.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์ได้	33
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผล	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48
รายการอ้างอิง	49
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลอง	51
ภาคผนวก ข. ข้อมูลซีโอไลต์	76

สารบัญตาราง

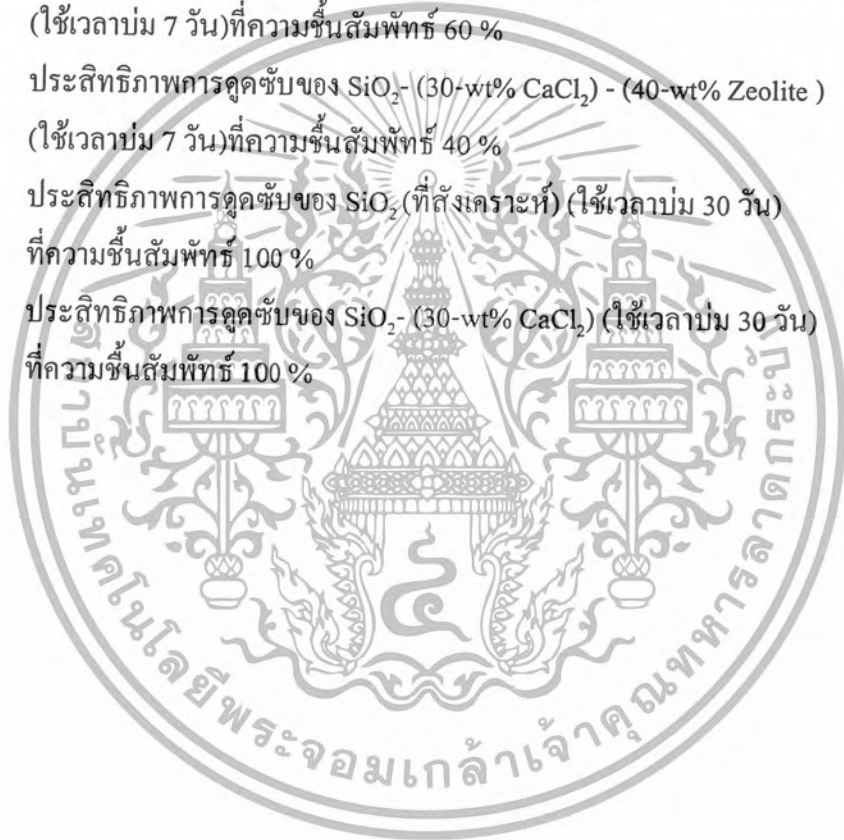
		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ	11
ตารางที่ 2.2	การจัดแบ่งขนาดรูพรุนตามมาตรฐานสากล	12
ตารางที่ 2.3	ค่าความชื้นคงที่ของสารละลาย	18
ตารางที่ 4.1	ค่า pH ของสารละลายในขั้นตอนต่างๆ ระหว่างเตรียม SiO ₂ -CaCl ₂	26
ตารางที่ 4.2	ระยะเวลาการเกิดเจลของ SiO ₂ -CaCl ₂	26
ตารางที่ 4.3	น้ำหนักของ SiO ₂ -CaCl ₂ ที่เตรียมได้	26
ตารางที่ 4.4	ปริมาณสารละลาย NH ₄ OH 8×10 ⁻³ mol/l ที่เติมใน SiO ₂ - (30-wt% CaCl ₂)-Zeolite	34
ตารางที่ 4.5	ค่า pH ของสารละลายในขั้นตอนต่างๆ ระหว่างเตรียม SiO ₂ - (30-wt% CaCl ₂)-Zeolite	34
ตารางที่ 4.6	น้ำหนักของ SiO ₂ - (30-wt% CaCl ₂)-Zeolite ที่เตรียมได้	35
ตาราง ก.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดความชื้น (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%	51
ตาราง ก.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO ₂ - (30-wt% CaCl ₂)- (40-wt% Zeolite) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ	52
ตาราง ก.3	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO ₂ (Commercial) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%	53
ตาราง ก.4	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO ₂ ที่สังเคราะห์ (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	54
ตาราง ก.5	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO ₂ - (20-wt% CaCl ₂) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	55
ตาราง ก.6	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO ₂ - (30-wt% CaCl ₂) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	57
ตาราง ก.7	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO ₂ - (40-wt% CaCl ₂) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	59
ตาราง ก.8	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO ₂ - (30-wt% CaCl ₂) - (10-wt% Zeolite) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	61
ตาราง ก.9	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO ₂ - (30-wt% CaCl ₂) - (20-wt% Zeolite) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตาราง ก.10	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) - (30-wt% Zeolite) (ใช้เวลาดำบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	65
ตาราง ก.11	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) - (40-wt% Zeolite) (ใช้เวลาดำบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	67
ตาราง ก.12	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) - (40-wt% Zeolite) (ใช้เวลาดำบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 85 %	69
ตาราง ก.13	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) - (40-wt% Zeolite) (ใช้เวลาดำบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60 %	71
ตาราง ก.14	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) - (40-wt% Zeolite) (ใช้เวลาดำบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40 %	72
ตาราง ก.15	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 (ที่สังเคราะห์) (ใช้เวลาดำบ่ม 30 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	73
ตาราง ก.16	ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) (ใช้เวลาดำบ่ม 30 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %	74



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่สำคัญชนิดต่างๆ	10
รูปที่ 2.2 การดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ต่างๆ	13
รูปที่ 2.3 Langmuir isotherm	14
รูปที่ 2.4 แบบจำลองการดูดซับโมเลกุลหลายชั้น	15
รูปที่ 2.5 The BET model for adsorption	15
รูปที่ 2.6 BET isotherm	16
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดูดซับความชื้น	22
รูปที่ 4.1 ลักษณะผลึกของ SiO_2 หลังการอบแห้ง	24
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของสารอนินทรีย์ต่างๆ	25
รูปที่ 4.3 ลักษณะผลึกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง หลังการอบแห้ง	27
รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 ที่ใช้ทางการค้า	27
รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 ที่สังเคราะห์	28
รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (20-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง	28
รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง	29
รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (40-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง	29
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบอัตราการคายซับของ SiO_2 และ SiO_2 - CaCl_2 โดยน้ำหนักแห้ง	30
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของ SiO_2 และ SiO_2 - CaCl_2 โดยน้ำหนักแห้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%	31
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของ SiO_2 และ SiO_2 - (20-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง ที่ใช้เวลานาน 7 และ 30 วัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%	32
รูปที่ 4.12 ลักษณะของ SiO_2 ที่สังเคราะห์ ก่อนและหลังดูดซับความชื้น	33
รูปที่ 4.13 ลักษณะของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง ก่อนและหลังดูดซับความชื้น	33
รูปที่ 4.14 ลักษณะเจลที่เกิดจากการควมแน่นของ SiO_2 , SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง และ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ	35
รูปที่ 4.15 ลักษณะผลึกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) หลังอบแห้ง	36
รูปที่ 4.16 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(10-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง	36

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) - (20-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง	37
รูปที่ 4.18 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) - (30-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง	37
รูปที่ 4.19 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) - (40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง	38
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบอัตราการคายซ้บของสารดูดซับความชื้นที่เดิมแคลเซียมคลอไรด์ และซีโอไลต์	39
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของสารดูดซับความชื้นที่เดิม แคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง และซีโอไลต์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%	40
รูปที่ 4.22 ลักษณะของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง ก่อนและหลังดูดซับความชื้น	41
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้น ด้วย SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ	42
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของ SiO_2 ทางการค้า SiO_2 ที่สังเคราะห์ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง และ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง	43
รูปที่ 4.25 Adsorption isotherm ของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง	44
รูปที่ 4.26 Logarithmic Dubinin-Astakhov equation ของการดูดซับความชื้นของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	45
รูปที่ 4.27 Logarithmic Langmuir equation ของการดูดซับความชื้นของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	45

รายการสัญลักษณ์

A	=	The maximum differential molar work (kJ/mol)
A, B	=	ค่าคงที่ในตารางที่ 2.3
C_c	=	ความเข้มข้นที่วัดได้ที่สภาวะสมดุล (mol/g)
C_s	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อิ่มตัว (mol/g)
E_0	=	พลังงานการดูดซับ (kJ/mol)
ΔG	=	Gibbs free energy
n	=	The heterogeneity of system
P	=	ความดัน (atm)
P_0	=	ความดันไออิ่มตัวของสารดูดซับ (atm)
p_0	=	ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ T เคลวิน (atm)
Q^0	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (mol/g)
q_c	=	ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ความเข้มข้น C_c (g/g)
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ (J/mol K)
RH	=	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (ความถูกต้องประมาณ $\pm 2\%$) (%)
T	=	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K)
V	=	ปริมาณการดูดซับ (g/g)
W	=	น้ำหนักดูดซับที่อุณหภูมิและความดันสัมพัทธ์ (g)
W_0	=	น้ำหนักดูดซับรวมมากที่สุด (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

การดูแลความชื้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมที่มีความจำเป็นต้องควบคุมความชื้นของผลิตภัณฑ์ เช่น อุตสาหกรรมอาหารสำเร็จรูป อุตสาหกรรมผลิตเมล็ดพันธุ์พืช อุตสาหกรรมผลิตสารเคมีหรือเวชภัณฑ์ อุตสาหกรรมเยกกีฬาธรรมชาติ ฯลฯ การดูแลความชื้นที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรม ได้แก่ ซิลิกาเจล อะลูมินาเจล คาร์บอนกัมมันต์ และซีโอไลต์ เป็นต้น ในปัจจุบันการดูแลความชื้นบางชนิดยังไม่มีการสังเคราะห์ขึ้นในประเทศจึงต้องนำเข้าและมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้ต้นทุนในการผลิตของอุตสาหกรรมที่มีการใช้การดูแลความชื้นเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จะสังเคราะห์สารที่มีความสามารถในการดูแลความชื้นสูงด้วยวิธีโซลเจลเพื่อหาแนวทางพัฒนาใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป เทคโนโลยีโซลเจลมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการสังเคราะห์สารเคลือบผิวเพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุที่ถูกเคลือบเกิดปฏิกิริยา ใช้ในการสังเคราะห์เซรามิก ใช้สังเคราะห์สารที่มีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) [1] เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 สังเคราะห์สารดูแลความชื้นโดยใช้วิธี โซลเจล
- 1.2.2 ปรับปรุงประสิทธิภาพการดูแลความชื้น โดยการเติมสารอนินทรีย์ที่มีความสามารถดูแลความชื้น ได้สูง (Inorganic hygroscopic compounds)
- 1.2.3 ศึกษาคุณสมบัติด้านความพรุนและความแข็งแรงของสารดูแลความชื้น โดยการเติมซีโอไลต์ในสารดูแลความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์
- 1.2.4 ศึกษาคุณสมบัติของสารดูแลความชื้นที่สังเคราะห์เพื่อคุณสมบัติที่เหมาะสมในการพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการสังเคราะห์สารดูแลความชื้นด้วยวิธี โซลเจล
- 1.3.2 สังเคราะห์สารดูแลความชื้นด้วยวิธี โซลเจลโดยการเติมสารอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูแลความชื้นสูง
- 1.3.3 สังเคราะห์สารดูแลความชื้นด้วยวิธี โซลเจลโดยการเติมสารอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูแลความชื้นสูง และเติมซีโอไลต์เพื่อคุณสมบัติด้านความพรุนและความแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.4 ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) และ Thermalgravimetric Analyzer (TGA)
- 1.3.5 สร้างแบบจำลอง Dubinin และ Langmuir เพื่ออธิบายประสิทธิภาพการดูดซับความชื้น
- 1.3.6 สรุปผลและจัดทำรายงาน

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 สังเคราะห์สารดูดความชื้นด้วยวิธีโซลเจล
- 1.4.2 ทดสอบหาสารอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูดความชื้นสูง ได้แก่ NaCl, KCl, CaCl₂, ZnCl₂, MgCl₂, MgSO₄, Mg (ClO₄)₂
- 1.4.3 สังเคราะห์สารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์จากข้อ 1.4.2 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง
- 1.4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์จากข้อ 1.4.2
- 1.4.5 เลือกสารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์ปริมาณที่เหมาะสมในการดูดความชื้น เพื่อนำไปสังเคราะห์สารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์และซีโอไลต์ ด้วยปริมาณซีโอไลต์ 10%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง
- 1.4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดความชื้นระหว่าง ซิลิกาเจล ซิลิกาเจล-สารอนินทรีย์ และ ซิลิกาเจล-สารอนินทรีย์-ซีโอไลต์
- 1.4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40%, 60%, 85% และ 100%
- 1.4.8 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์ได้ เช่น อัตราการคายซับ (Desorption) สูงสุด และปริมาณความชื้นที่ดูดซับได้สูงสุดจากการวิเคราะห์การดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption Isotherms)

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

ได้แนวทางการผลิตสารดูดความชื้นด้วยวิธีโซลเจล

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เทคโนโลยี โซลเจล [2-3]

Segel ได้ให้นิยาม กระบวนการโซลเจล คือ กระบวนการผลิตออกไซด์ของสารประกอบอนินทรีย์ทั้งจากการสลายตัวของคอลลอยด์และจากโลหะออกไซด์ รวมทั้งสารประกอบของไนไตรด์ และซิลไฟด์ ที่ใช้ในการผลิต Hybrid Organic-Inorganic

Dislich ได้ให้นิยามไว้ว่า กระบวนการโซลเจล คือ กระบวนการผลิตสารประกอบออกไซด์หลายตัวที่เป็นเนื้อเดียวกันถึงระดับอะตอม โดยไม่รวมถึงสารที่เป็นเนื้อเดียวกันเฉพาะที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น

กระบวนการโซลเจล นิยามโดยทั่วไปว่าเป็น วิธีการใช้คอลลอยด์ (Colloidal route) ในการสังเคราะห์เซรามิกรวมทั้งโซลและเจล

คอลลอยด์ (Colloid)

เป็นสารผสมของสาร 2 ชนิด ชนิดที่มีโมเลกุลต่อเนื่องกัน เรียกว่า เฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) หรือตัวกลางการกระจายตัว (Dispersion medium) และเฟสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) ที่มีโมเลกุลไม่ต่อเนื่องกัน แยกกันอยู่เป็นอนุภาค มีขนาดของโมเลกุลใหญ่สมบัติทั่วไปของคอลลอยด์มีดังนี้คือ

1. ตั้งทิ้งไว้ไม่ตกตะกอน เพราะอนุภาคมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา
2. เมื่อให้แสงจากต้นกำเนิดแสงบางชนิดผ่านไปยังคอลลอยด์จะสามารถมองเห็นลำแสงผ่านเป็นทาง
3. เมื่อใช้เครื่องมือที่เรียกว่าอัลตราไมโครสโคปส่องดู จะเห็นอนุภาคของคอลลอยด์มีการเคลื่อนที่ชนกันอยู่ตลอดเวลาและเคลื่อนที่ไปทุกทิศทุกทางอย่างไม่เป็นระเบียบ เรียกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

คอลลอยด์ เป็นสารเนื้อผสมแต่เนื่องจากอนุภาคองค์ประกอบของคอลลอยด์มีขนาดเล็ก จึงดูเหมือนกับเป็นสารเนื้อเดียวและมีลักษณะคล้ายกับสารละลาย ดังนั้นถ้าต้องการดูอนุภาคต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดพิเศษจึงจะมองเห็นได้ อนุภาคองค์ประกอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10^7 - 10^4 เซนติเมตร มีขนาดเล็กกว่าสารแขวนลอย สามารถผ่านรูพรุนของกระดาษกรองได้ แต่ไม่สามารถผ่านรูพรุนของเซลโลเฟน

คอลลอยด์มีทั้งที่เกิดเองตามธรรมชาติและที่เกิดจากการผสมสารสองชนิดเข้าด้วยกัน แบ่งออกได้ 4 ประเภท ตามสถานะของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางและสถานะของตัวกลาง ดังนี้

1. อิมัลชัน (Emulsion) คือ คอลลอยด์ที่เกิดจากอนุภาคของของเหลวกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว เช่น นมสด น้ำสลัด

2. แอโรโซล (Aerosol) คือ คอลลอยด์ที่เกิดจากอนุภาคของของแข็งหรืออนุภาคของของเหลวกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นก๊าซ เช่น ควันไฟ (คาร์บอน ซึ่งเป็นของแข็งกระจายตัวอยู่ในก๊าซ) เมฆ หมอก (น้ำ ซึ่งเป็นของเหลวกระจายอยู่ในอากาศ)

3. โซล (Sol) คือ อนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอย่างคงตัวภายในของเหลว โดยที่โซลจะมีความหนาแน่นของของแข็งมากกว่าของเหลวที่อยู่บริเวณรอบๆ อนุภาคของแข็งที่อยู่ในของเหลวจะมีขนาดเล็กมากและไม่เกิดการตกตะกอน สารที่ใช้ในการกระจายตัวของอนุภาคคอลลอยด์ของโซลโดยทั่วไปจะเป็นน้ำหรือเป็นสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำหรือแอลกอฮอล์เป็นส่วนใหญ่

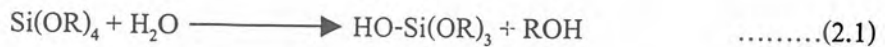
4. เจล (Gel) คือ อนุภาคของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนเชื่อมต่อกันเป็น 3 มิติ มีรูปแบบไม่แน่นอนขึ้นกับภาชนะที่บรรจุ ถ้าโครงสร้างของแข็งเกิดจากโซลที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ เจลที่เกิดขึ้นเรียกว่า Colloidal gel ถ้าโครงสร้างของแข็งประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าคอลลอยด์ เจลที่เกิดขึ้นเรียกว่า Polymeric gel โดยทั่วไปเจลจะขึ้นอยู่กับการรวมตัวระหว่าง โครงสร้างของของแข็งและตัวกลางของของเหลว ที่สภาวะสมดุลของเหลวที่อยู่ระหว่าง โครงสร้างของของแข็งจะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยไม่มีแรงกระตุ้นจากภายนอก ความต่อเนื่องของโครงสร้างของแข็งทำให้เจลมีความยืดหยุ่น ถ้าของเหลวที่อยู่ระหว่าง โครงสร้างของของแข็งประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่า Aquagel หรือ Hydrogel ซึ่งเป็นเจลที่บางสามารถตัดให้ขาดได้ง่าย แต่ถ้าของเหลวประกอบด้วยแอลกอฮอล์เป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่าเป็น Alcogel ถ้าคิงของเหลวออกจากเจลสารที่เหลือจะกลายเป็นของแข็งที่แตกออกได้ง่าย เรียกว่าเป็น Aerogel หรือ Xerogel ขึ้นอยู่กับการคิงของเหลวออก ดังนี้

Aerogel คือ เจลที่เกิดจากการทำให้เจลเหลวแห้งเหนือจุดวิกฤติ (Supercritical drying) ทั้งอุณหภูมิและความดันภายใต้สภาวะเหนือวิกฤติ (Supercritical condition) โดยใช้ Supercritical extraction วิธีนี้จะทำให้เจลมีรูปร่างเหมือน Alcogel ที่เตรียมได้แต่ปริมาตรจะลดลง

Xerogel คือ เจลที่เกิดจากการทำให้เจลเหลวแห้งด้วยสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ วิธีนี้จะทำให้เจลมีรูปร่างเหมือน Alcogel ที่เตรียมได้แต่จะเกิดการหดและแตกตัวและมีปริมาตรลดลง

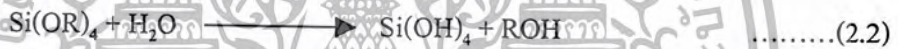
2.2 กระบวนการโซลเจล [3]

สารตั้งต้นที่นิยมใช้มากที่สุด คือ โลหะอัลคอกไซด์ (Metal alkoxides) ซึ่งเป็นสารประกอบประเภท Metalorganic ที่มีลิแกนด์อินทรีย์ (Organic ligand) ต่ออยู่กับอะตอมของโลหะ ตัวอย่างโลหะอัลคอกไซด์ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ Silicon tetraethoxide หรือเรียกว่า Tetraethoxysilane (TEOS: $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) นิยมใช้โลหะอัลคอกไซด์เป็นสารตั้งต้น เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เพราะไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าจับกับอะตอมของโลหะ ดังสมการ



เมื่อ R คือ โปรตอนหรือลิแกนด์อื่น (ถ้า R คือ หมู่อัลคิล -OR คือ หมู่อัลคอกซี)

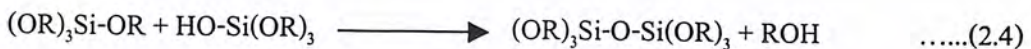
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดได้สมบูรณ์ (OR จะถูกแทนที่โดย OH จนหมด) หรือจะเกิดเพียงบางส่วน (Partially hydrolyzed: $\text{Si}(\text{OR})_{4-n}(\text{OH})_n$) นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดอย่างสมบูรณ์ คือ



สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดเพียงบางส่วน โมเลกุลสองโมเลกุลจะเชื่อมโยงกันได้โดยปฏิกิริยาควมน้ำ (Condensation) ซึ่งจะก่อให้เกิดโมเลกุลเล็กๆ เช่น น้ำ หรือแอลกอฮอล์ ดังสมการ



หรือ



ปฏิกิริยานี้จะเกิดต่อเนื่องทำให้ได้โมเลกุลที่ประกอบด้วยซิลิกอนใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization)

พอลิเมอร์ คือ โมเลกุลใหญ่ที่เกิดจากการรวมตัวกันของมอนอเมอร์จำนวนมากที่เกิดการสร้างพันธะอย่างน้อยสองพันธะ ถ้ามอนอเมอร์สามารถเกิดพันธะได้มากกว่าสองพันธะจะสามารถ

รวมตัวได้โมเลกุลใหญ่ที่มีขนาดไม่จำกัด และเป็นขนาด Macroscopic คือ สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าแพร่กระจายไปทั่วทั้งสารละลาย ซึ่งจะเรียกว่าการเกิดเจล (Gelation)

การเกิดเจล คือ การที่คอลลอยด์เกิดการควบแน่นเป็นโมเลกุลใหญ่แพร่กระจายเชื่อมโยงไปยังโมเลกุลอื่นในทิศทางที่ทำให้เกิดเป็นโครงร่างแหของเจล และตัวทำละลายจะระเหยอย่างรวดเร็ว โครงร่างแหแพร่กระจายทั่วภาชนะและมีความหนืดมากจนกระทั่งโซลไม่สามารถไหลได้ เรียกเวลาที่คอลลอยด์เกิดการควบแน่นเป็นโมเลกุลใหญ่ที่สมบูรณ์นี้ว่า Gel point โดยทั่วไปการสร้างพันธะไม่ได้หยุดที่ Gel point แต่โครงร่างแหของเจลจะถูกสร้างขยายออกไปเรื่อยๆ เนื่องจากที่ Gel point มี 2 เฟส คือ โซล และโครงร่างแหของเจล ซึ่งโซลจะควบแน่นต่อเป็นร่างแหของเจล ทำให้เจลมีความแข็งแรงมากขึ้น

การบ่ม (Aging) คือ การทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติหลังการเกิดเจล ซึ่งทำให้โครงสร้างของเจลมีความแข็งแรงขึ้น และมีการหดตัวของโครงสร้างทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กกลง Aging อาจรวมถึงการควบแน่นและการตกตะกอนใหม่ของมอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer)

การอบแห้งโดยการระเหยภายใต้สภาวะปกติ (Normal condition) จะทำให้เกิดการหดตัวของโครงร่างของเจล (Shrinkage) ทำให้ปริมาตรลดลง 5 ถึง 10 เท่าจากเดิม ซึ่งเจลที่เกิดจากการอบแห้งที่สภาวะปกติ เรียกว่า Xerogel แต่ถ้านำเจลไปอบภายใต้สภาวะเหนือวิกฤติ ซึ่งไม่มีชั้นผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและไอ น้ำ ดังนั้นจึงไม่มี Capillary pressure ทำให้เจลหดตัวเพียงเล็กน้อย เจลที่ได้จากการอบแบบนี้ เรียกว่า Aerogel

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hajime Tamon และคณะ [4] ศึกษาการควบคุมโครงสร้างรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) ของซิลิกาแอโรเจล (Silica aerogel) ที่เตรียมจากเตตระเมทอกซิออร์โทซิลิเกต (Tetramethoxyorthosilicate: TMOS) ด้วยกระบวนการโซลเจลพอลิเมอไรเซชัน (Sol-gel polymerization) ภายใต้สภาวะพื้นฐานและใช้คาร์บอนไดออกไซด์ทำให้แห้งที่สภาวะเหนือวิกฤติ จากผลของลักษณะเฉพาะการดูดซับไนโตรเจน แอโรเจลเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลางพื้นที่ผิวสูง (941 ตารางเมตรต่อกรัม) และมีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) เล็กน้อย จากผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของแอมโมเนีย (NH_3) ต่อ TMOS ตั้งแต่ 7.21×10^{-4} ถึง 4.12×10^{-1} พบว่าปริมาตรของรูพรุนขนาดกลางของแอโรเจลเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแอมโมเนีย (NH_3) ต่อ TMOS เพิ่มขึ้น

Hajime Tamon และคณะ [5] สังเคราะห์ซิลิกาเจลชนิดแอโรเจลด้วยวิธีโซลเจลพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate: TEOS) เป็นสารตั้งต้น

และใช้แอมโมเนียและกรดเกลือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะเตรียมภายใต้สภาวะพื้นฐานและทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อบแห้งด้วยเครื่อง Supercritical carbon dioxide วัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยอาศัยหลักการดูดซับ ไนโตรเจน แอโรเจลที่เตรียมจากเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกตเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลางพื้นที่ผิวสูง (900 ตารางเมตรต่อกรัม) จากผลการทดลองพบว่าคุณสมบัติของแอโรเจลขึ้นกับสถานะในการเกิดปฏิกิริยาโซลเจลพอลิเมอไรเซชัน

Julia Mrowiec-Biaton และคณะ [6] ศึกษาการดูดซับไอน้ำด้วยเทคโนโลยีโซลเจล โดยเติมแคลเซียมคลอไรด์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับไอน้ำ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปดูดไอน้ำในภาชนะปิดเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักแล้วนำไปอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 100 ครั้ง โดยประสิทธิภาพการดูดซับยังคงเหมือนเดิม คือ สามารถดูดซับได้ประมาณ 0.7-0.75 กิโลกรัม น้ำต่อ กิโลกรัมของสารดูดซับ จากการทดลองพบว่า การดูดซับเกิดในลักษณะหลายชั้น (Multilayer) และนำผลที่ได้จากการทดลองไปสร้างเส้นกราฟความดันไอที่อุณหภูมิคงที่ (Vapor pressure isotherm) โดยใช้สมการ Dubinin-Astakhov แสดงปริมาณการดูดซับภายในรูพรุน ดังสมการ

$$V(A) = V_{mi}(A) + V_m(A) \quad \dots\dots(2.5)$$

เมื่อ $A = \frac{p}{p_0} = \exp\left(-\frac{RT \ln(p_0/p)}{T}\right)$ คือ Adsorption potential ที่อุณหภูมิ T
 p/p_0 = สัดส่วนความชื้นสัมพัทธ์ ในช่วง 0-0.25

และทำการศึกษาลักษณะรูพรุนของซิลิกาต่อแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน โดยใช้สารตั้งต้นเป็นเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต และใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับความชื้น [7] ได้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการนี้ 2 ชนิด แตกต่างกันในวิธีการทำให้แห้ง โดยวิธีที่ 1 คือ ทำให้แห้งที่สถานะเหนือวิกฤตจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอโรเจล วิธีที่ 2 คือ ปล่อยให้แอลกอฮอล์ (Alcogel) แห้งที่อุณหภูมิห้องจะได้เป็นซีโรเจล (Xerogel) โดยการเตรียมด้วยวิธีนี้ทั้งแอโรเจลและซีโรเจลจะประกอบด้วยแคลเซียมคลอไรด์ 17-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ในการตรวจสอบการดูดซับน้ำสามารถดูดซับได้มากถึง 1 กิโลกรัม น้ำต่อกิโลกรัมของสารดูดซับ ซึ่งสารดูดซับสามารถนำมาทำให้แห้งและนำกลับมาใช้ได้มากถึง 50 ครั้ง

นอกจากนี้ยังศึกษาสารดูดซับชนิด $\text{SiO}_2\text{-LiBr}$ โดยเตรียมจากกระบวนการเทคโนโลยีโซลเจล [8] คือ SiO_2 70% โดยน้ำหนักแห้งและเติม LiBr 30% โดยน้ำหนักแห้ง นำสารดูดซับนี้มาดูดซับไอน้ำที่ความดันสัมพัทธ์สูง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับ 0.80 กิโลกรัม น้ำต่อกิโลกรัมของสารดูดซับ โดยมีพื้นที่ผิว (S_{BET}) เท่ากับ 520 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน V_p (N_2) เท่ากับ 1.05 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.5 นาโนเมตร สารดูดซับนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกกว่า 100 ครั้งด้วยการไล่น้ำที่ถูกดูดซับไว้ออกไปที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.4 ซีโอไลต์ (Zeolite) [9]

ซีโอไลต์เป็นผลึกไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline hydrous aluminumsilicate) ของอัลคาไลน์และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม สตรอนเทียม และแบเรียม ซีโอไลต์ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2299 โดย Cronstedt เขาพบว่าเมื่อให้ความร้อนกับสารที่เป็นผลึกชนิดหนึ่ง เมื่อนำไปใส่น้ำจะให้ฟองคล้ายน้ำเดือดจึงให้ชื่อว่า Zeolite ซึ่งมาจากภาษากรีก 2 คำ คือ Zeo = Boil และ Lite = Stone

โครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบไปด้วยช่องว่าง (Channels) ที่มีการเชื่อมต่อกันจำนวนมาก ซึ่งมีแคตไอออนและโมเลกุลของน้ำเกาะเชื่อมอยู่ภายใน แคตไอออนนี้สามารถแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนอื่นได้ คือ มีคุณสมบัติเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เมื่อโมเลกุลของน้ำผ่านเข้ามาในช่องว่างทำให้ไอออนที่อยู่ในน้ำสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในโครงสร้างได้ คุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำซีโอไลต์ไปใช้ในกระบวนการทำน้ำอ่อน (Water softening) และบำบัดน้ำ (Water treatment) ปฏิกริยานี้ซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออน (Na^+) กับแคลเซียมไอออน (Ca^{++}) ที่มีอยู่ในน้ำกระด้าง ในขณะที่ปล่อยให้น้ำกระด้างไหลผ่านซีโอไลต์ นอกจากนี้โลหะหนักอื่นๆ เช่น ตะกั่วปรอท แคลเซียม ซิลเวอร์ไอออน ก็สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นเดียวกัน

เมื่อซีโอไลต์ได้รับความร้อน โมเลกุลของน้ำภายในช่องว่างจะหลุดออกมาและน้ำจะระเหยออกอย่างต่อเนื่อง โดยโครงสร้างของโมเลกุลไม่เปลี่ยนแปลงหรือบอบสลาย และหลังจากการกำจัดน้ำ (Dehydration) แล้ว ช่องว่างในโครงสร้างโมเลกุลสามารถถูกเติมด้วยน้ำได้เช่นเดิม ซึ่งเรียกว่า Reversible dehydration

ซีโอไลต์ได้ชื่อว่าเป็นสารโมเลกุลตาข่าย (Molecular sieve) เนื่องจากโมเลกุลมีช่องว่างที่สม่ำเสมอจำนวนมาก ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติคล้ายตะแกรง (Sieve) มีขนาดของช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ คือประมาณ 3-10 อังสตรอม ซึ่งต่างจากสารดูดซับอื่น เช่น คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) อะลูมินากัมมันต์ (Activated alumina) ซิลิกาเจล (Silica gel) ซึ่งไม่มีโครงสร้างเป็นโครงสร้างผลึก (Crystal structure) และช่องว่างระหว่างโมเลกุลไม่สม่ำเสมอ ซีโอไลต์อาจมีขนาดตั้งแต่ 20-50 อังสตรอม หรือ 20-1000 อังสตรอม

ซีโอไลต์แสดงคุณสมบัติเป็นสารดูดซับที่ดี สามารถแยกก๊าซและไอของผสม เช่น แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น กระบวนการดูดซับ (Adsorption) จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซีโอไลต์ และขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์มีทั้งที่พบตามธรรมชาติ (Natural หรือ Mineral zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้น แต่ละชนิดจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ที่พบตามธรรมชาติมีมากกว่า 35 ชนิด ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์มีถึงประมาณ 100 ชนิด เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน โครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์จะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

1. Degree of hydration
2. Density and void volume when dehydrated
3. Stability of crystal structure
4. Carbon exchange properties
5. Uniform molecular sized channels
6. Various physical properties
7. Adsorption of gas and vapor
8. Catalytic properties

ซีโอไลต์ธรรมชาติ

ซีโอไลต์ธรรมชาติพบทั้งที่อยู่บนผิวโลกและใต้มหาสมุทร จะพบมากในโพรงของหินบะซอลท์ และหินภูเขาไฟ (Volcanic rock) มีอยู่มากกว่า 35 ชนิด แต่เดิมซีโอไลต์ธรรมชาติถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง อุตสาหกรรมกระดาษ ปัจจุบันยังใช้ในอุตสาหกรรมแยกก๊าซธรรมชาติ และแยกแอมโมเนียในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย เป็นต้น

ซีโอไลต์สังเคราะห์

ซีโอไลต์สังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ที่เตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีโดยมีการควบคุมสภาวะเพื่อให้เกิดผลึกจำนวนมากขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เช่น ซีโอไลต์ เอ (Zeolite A) ซีโอไลต์เอ็กซ์ (Zeolite X) ซีโอไลต์วาย (Zeolite Y) ซีโอไลต์แอล (Zeolite L) ซีโอไลต์เอฟ (Zeolite F) ซีโอไลต์เอ็ม (Zeolite M) เป็นต้น

ซีโอไลต์สังเคราะห์มีประโยชน์และถูกนำมาใช้มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ เนื่องจากมีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างแน่นอน และค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสารปนเปื้อน เช่น เหล็กน้อย ซีโอไลต์ธรรมชาติจะมีเหล็กปนเปื้อนอยู่มากกว่า ปัจจุบันซีโอไลต์มีประโยชน์และมีบทบาทในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น

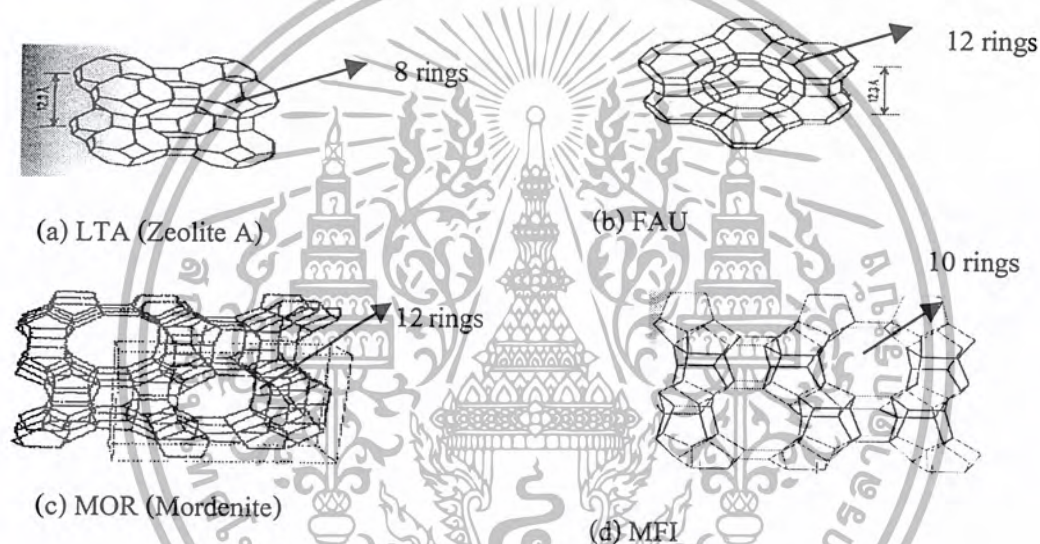
1. ใช้เป็นสารดูดซับในการแยกและทำให้บริสุทธิ์ในกระบวนการอุตสาหกรรมทางเคมี เช่น ในกระบวนการอบแห้งของก๊าซธรรมชาติ การแยกคาร์บอนไดออกไซด์ และสารองค์ประกอบซัลเฟอร์จากก๊าซธรรมชาติ แยกสารที่ทำให้เกิดมลภาวะ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ออกจากอากาศ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ในกระบวนการการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Cracking catalyst) ในอุตสาหกรรมน้ำมันใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็นแก๊สโซลีน

3. ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน เช่น แยกสารเรดิโอไอโซโทป (Radioisotope) จากกากของเสีย กำจัดแอมโมเนียในน้ำทิ้ง กำจัดสารโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว เหล็ก โปรท แมงกานีส เป็นต้น

เนื่องจากซีโอไลต์มีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซีโอไลต์แต่ละชนิดจึงมีคุณสมบัติเหมาะในการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อนำซีโอไลต์ไปใช้งานในด้านใดจึงควรศึกษาคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อน เพื่อให้สามารถใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ ที่สำคัญ แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่สำคัญชนิดต่างๆ [10]

อัตราส่วน Si/Al จะแสดงความเป็นขั้วของซีโอไลต์ ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วน Si/Al มากกว่า 10 จะถูกพิจารณาว่าเป็นสารที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ขณะที่ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วน Si/Al น้อยกว่า 8 จะถูกพิจารณาว่าเป็นสารที่มีขั้วและชอบน้ำ (Hydrophilic)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ [10]

Type	Isotypes	Pore window (Free diameter)	Si/Al ratio	Pores/Channels
LTA	A zeolite	8-ring: 0.41 nm	~1	3D spherical 1.14 nm cavities
FAU	X zeolite Y zeolite	12-ring: 0.74 nm	1-1.5 (X) 1.5-3 (Y)	3D spherical 1.18 nm cavities
MOR	Mordenite	12-ring: 0.70 nm	5-20	2D straight 0.70 nm channels
MFI	ZSM-5 Silicalite-1	10-ring: 0.60 nm	~30 (ZSM-5) (Silicalite)	3D straight 0.60 nm channels with 0.90 nm intersection cavities

2.5 การดูดซับ [11]

การดูดซับ คือ กระบวนการจับโมเลกุลของของเหลวหรือก๊าซด้วยของแข็งหรือของเหลว โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) จะอยู่บนผิวของสารดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นของแข็ง นิยมใช้สารประกอบที่มีรูพรุนเป็นสารดูดซับ เพราะว่ามีพื้นที่ผิวภายในมาก เมื่อโมเลกุลของของไหลผ่านเข้าไปในสารดูดซับก็จะถูกดูดไว้ภายในรูพรุน ซึ่งกระบวนการดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของสารดูดซับ คุณสมบัติของทั้งสารถูกดูดซับและสารดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (Molecular layers) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว และขนาดรูพรุนของสารดูดซับ การดูดซับโมเลกุลของสารบนผิวของสารดูดซับ อาจเกิดจากแรงทางกายภาพหรือแรงจากทางเคมีหรือจากทั้งสองแรงร่วมกัน

2.5.1 สารดูดซับ

สารดูดซับสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. สารดูดซับแบบไม่มีขั้ว (Non-polar adsorbent) จะเกิดการดูดซับแบบกายภาพ สารดูดซับที่สำคัญของกลุ่มนี้ คือ คาร์บอนกัมมันต์
2. สารดูดซับแบบมีขั้ว (Polar adsorbent) การดูดซับที่เกิดขึ้นกับสารประเภทนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลก๊าซและผิวของสารดูดซับ ได้แก่ พวกออกไซด์ เช่น ออกไซด์ของซิลิกา และออกไซด์ของโลหะ วัสดุจำพวกซิลิกา ได้แก่ ซิลิกาเจล ฟูลเลอร์เอิร์ธ (Fuller's earth)
3. สารดูดซับประเภทที่อาศัยปฏิกิริยาเคมี สารดูดซับนี้จะมีผิวหน้าที่ดูดซับทางเคมี โดยทั่วไปสารดูดซับที่ใช้ ได้แก่ โคลโลไมต์ คาร์บอนกัมมันต์ อัลคาไลน์อะลูมินา ซิลิกาเจลกัมมันต์ และเมงกานีสออกไซด์กัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างสารดูดซับที่นิยมใช้ในกระบวนการต่าง ๆ

คาร์บอนกัมมันต์ชนิดผลิตโดยวิธีไพโรไลซิสจากไม้หรือถ่านหิน คาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตจากปิโตรบีนซินิยมใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

อะลูมินากัมมันต์และอะลูมินาเจล ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความต้านทานการสะท้อนและการถูกขจัดสีได้ดี และสามารถนำอะลูมินากัมมันต์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้อีกโดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 177 องศาเซลเซียส

ซิลิกาเจล (Silica gel) เป็นของแข็งออสฐานและผลิตได้จากซิลิกา ซิลิกาเจลไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการดูดซับในสถานะที่เป็นต่าง ๆ หรือในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก สามารถนำซิลิกาเจลที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 175-180 องศาเซลเซียส

2.5.2 การจำแนกขนาดของรูพรุน [12]

จากการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างและขนาดของรูพรุน พบว่ามีหลายลักษณะแตกต่างกันของแข็งบางชนิดอาจจะมีรูพรุนขนาดเล็กเท่ากับขนาดโมเลกุล หรือเพียง 2-3 อังสตรอม แต่บางชนิดอาจมีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นล้านๆ อังสตรอมก็ได้ Dubinin ได้จำแนกขนาดของรูพรุนโดยอาศัยสมบัติด้านการดูดซับและการควบแน่นในรูพรุน การจัดแบ่งตามลักษณะนี้ต่อมาได้รับการยอมรับจากที่ประชุม The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) และให้ถือเป็นมาตรฐานสากลดังนี้

ตารางที่ 2.2 การจัดแบ่งขนาดรูพรุนตามมาตรฐานสากล [12]

ชื่อรูพรุน	ความกว้างของรูพรุน
รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore)	น้อยกว่า 20 อังสตรอม
รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore)	ระหว่าง 20-500 อังสตรอม
รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore)	มากกว่า 500 อังสตรอม

ตัวเลขที่บอกขนาดรูพรุนในตารางเป็นค่าประมาณ ทั้งนี้ด้วยเหตุว่าความกว้างของรูพรุนที่จัดแบ่งแต่มีจะมีปัญหาในการตัดสินว่าเป็นรูพรุนประเภทใด ปกติจะใช้สมบัติด้านการดูดซับประกอบการพิจารณา ตัวอย่างเช่น รูพรุนขนาด 20 อังสตรอม ที่คิดเคียวไปมาและมีการเชื่อมโยงกับรูพรุนอื่นจะมีแรงดูดซับมากกว่ารูพรุนขนาดเดียวกันที่ตรงและไม่มีการเชื่อมโยง รูพรุนกรณีแรกจัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กและกรณีหลังจัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง

2.5.3 กลไกการดูดซับ [2]

โดยทั่วไปการดูดซับเกิดขึ้นผ่าน 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1. การแพร่ไปยังผิวของสารดูดซับ (Diffusion to adsorbent surface) โมเลกุลของสาร

ดูดซับแพร่ผ่าน Bulk phase ไปยังผิวด้านนอกของอนุภาคของสารดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การผ่านเข้ารูพรุนของสารดูดซับ (Migration into pores of adsorbent) โมเลกุลของสารดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ผิวด้านนอกซึ่งมีพื้นที่น้อยไปยังรูพรุนภายในอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าและการดูดซับเกือบทั้งหมดจะยึดติดอยู่ในรูพรุน

3. การดูดซับชั้นเดียวของสารดูดซับอย่างรวดเร็ว (Monolayer build up of adsorption) โมเลกุลของสารดูดซับจะยึดติดอยู่ที่ผิวภายในรูพรุน

2.6 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Equilibrium adsorption and adsorption isotherm) [11]

ปริมาณการดูดซับ (V) ต่อปริมาตรหรือมวลของสารดูดซับ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และระบบ นั่นคือ

$$V = f(T, P, \text{ระบบ}) \dots\dots\dots(2.6)$$

เมื่อกำหนดระบบหรือพิจารณาระบบใดระบบหนึ่ง สมการจะกลายเป็น

$$V = f(T, P) \dots\dots\dots(2.7)$$

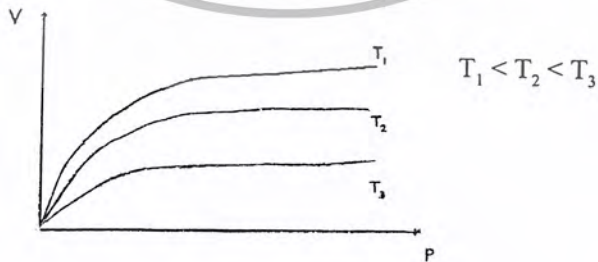
ในการเก็บข้อมูลจากการดูดซับตามตัวแปรในสมการ สามารถทำได้โดย

- เมื่อ T คงที่ $V = f(P)$ เรียกว่า Isothermal adsorption
- เมื่อ P คงที่ $V = f(T)$ เรียกว่า Isobaric adsorption
- เมื่อ V คงที่ $P = f(T)$ เรียกว่า Isosteric adsorption

นิยามศึกษาการดูดซับในลักษณะที่อุณหภูมิคงที่

การดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm)

เมื่ออุณหภูมิคงที่ การดูดซับจะเพิ่มตามความดัน เนื่องจาก การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ต่างๆ [11]

2.6.1 สมการ Langmuir

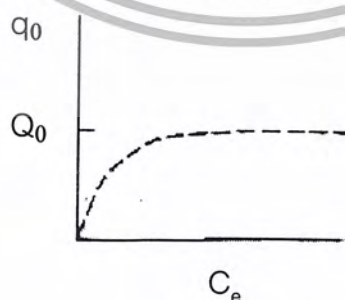
เป็นสมการคณิตศาสตร์ที่สำคัญที่สุดที่อธิบายการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ นิยมใช้อธิบายหรือศึกษาทฤษฎีหรือกลไกของปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) และการคำนวณหรือออกแบบสารดูดซับเงื่อนไขของสมการคือ

- เป็นการดูดซับ โมเลกุลชั้นเดียว
- พลังงานการดูดซับเท่ากันทุกตำแหน่ง
- โมเลกุลที่ถูกดูดซับแต่ละตำแหน่งเป็นอิสระแก่กัน

ได้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$q_e = \frac{Q^0 b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

เมื่อ	q_e	= ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ความเข้มข้น C_e
	Q^0	= ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
	C_e	= ความเข้มข้นที่วัดได้ทีสภาวะสมดุล
	b	= ค่าคงที่ = $b_0 e^{-\Delta H/RT}$
ให้	b_0	คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับค่าคงที่ b
	ΔH	คือ เอนทัลปีของการดูดซับ
	R	คือ ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ
	T	คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)



รูปที่ 2.3 Langmuir isotherm [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 สมการของ Branuer-Emmett-Teller (BET)

ในปี 1938 Branuer-Emmett-Teller ได้ศึกษากลไกของการดูดซับต่อจาก Langmuir ในส่วนที่เกี่ยวกับการจัดเรียงโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นที่สองและชั้นที่สูงกว่า ทั้งนี้เพราะก่อนหน้านี้เขาได้หลักฐานจากการทดลองที่ยืนยันได้แน่ชัดว่า การดูดซับจะไม่เกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว แต่จะมีการดูดซับในชั้นที่สองและชั้นที่สูงกว่าติดตามมาด้วยเสมอ ตามแนวความคิดของ BET ถือว่า เมื่อระบบอยู่ในสมดุลที่ความดันใดๆ ในแต่ละฐานดูดซับบนพื้นผิวจะมีโมเลกุลของสารถูกดูดซับจำนวนหนึ่งกลั่นตัวอยู่บนฐานดูดซับแต่ละฐานมากน้อยต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการดูดซับ โมเลกุลหลายชั้น [11]

รูปที่ 2.5 The BET model for adsorption [11]

เขาสมมติว่าจำนวนโมเลกุลที่ระเหยออกต่อวินาทีในชั้นใดชั้นหนึ่งจะเท่ากับจำนวนโมเลกุลที่กลั่นตัวต่อวินาทีในชั้นที่ถัดลงไป อธิบายได้โดยสมการ

$$q = \frac{BC_e Q^o}{(C_s - C_e)[1 + (B - 1)(C_e / C_s)]} \dots\dots\dots(2.9)$$

เมื่อ q_c = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ความเข้มข้น C_s

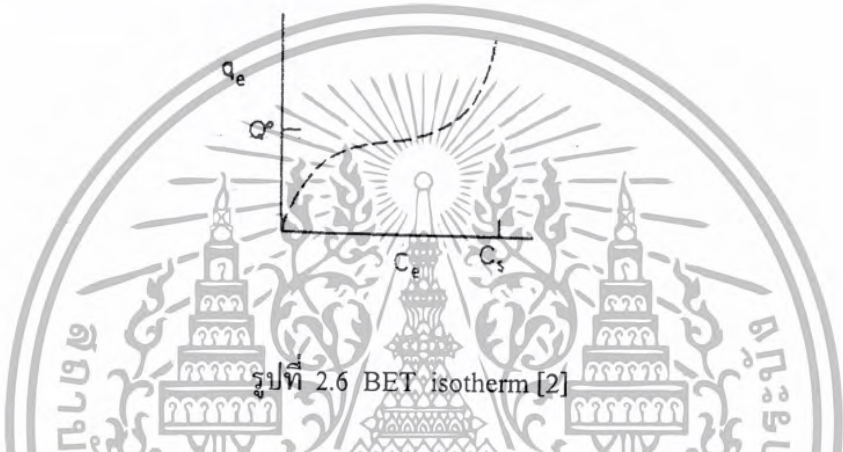
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Q^0 = ความเข้มข้นของสารดูดซับที่ถูกลดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ
- C_s = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อิ่มตัว
- C_e = ความเข้มข้นที่วัดได้ที่สภาวะสมดุล
- B = ค่าคงที่

สามารถเขียนความสัมพันธ์เชิงเส้นได้

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)q_e} = \frac{1}{BQ^0} + \left(\frac{B-1}{BQ^0}\right)\left(\frac{C_e}{C_s}\right) \dots\dots\dots(2.10)$$

BET isotherm แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 BET isotherm [2]

2.6.3 Dubinin – Astakhov (D-A) equation [13]

นิยมใช้สมการ Dubinin – Astakhov อธิบายการดูดซับของสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กอาศัยสมมติฐานของแบบจำลอง Langmuir ดังนี้

1. ผิวของสารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้เท่าเทียมกัน ในกรณี que คิดว่าผิวสารดูดซับมีจุดกัมมันต์ ให้ถือว่าจุดกัมมันต์แต่ละจุดมีความสามารถเท่าเทียมกัน
2. โมเลกุลที่ดูดซับอยู่ไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน
3. การดูดซับเกิดขึ้นจากกลไกที่เหมือนกันและที่สารดูดซับมีโครงสร้างเหมือนกัน
4. การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวบนผิวของสารดูดซับ

หลักการพื้นฐานของสมการ Dubinin – Astakhov กล่าวว่า The maximum differential molar work (A)

$$A = -\Delta G = RT \ln(p_0/p) \dots\dots\dots(2.11)$$

เมื่อ A = The maximum differential molar work

ΔG = Gibbs free energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- R = ค่าคงที่ของก๊าซอุดมคติ
- p = ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ T (เคลวิน)
- p₀ = ความดันไออิ่มตัวของสารถูกดูดซับ

สมการพื้นฐานของสมการ Dubinin – Astakhov

$$W = W_0 \exp \left[- \left(\frac{A}{E_0} \right)^n \right] \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

- เมื่อ W = น้ำหนักดูดซับที่อุณหภูมิและความดันสัมพัทธ์
- W₀ = น้ำหนักดูดซับรวมมากที่สุด
- E₀ = พลังงานการดูดซับ
- n = The heterogeneity of system

สมการ Dubinin – Radushkevich ให้ n = 2 ในกรณีที่ดูดซับไอ

$$= W_0 \exp \left[- \left(\frac{A}{E_0} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

2.7 ค่าความชื้นคงที่ของสารละลาย (Anthony Wexler) [2]

เนื่องจากการหาความสามารถในการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นต้องควบคุมความชื้นให้คงที่ โดยอาศัยสารละลายเกลืออิมิตัว

ปริมาณของน้ำและสารละลายเกลือที่มากเกินพอในการละลาย ทำให้เกิดสารละลายที่อิมิตัวและเกิดค่าคงที่ของความชื้นสัมพัทธ์ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$RH = A \exp(B/T) \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

- เมื่อ RH คือ เฮอร์เซนต์ความชื้นสัมพัทธ์ (ความถูกต้องประมาณ ± 2%)
- T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
- A, B คือ ค่าคงที่ แสดงดังตารางที่ 2.3

ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะเปลี่ยนแปลงตามช่วงของอุณหภูมิดังแสดงในตารางที่ 2.3 และสามารถหาความดันไอได้จากสมการ

$$p = (RH/100) \times p_0 \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าความชื้นคงที่ของสารละลาย [2]

Compound	Temperature (° C)	RH 25 ° C	A	B
NaOH•H ₂ O	15-60	6	5.48	27
LiB•2H ₂ O	10-30	6	0.23	996
ZnBr ₂ •2H ₂ O	5-30	8	1.69	455
KOH•2H ₂ O	20-65	9	0.014	1924
LiCl•H ₂ O	11-22	11	14.53	-75
CaBr ₂ •6H ₂ O	15-65	14	0.17	1360
LiI•3H ₂ O	15-25	18	0.15	1424
CaCl ₂ •6H ₂ O	5-45	29	0.11	1653
MgCl ₂ •6H ₂ O	5-45	33	29.26	34
NaI•2H ₂ O	10-30	38	3.62	702
Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O	5-35	51	1.89	981
Mg(NO ₃) ₂ •6H ₂ O	0-35	53	25.28	220
NaBr•2H ₂ O	0-35	58	20.49	308
NH ₄ NO ₃	10-40	62	30.54	853
KI	5-30	69	29.35	254
SrCl ₂ •6H ₂ O	5-30	71	31.58	241
NaNO ₃	10-40	74	26.94	302
NaCl	10-40	75	69.2	25
NH ₄ Cl	10-40	79	35.67	235
KBr	5-25	81	40.98	203
(NH ₄) ₂ SO ₄	10-40	81	62.06	79
KCl	5-25	84	49.38	159
Sr(NO ₃) ₂ •4H ₂ O	5-25	85	28.34	328
BaCl ₂ •2H ₂ O	5-25	90	69.99	75
CsI	5-25	91	70.77	75
KNO ₃	0-50	92	43.22	225

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electro Microscope : SEM) รุ่น 1455VP
2. Thermalgravimetric Analyzer (TGA) รุ่น ELR 23329 C
3. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
4. เทอร์โมมิเตอร์
6. เครื่องวัดความชื้น Henna HI 8564
7. เครื่องปั๊มอากาศ
8. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง
9. ถังควบคุมความชื้น
10. ตู้อบสารเคมี
11. คอมพิวเตอร์

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS: $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) Fluka Chemie Switzerland
2. กรดเกลือ (HCl)
3. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)
4. เอทานอล (EtOH)
5. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
6. โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)
7. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)
8. สังกะสีคลอไรด์ (ZnCl_2)
9. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2)
10. แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)
11. แมกนีเซียมเปอร์คลอเรต ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$)
12. ซีโอไลต์ (JRC-Z-HY5.3)
13. ซิลิกาเจล (ทางการค้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์สารดูดความชื้นด้วยวิธีการโซลเจล

การเตรียมสารดูดความชื้นมีปัจจัยหลายอย่างที่สำคัญต่อการเกิดผลิตภัณฑ์และคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์ได้ ไม่ว่าจะเป็นอัตราส่วนระหว่าง TEOS/EtOH/H₂O/HCl อุณหภูมิในการไฮโดรไลซิส สภาพความเป็นกรดและด่างของสารละลาย ระยะเวลาในการบ่ม เป็นต้น การเตรียมสารดูดความชื้นในโครงการนี้ใช้สภาวะจากงานวิจัย [7] ดังนี้

1. เตรียมสารละลาย TEOS/EtOH/H₂O/HCl ด้วยอัตราส่วนโดยโมลรวมเท่ากับ 1:4.5:4:8×10⁻⁴ และนำสารละลายที่เตรียมได้ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไฮโดรไลซิส
2. เตรียมสารละลายของ EtOH และ NH₄OH ในอัตราส่วนโดยโมลเมื่อเทียบกับ TEOS ในข้อที่ 1 TEOS/EtOH/NH₄OH เท่ากับ 1:4.5:8×10⁻³ แล้วเติมสารละลาย EtOH และ NH₄OH ใน TEOS ที่ไฮโดรไลซิสแล้ว ในข้อ 1
3. กวนสารละลายจนกระทั่งเกิดเจลประมาณ 1 นาที และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน
4. นำสารที่สังเคราะห์ได้ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนักจะได้น้ำหนักแห้งของ ซิลิกาเจล (SiO₂)
5. ทำซ้ำในข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนเวลาบ่มเป็น 30 วัน เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ศึกษา [7]

3.3.2 การปรับปรุงประสิทธิภาพในการดูดความชื้น

3.3.2.1 การเลือกสารอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี

1. นำสารอนินทรีย์ ได้แก่ NaCl, KCl, CaCl₂, ZnCl₂, MgCl₂, MgSO₄ และ Mg(ClO₄)₂ มาอย่างละ 1.5 กรัม อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ชั่งน้ำหนักสารที่อบแล้ว บันทึกผล ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง บันทึกผลทุกๆ 2 ชั่วโมง จนมีน้ำหนักค่อนข้างคงที่ (ประมาณ 3 วัน)
3. เปรียบเทียบน้ำหนักของความชื้นที่สารอนินทรีย์แต่ละชนิดสามารถดูดซับได้
4. เลือกสารอนินทรีย์ที่มีความสามารถดูดความชื้นได้สูงที่สุด เพื่อสังเคราะห์สารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์

3.3.2.2 การสังเคราะห์สารดูดความชื้นที่เติมสารอนินทรีย์

1. จากหัวข้อ 3.3.2.1 เลือกสารอนินทรีย์มาเติมในการสังเคราะห์สารดูดความชื้นอัตราส่วนในการเติมสารอนินทรีย์ คือ 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง (งานวิจัย [7] เสนอว่าอัตราส่วนในการเติมสารอนินทรีย์ที่เหมาะสม คือ ประมาณ 30% โดยน้ำหนักแห้ง)
2. คำนวณน้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่จะนำมาเติมจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{ น้ำหนักแห้งของสารอนินทรีย์} \\ = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของสารอนินทรีย์}}{\text{น้ำหนักแห้งของ SiO}_2 + \text{น้ำหนักแห้งของสารอนินทรีย์}}$$

3. เตรียมสารละลาย TEOS/EtOH/H₂O/HCl ด้วยอัตราส่วนโดยโมลรวมเท่ากับ 1:4.5:4:8×10⁻⁴ และนำสารละลายที่เตรียมได้ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไฮโดรไลซิส

4. เตรียมสารละลายของ EtOH และ NH₄OH ในอัตราส่วนโดยโมลเมื่อเทียบกับ TEOS ในข้อที่ 3 TEOS/EtOH/NH₄OH เท่ากับ 1:4.5:8×10⁻³ ผสมสารอนินทรีย์ที่คำนวณน้ำหนัก 20% โดยน้ำหนักแห้ง ลงในสารละลาย EtOH และ NH₄OH แล้วเติมใน TEOS ที่ไฮโดรไลซิสแล้ว ในข้อ 3

5. กวนสารละลายรวมจนกระทั่งเกิดเจล และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน

6. ทำซ้ำข้อ 2-5 โดยเปลี่ยนปริมาณของสารอนินทรีย์เป็น 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง

7. ทำซ้ำในข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนเวลาปั่นเป็น 30 วัน

3.3.2.3 การสังเคราะห์สารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์

1. เตรียมสารละลาย TEOS/EtOH/H₂O/HCl ด้วยอัตราส่วนโดยโมลรวมเท่ากับ 1:4.5:4:8×10⁻⁴ และนำสารละลายที่เตรียมได้ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไฮโดรไลซิส

2. เตรียมสารละลาย EtOH และ NH₄OH ในอัตราส่วนโดยโมลเมื่อเทียบกับ TEOS ในข้อที่ 1 TEOS/EtOH/NH₄OH เท่ากับ 1:4.5:8×10⁻³ ผสมซีโอไลต์ ที่คำนวณน้ำหนัก 10% โดยน้ำหนักแห้งลงในสารละลาย EtOH และ NH₄OH ที่เติมสารอนินทรีย์จากหัวข้อ 3.3.2.1 ในปริมาณที่พบว่าสามารถดูดซับความชื้นได้มาจากหัวข้อ 3.3.2.2 แล้วเติมใน TEOS ที่ไฮโดรไลซิสแล้วในข้อ 1

3. คำนวณน้ำหนักของซีโอไลต์ที่จะนำมาเติม

$$\% \text{ น้ำหนักแห้งของซีโอไลต์} \\ = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของซีโอไลต์}}{\text{น้ำหนักแห้งของ SiO}_2 + \text{น้ำหนักของสารอนินทรีย์} + \text{น้ำหนักซีโอไลต์}}$$

4. กวนสารละลายรวมจนกระทั่งเกิดเจล และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน

5. ทำซ้ำข้อ 2-4 โดยเปลี่ยนปริมาณซีโอไลต์เป็น 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การนำไปดูค่าความชื้น

1. จัดอุปกรณ์ในการดูค่าความชื้นซึ่งประกอบด้วย กล้องควบคุมความชื้น บีมอากาศ เครื่องวัดความชื้น ขวดบรรจุน้ำ ขวดบรรจุสารละลายเกลือเพื่อควบคุมความชื้น และเครื่องชั่ง ทศนิยม 3 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.1
2. ควบคุมความชื้นภายในกล่องให้ได้ความชื้นที่ต้องการ (40, 60, 85 และ 100% RH) โดยเลือกใช้สารละลายเกลือที่ทราบค่าความชื้นของสารละลายเกลืออิมิตัวจากตารางที่ 2.3
3. เป่าอากาศเข้าสู่ระบบผ่านขวดที่มีสารละลายเกลืออิมิตัว ซึ่งจะควบคุมความชื้นที่เข้าสู่กล้องควบคุมความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักของสารดูค่าความชื้นที่เตรียมไว้ ก่อนที่นำไปบรรจุกล่องควบคุมความชื้น
5. บันทึกน้ำหนักของสารดูค่าความชื้นเมื่อเวลาต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Winwedge



รูป 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดูค่าความชื้น

3.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

1. วิเคราะห์พื้นผิวภายนอกของสารดูค่าความชื้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาจะต้องอยู่ในสภาพที่ปราศจากน้ำหรือความชื้นและมีสภาพผิวที่นำไฟฟ้า โดยนำตัวอย่างมาเคลือบผิวด้วยทองโดยใช้เครื่อง Mini Sputter Coater เพื่อรักษาการทำงานของวงจรไฟฟ้าระหว่างลำอิเล็กตรอนกับชิ้นตัวอย่างให้สมบูรณ์ หลังจากการเคลือบทองนำตัวอย่างวางใน Chamber และเป่าอากาศออกเพื่อให้ระบบเป็นสุญญากาศ ความดันจะอยู่ที่ประมาณ 10^{-5} มิลลิบาร์ จากนั้นปล่อยกระแสไฟฟ้า 7,000 โวลต์ ไปที่ฟิลาเมนต์ให้อิเล็กตรอนวิ่งมาที่ตัวอย่าง

2. วิเคราะห์หาอุณหภูมิที่ โมเลกุลของน้ำทั้งหมดถูกกำจัดออกโดยสารดูค่าความชื้น

ทั้งหมดด้วยเครื่อง Thermalgravimetric Analyzer

ตั้งตัวอย่าง 10-20 มิลลิกรัมทิ้งไว้ในบรรยากาศให้ดูดซับความชื้นเป็นเวลา 2 วัน แล้ว
จึงนำไปวางใน Chamber ให้ความร้อนจาก 30–1,000 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิ
20 องศาเซลเซียสต่อนาที



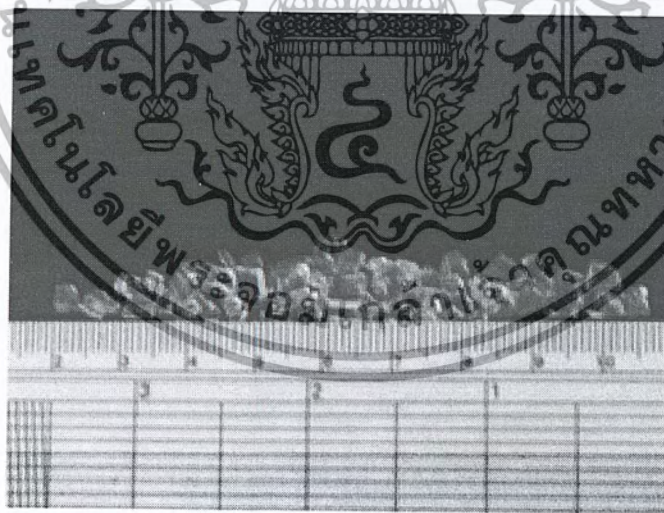
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การสังเคราะห์สารดูดความชื้นด้วยวิธีการโซลเจล

จากการทดลองไฮโดรไลซิส TEOS/H₂O/EtOH/HCl ที่มีอัตราส่วนโดยโมล 1:4:4.5:8x10⁻⁴ ด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อของเหลวที่ได้มีค่า pH 4.5 เติมสารละลาย EtOH และ NH₄OH อัตราส่วนโดยโมล 4.5:8x10⁻³ ต่อ TEOS 1 โมล ของเหลวจะข้นขึ้น เนื่องจากสารละลายเปลี่ยนเป็นคอลลอยด์ ค่า pH จะเปลี่ยนเป็น 6 และเกิดการควบแน่นเป็นเจลเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที จากนั้นเก็บสารที่เตรียมได้ไว้ในระบบปิดที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 7 วัน แล้วนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สารที่เตรียมได้ดังรูป 4.1 มีลักษณะเป็นผลึกขุ่น แข็ง เปราะ และมีน้ำหนักลดลงเหลือเพียง 11.75% ของน้ำหนักเจลเริ่มต้น ความสามารถในการดูดความชื้นแสดงดัง ตาราง ก.4

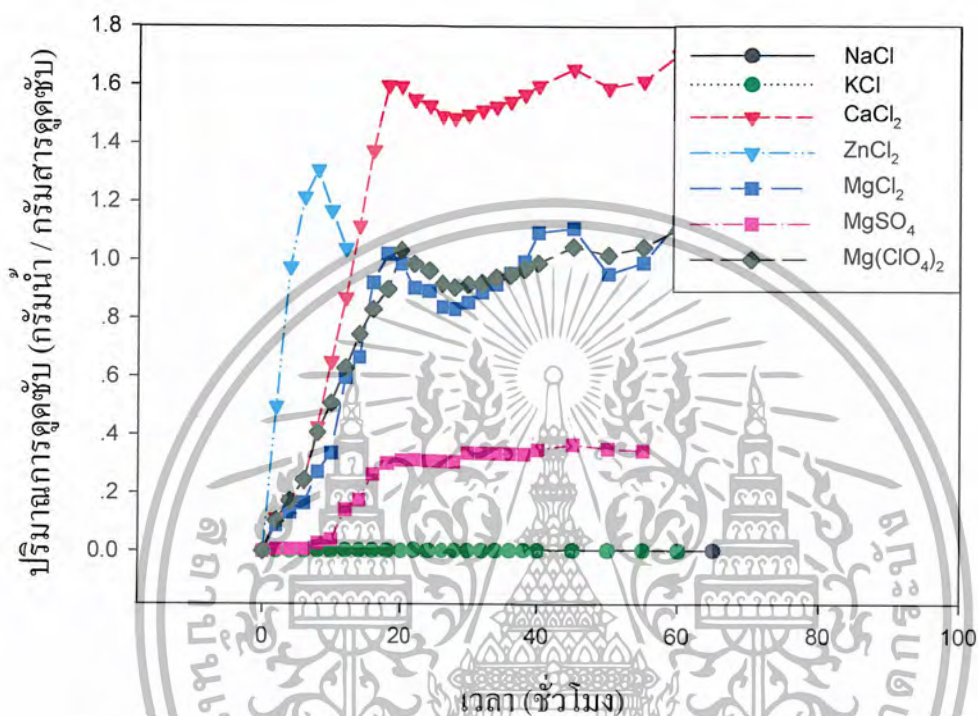


รูปที่ 4.1 ลักษณะผลึกของ SiO₂ หลังการอบแห้ง

4.2 การปรับปรุงประสิทธิภาพในการดูดความชื้น

4.2.1 การเลือกสารอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี

จากรูปที่ 4.2 พบว่าแคลเซียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นสูงที่สุด (ในลักษณะของปริมาณการดูดซับ คือ กรัม/น้ำ/กรัมสารดูดซับ)



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของสารอนินทรีย์ต่างๆ

4.2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของสารดูดความชื้นด้วยแคลเซียมคลอไรด์

จากรูปที่ 4.2 แคลเซียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นสูงที่สุดจึงใช้แคลเซียมคลอไรด์ 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง เติมลงใน TEOS/H₂O/EtOH/HCl ที่มีอัตราส่วนโดยโมล 1:4:4.5:8x10⁻⁴ แล้วนำไปไฮโดรไลซิส ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อสารละลายที่ได้มี pH เท่ากับ 4.5 เติมสารละลาย EtOH และ NH₄OH อัตราส่วนโดยโมล 4.5:8x10⁻³ ต่อ TEOS 1 โมล และแคลเซียมคลอไรด์ 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง ค่า pH จะเปลี่ยนเป็น 6 และเกิดเจล ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งระยะเวลาในการเกิดเจลขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ ถ้าปริมาณแคลเซียมคลอไรด์มาก ระยะเวลาในการเกิดเจลจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังตารางที่ 4.2 จากนั้นเก็บสารที่เตรียมได้ไว้ในระบบปิดที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 7 วัน แล้วนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สารที่

เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.3 มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวทึบ แข็ง ประา และมึ่น้ำหนักคงดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารของโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มีอยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อบังคับด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่า pH ของสารละลายในขั้นตอนต่างๆ ระหว่างเตรียม SiO₂-CaCl₂

CaCl ₂ ที่เติมใน SiO ₂ (%โดยน้ำหนัก)	pH		
	ก่อนไฮโดรไลซิส	หลังไฮโดรไลซิส	หลังเติมสารละลาย NH ₄ OH
0	4	4.5	6
20	4	4.5	6
30	4	4.5	6
40	4	4.5	6

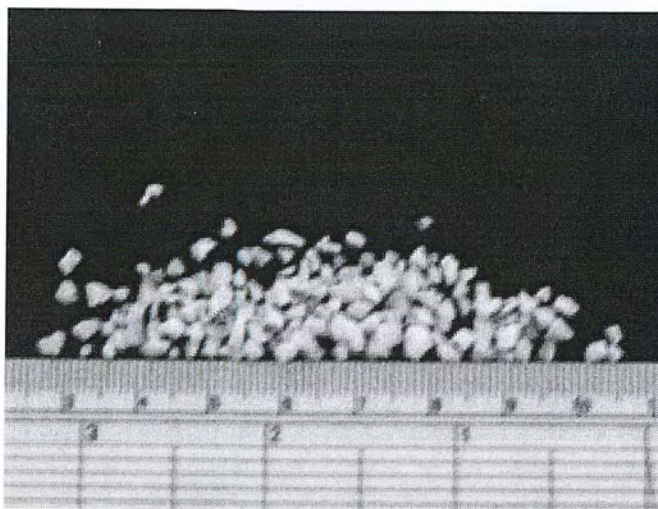
ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาการเกิดเจลของ SiO₂-CaCl₂

CaCl ₂ ที่เติมใน SiO ₂ (%โดยน้ำหนัก)	ระยะเวลาในการเกิดเจล (นาที)
0	1
20	2.5
30	3
40	3.5

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักของ SiO₂-CaCl₂ ที่เตรียมได้

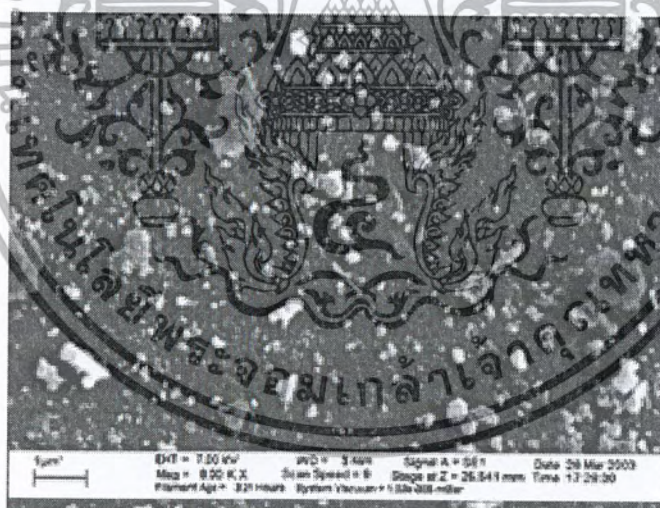
CaCl ₂ ที่เติมใน SiO ₂ (%โดยน้ำหนัก)	น้ำหนัก (กรัม)			%น้ำหนักที่เหลืออยู่*
	เจลเริ่มต้น	เจล 1 สัปดาห์	เจลหลังอบแห้ง	
0	30.80	20.80	3.62	11.75
20	41.23	20.91	4.15	10.07
30	40.79	18.71	5.49	13.46
40	42.47	16.83	6.07	14.29

$$\text{หมายเหตุ} \quad \% \text{น้ำหนักที่เหลืออยู่} = \frac{\text{น้ำหนักหลังอบแห้ง (กรัม)} \times 100\%}{\text{น้ำหนักเจลเริ่มต้น (กรัม)}}$$



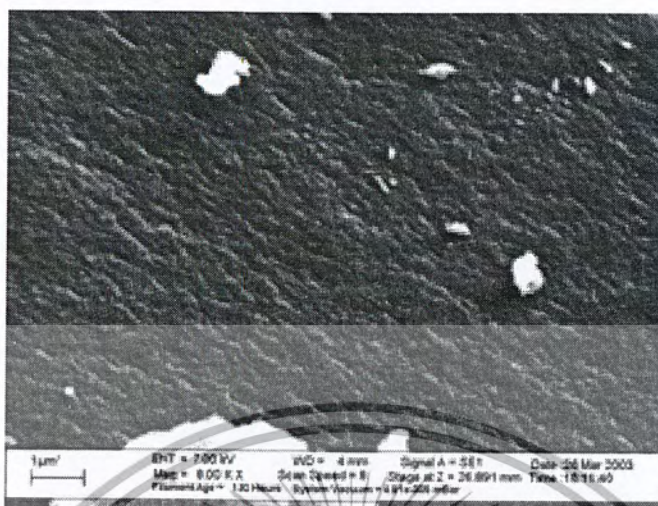
รูปที่ 4.3 ลักษณะผลิตภัณฑ์ของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง หลังการอบแห้ง

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์ได้ จากภาพถ่ายพื้นผิวภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่อัตราขยาย 8,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.4-4.8

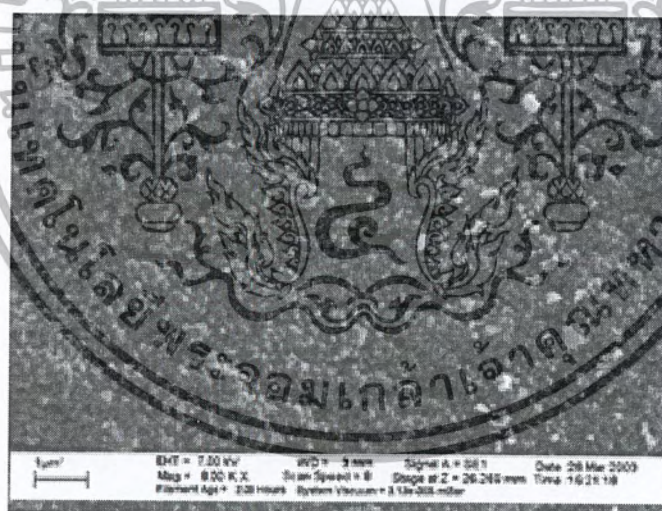


รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 ที่ใช้ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

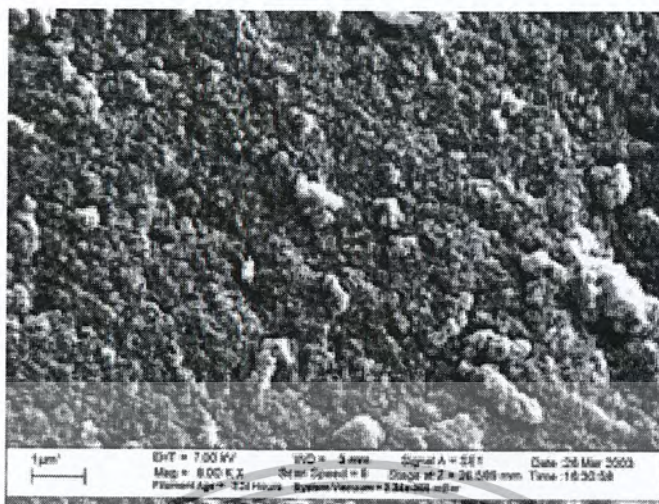


รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 ที่สังเคราะห์



รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (20-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักรักษา

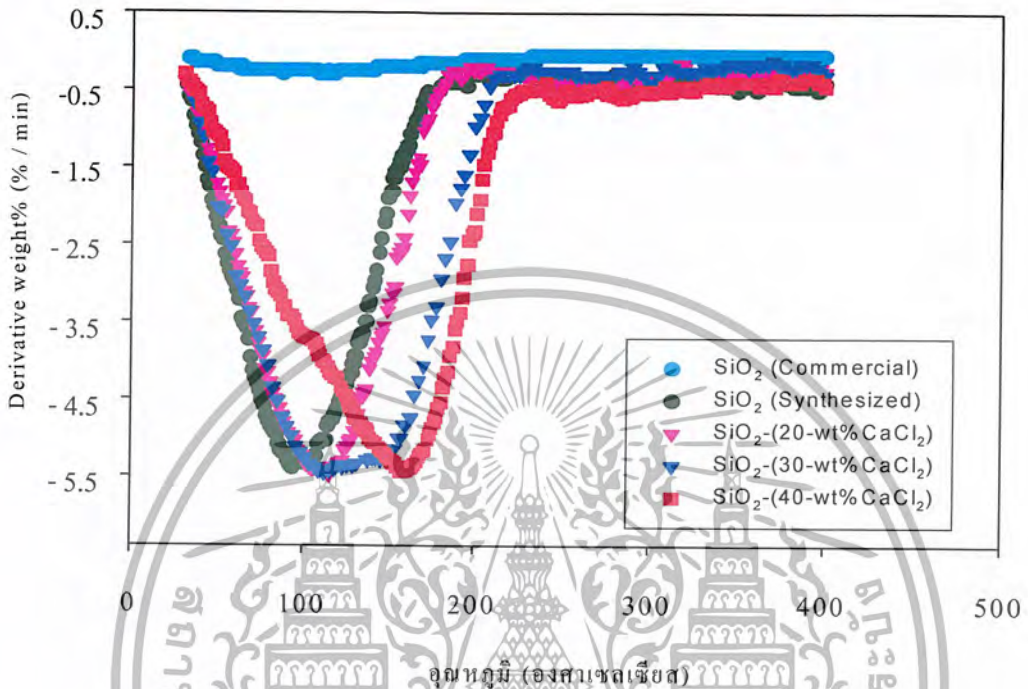


รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (40-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักรักษา

จากรูปที่ 4.4-4.8 ภาพถ่าย SEM ของซิติกาเจลจะมีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ 20% และ 30 % โดยน้ำหนักรักษา ผิวจะขรุขระขึ้น แต่เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ 40 % โดยน้ำหนักรักษา พื้นผิวจะเรียบมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอัตราการคายซึบของน้ำ นำสารดูดความชื้นมาวิเคราะห์หาอัตราการคายซึบสูงสุดเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบไล่ความชื้นของสารดูดความชื้น โดยใช้ Thermalgravimetric Analyzer ได้ผลดังรูปที่ 4.9

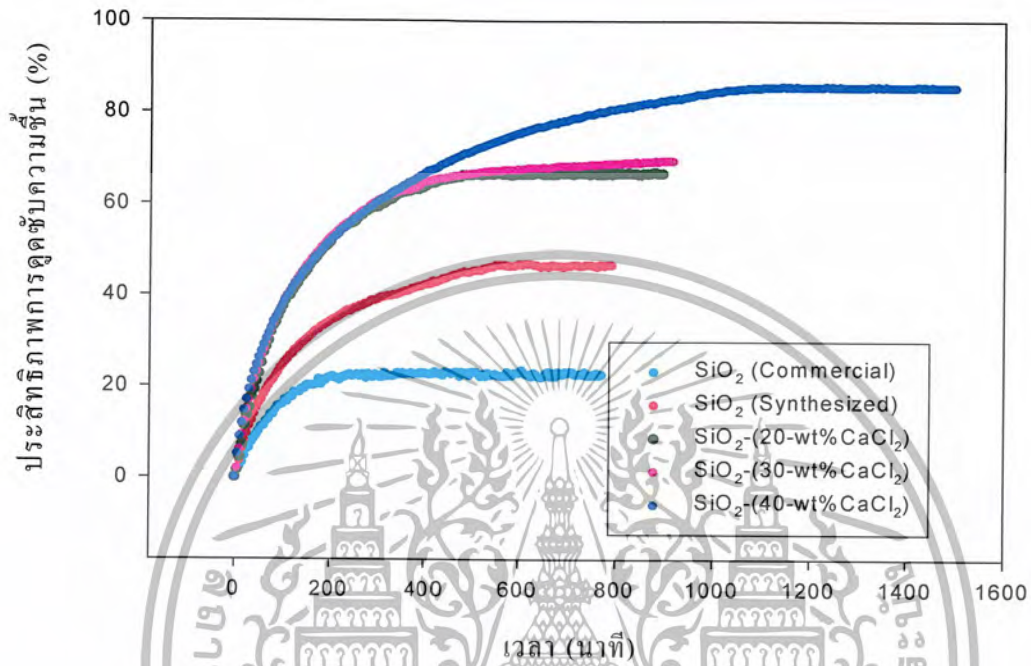


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบอัตราการคายซึบของ SiO_2 และ $\text{SiO}_2\text{-CaCl}_2$ โดยน้ำหนักแห้ง

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าซิลิกาเจลที่ขายในท้องตลาดจะมีอัตราการคายซึบต่ำกว่าซิลิกาเจลที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการ โซลเจลมาก และอัตราการคายซึบของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วนแคลเซียมคลอไรด์ที่แตกต่างกันจะมีอัตราการคายซึบเกือบเท่ากัน การคายซึบน้ำออกจากสารดูดความชื้นสูงสุดจะต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้น คือ ซิลิกาเจลที่ไม่เติมแคลเซียมคลอไรด์ จะต้องใช้อุณหภูมิ 89.15 องศาเซลเซียส ซิลิกาเจลที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง จะต้องใช้อุณหภูมิ 104.88, 108.56 และ 154.23 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซึบความชื้น นำซิลิกาเจลทางการค้า ซิลิกาเจลที่สังเคราะห์ และซิลิกาเจลที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 20% , 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง วางไว้ในภาชนะควบคุมความชื้นคงที่ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% น้ำหนักปริมาณความชื้นที่ดูดซึบจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่ ดังตาราง ก.3 ถึง ก.7

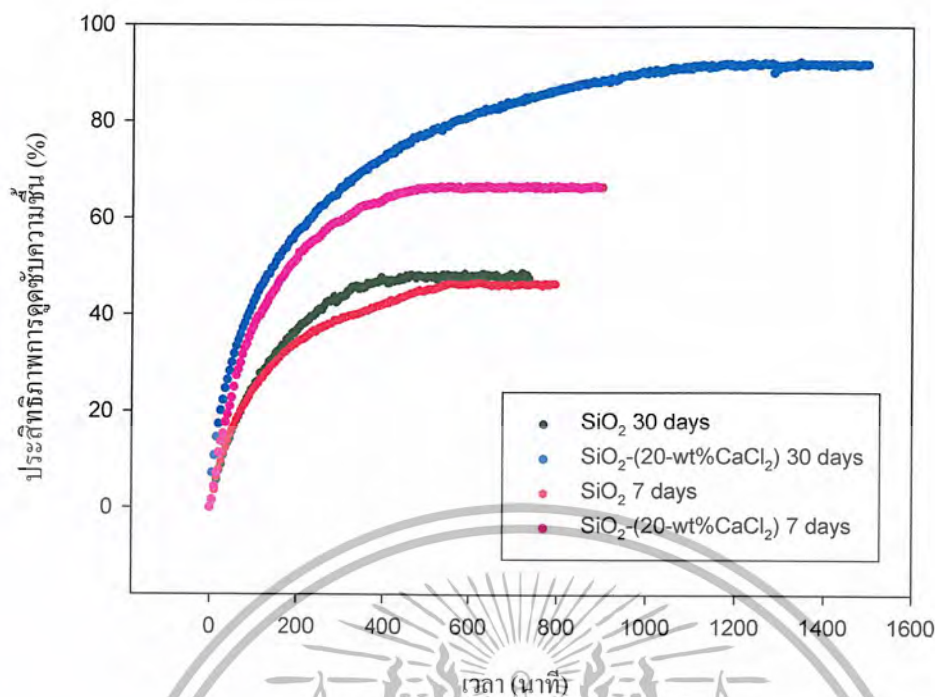
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจลทางการค้า ซิลิกาเจลที่สังเคราะห์ และซิลิกาเจลที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 20% , 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% ซึ่งสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดใช้เวลาบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของ SiO₂ และ SiO₂-CaCl₂ โดยน้ำหนักแห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากรูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการดูดความชื้นของซิลิกาเจลที่สังเคราะห์ได้จะสูงกว่าซิลิกาเจลที่ใช้ในท้องตลาด และเมื่อปริมาณของแคลเซียมคลอไรด์ในซิลิกาเจลเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดความชื้นจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 40% โดยน้ำหนักแห้ง จะมีประสิทธิภาพการดูดความชื้นได้มากที่สุด เท่ากับ 85.52% ที่เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล และซิลิกาเจลที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 20% โดยน้ำหนักแห้ง ที่ใช้เวลาบ่ม 7 และ 30 วัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%



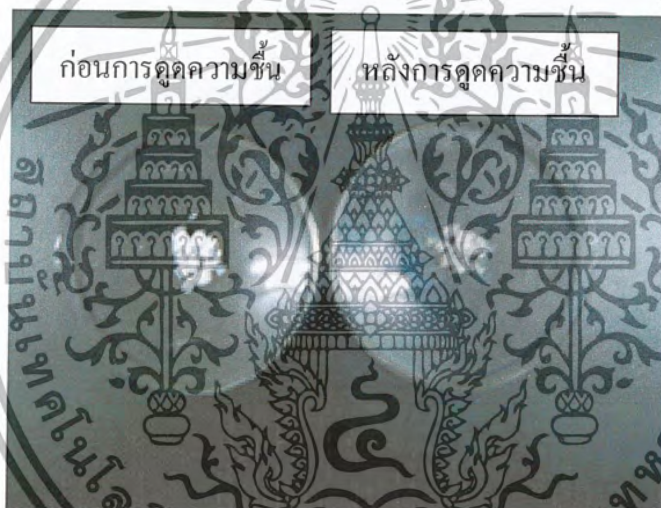
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของ SiO₂ และ SiO₂-(20-wt%CaCl₂) โดยน้ำหนักแห้ง ที่ใช้เวลาดำบ 7 และ 30 วัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากรูปที่ 4.11 พบว่าสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์และใช้เวลาดำบ 30 วัน มีประสิทธิภาพการดูดความชื้น ได้ดีกว่าสารดูดความชื้นที่ใช้เวลาดำบ 7 วัน และเมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ จะมีประสิทธิภาพการดูดความชื้นได้ดีขึ้น สารดูดความชื้นที่ไม่เติมแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้เวลาดำบ 7 วัน และ 30 วัน มีประสิทธิภาพการดูดความชื้น 46.60% (ตาราง ก.4) และ 48.91% (ตาราง ก.15) ตามลำดับ สารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 20% โดยน้ำหนักแห้ง ที่ใช้เวลาดำบ 7 วัน และ 30 วัน มีประสิทธิภาพการดูดความชื้น เท่ากับ 66.67% (ตาราง ก.5) และ 92.23% (ตาราง ก.16) ตามลำดับ

สารดูดความชื้นที่ไม่เติมแคลเซียมคลอไรด์ก่อนการดูดซับความชื้นจะมีสีขาวขุ่น หลังการดูดซับความชื้นจนอิ่มตัวจะมีสีเข้มเค็ม ดังรูปที่ 4.12 ในขณะที่สารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ก่อนการดูดความชื้นจะมีผลึกสีขาวทึบ เมื่อดูดซับความชื้นแล้วจะมีสีขาวขุ่น (แคลเซียมคลอไรด์ที่แห้งจะมีสีขาวทึบแต่เมื่อดูดซับความชื้นจะเปลี่ยนสีเป็นสีขาวขุ่น) ดังรูปที่ 4.13 พบว่าสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง หลังการดูดซับความชื้นจนถึงจุดอิ่มตัวจะมีน้ำเกาะบริเวณรอบๆ ผิวภายนอกบางๆ แต่เจลที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 40% โดยน้ำหนักแห้งจะมีน้ำเกาะที่ผิวและเยิ้มบนภาชนะที่บรรจุเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 4.12 ลักษณะของ SiO_2 ที่สังเคราะห์ ก่อนและหลังดูดซับความชื้น



รูปที่ 4.13 ลักษณะของ SiO_2 -(30-wt% CaCl_2) โดยน้ำหนักแห้ง ก่อนและหลังดูดซับความชื้น

4.2.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์

จากการทดลองพบว่าสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ปริมาณสูงกว่าจะสามารถดูดความชื้นได้มากกว่า แต่สารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 40 % โดยน้ำหนักแห้ง จะเกิดการเยิ้มและเสียรูปตั้งได้กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงเลือกสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30 % โดยน้ำหนักแห้ง มาปรับปรุงคุณสมบัติการดูดความชื้นด้วยการเติมซีโอไลต์ (โดยไฮโดรไลซิส $\text{TEOS}/\text{H}_2\text{O}/\text{EtOH}/\text{HCl}$ ที่มีอัตราส่วนโดยโมล 1:4 :4.5:8x10⁻¹ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของเหลวที่ได้มี pH เท่ากับ 4.5 แล้วจึงเติมสารละลาย EtOH และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

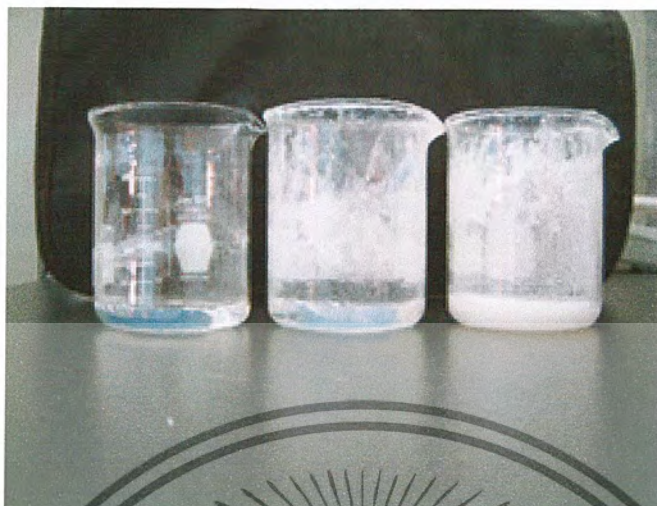
NH_4OH ด้วยอัตราส่วนโดยโมล $4.5:8 \times 10^{-3}$ ต่อ TEOS 1 โมล แคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง และซีโอไลต์ 10%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง พบว่าซีโอไลต์ไม่ละลายในสารละลายที่เตรียมได้และใช้เวลาในการเกิดเจลมากกว่า 30 นาที และเจลที่เกิดขึ้นแยกชั้นกับซีโอไลต์ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณสารละลาย NH_4OH เพื่อเร่งเวลาเกิดเจลในขณะที่ปั่นกวนให้ซีโอไลต์กระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อเจล ปริมาณสารละลาย NH_4OH ที่เติมแสดงในตารางที่ 4.4 ค่า pH จะเปลี่ยนเป็น 6.5 (ตาราง ที่ 4.5) และเกิดเจلدังรูปที่ 4.14 จากนั้นใช้เวลาบ่ม 7 วัน แล้วนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบด้วยอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สารดูดความชื้นที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวทึบ แข็ง เปราะ ผิวหยาบ และมีน้ำหนักลดลงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสารละลาย NH_4OH 8×10^{-3} mol/l ที่เติมใน SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)- Zeolite

Zeolite ที่เติมใน SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) (%โดยน้ำหนัก)	ปริมาณสารละลาย NH_4OH (มิลลิลิตร)
10	1.5
20	2.5
30	3.5
40	4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า pH ของสารละลายในขั้นตอนต่างๆ ระหว่างเตรียม SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-Zeolite

Zeolite ที่เติมใน SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) (%โดยน้ำหนัก)	pH		
	ก่อนไฮโดรไลซิส	หลังไฮโดรไลซิส	หลังเติมสารละลาย NH_4OH
10	4	4.5	6.5
20	4	4.5	6.5
30	4	4.5	6.5
40	4	4.5	6.5



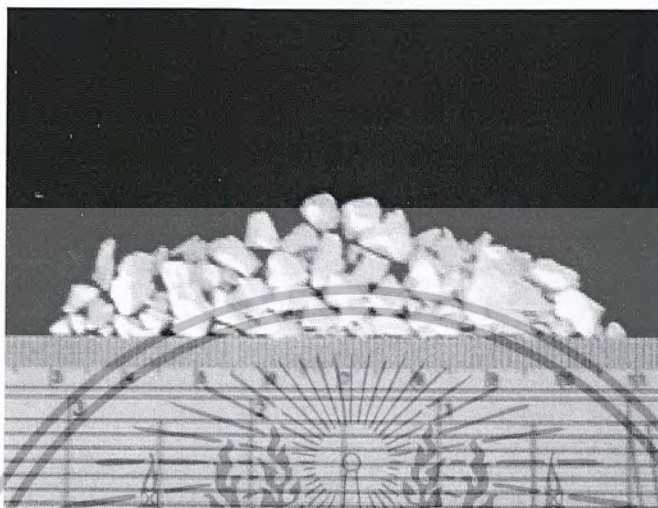
รูปที่ 4.14 ลักษณะเจลที่เกิดจากการควบแน่นของ SiO_2 , $\text{SiO}_2 - (30\text{-wt}\% \text{CaCl}_2)$ โดยน้ำหนักแห้ง และ $\text{SiO}_2 - (30\text{-wt}\% \text{CaCl}_2) - (40\text{-wt}\% \text{Zeolite})$ โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักของ $\text{SiO}_2 - (30\text{-wt}\% \text{CaCl}_2) - \text{Zeolite}$ ที่เตรียมได้

Zeolite ที่เติมใน $\text{SiO}_2 - (30\text{-wt}\% \text{CaCl}_2)$ (%โดยน้ำหนัก)	น้ำหนัก (กรัม)			%น้ำหนักที่เหลืออยู่*
	เจลเริ่มต้น	เจล 1 สัปดาห์	เจลหลังอบแห้ง	
10	21.12	17.73	3.25	15.39
20	21.91	14.43	4.16	18.98
30	21.86	18.43	4.80	21.19
40	18.02	17.62	6.47	35.90

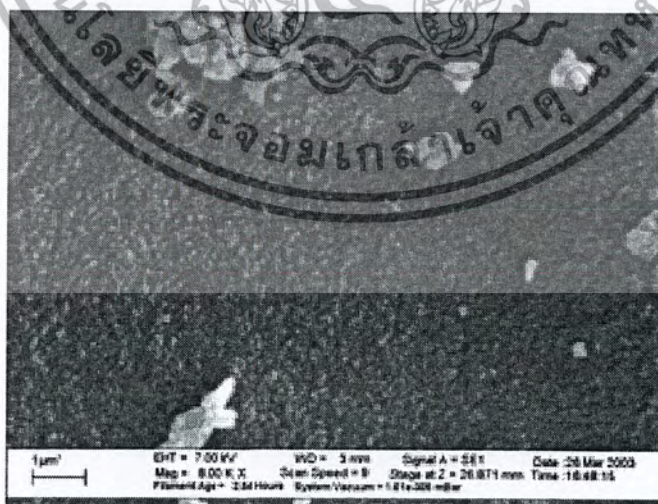
$$\text{หมายเหตุ}^* \% \text{น้ำหนักที่เหลืออยู่} = \frac{\text{น้ำหนักหลังอบแห้ง (กรัม)} \times 100\%}{\text{น้ำหนักเจลเริ่มต้น (กรัม)}}$$

รูปที่ 4.15 คือลักษณะผลึกของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง และเติมซีโอไลต์ 40% โดยน้ำหนักแห้ง ภายหลังจากการอบแห้ง ซึ่งสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเป็นผลึกสีขาวทึบ แข็ง และเปราะ



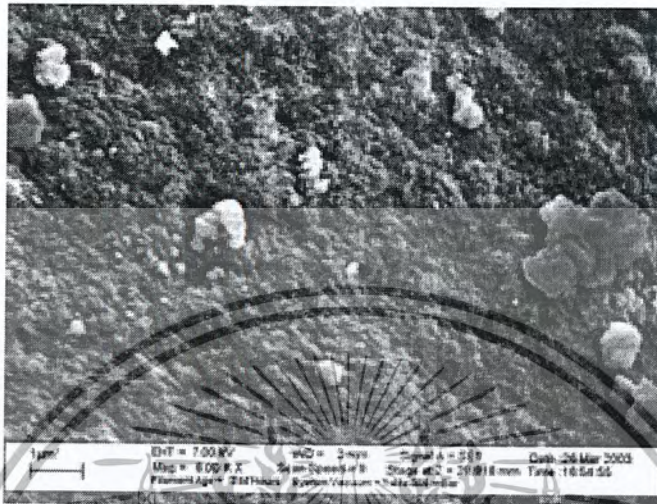
รูปที่ 4.15 ลักษณะผลึกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) หลังอบแห้ง

รูปที่ 4.16-4.19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์ ที่กำลังขยาย 8,000 เท่า

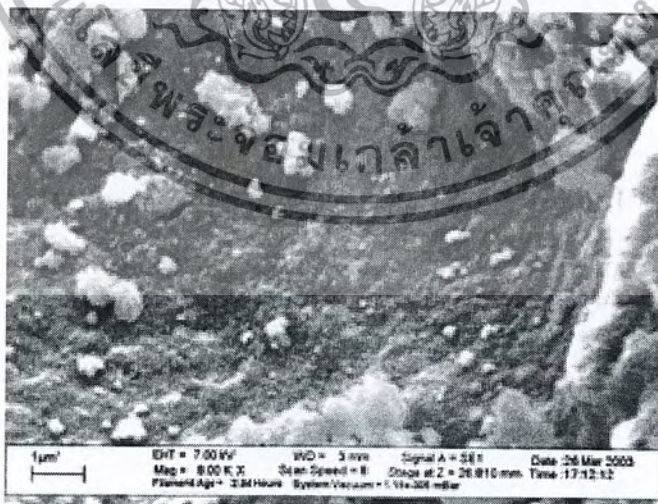


รูปที่ 4.16 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(10-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

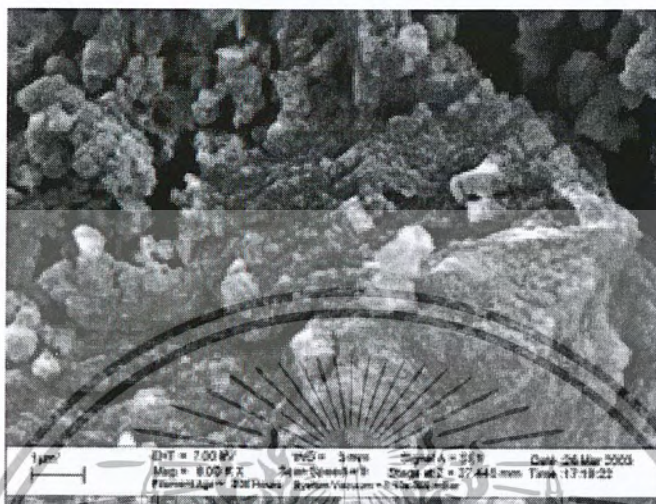


รูปที่ 4.17 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(20-wt% Zeolite) โดยน้ำนักแห้ง



รูปที่ 4.18 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 -(30-wt% CaCl_2)-(30-wt% Zeolite) โดยน้ำนักแห้ง

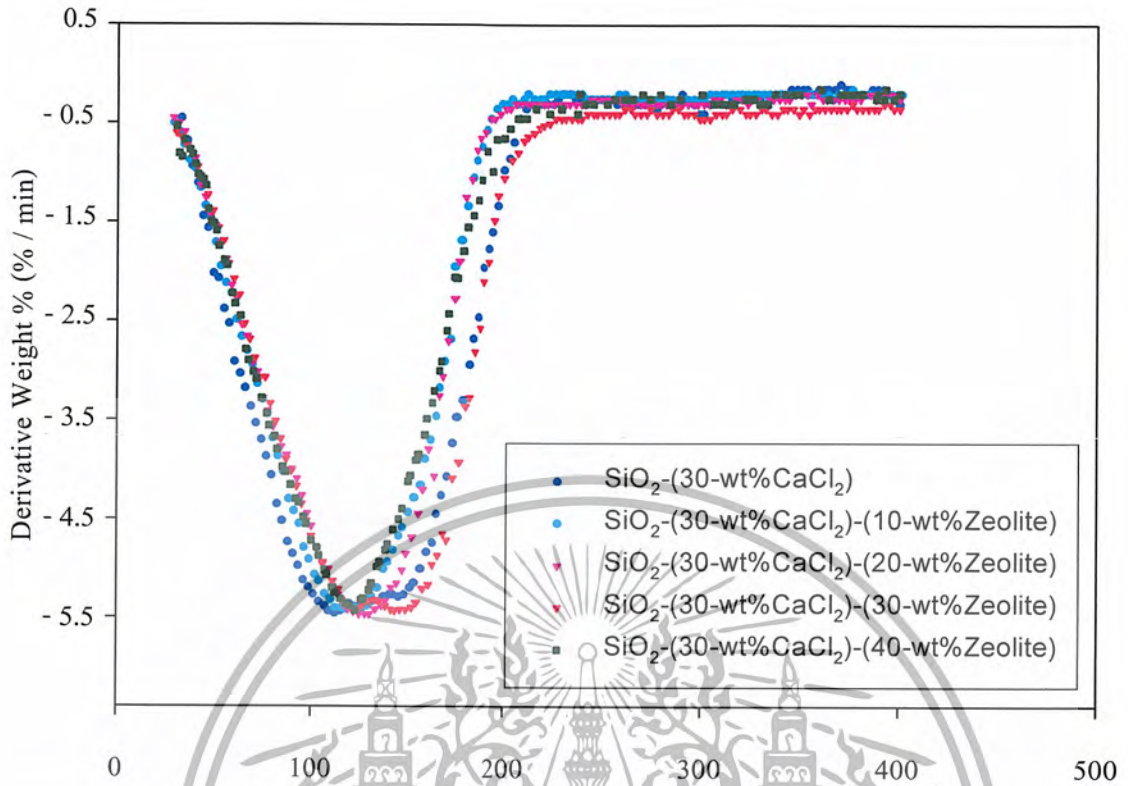
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยนำหนักแห้ง

จากรูปที่ 4.16-4.19 จะเห็นว่าสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์ จะมีรูพรุนมากขึ้นเมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มขึ้น

การศึกษาอัตราการคายชื้นของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์ที่มีปริมาณของซีโอไลต์ต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 4.20

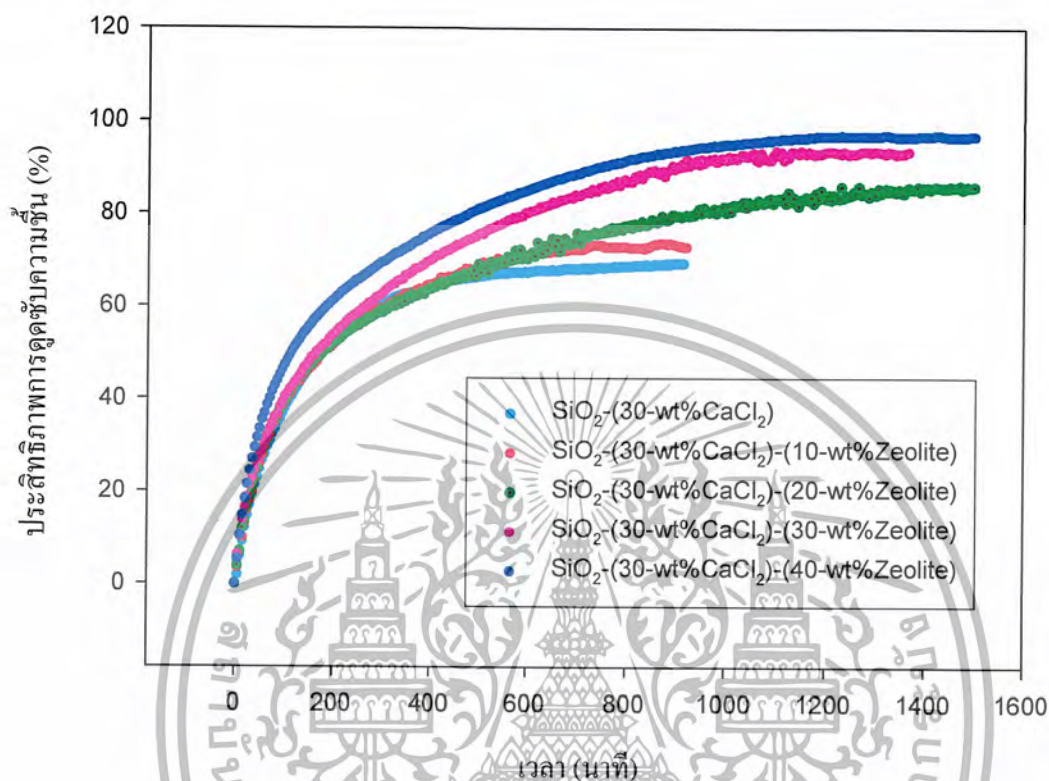


อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบอัตราการคายซึบของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์

จะเห็นว่าสารดูดความชื้นจะมีอัตราการคายซึบใกล้เคียงกัน สารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง มีการคายซึบน้ำสูงสุดที่อุณหภูมิ 108.56 องศาเซลเซียส การคายซึบน้ำสูงสุดของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้งและซีโอไลต์ 10%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนักแห้ง คือ 122.94, 126.32, 121.25 และ 141.52 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง และซีโอไลต์ปริมาณต่างๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง และซีโอไลต์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

จากรูปที่ 4.21 เมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ในสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นและใช้ระยะเวลาไปถึงจุดอิ่มตัวนานกว่าสารดูดความชื้นที่มีปริมาณซีโอไลต์น้อย สารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง แต่ไม่เติมซีโอไลต์มีประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นสูงสุด 69.37% ส่วนสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง และเติมซีโอไลต์ 40% โดยน้ำหนักแห้ง มีประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นสูงสุด 96.84% เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมาก ดังนั้นความชื้นสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนได้มาก รูพรุนของซีโอไลต์จะเป็นแหล่งดูดซับน้ำไม่ให้ไหลเยิ้มออกนอกผลึกสารดูดความชื้น ความสามารถในการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ และสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์แสดงในตาราง

ก.8 ถึง ก.11

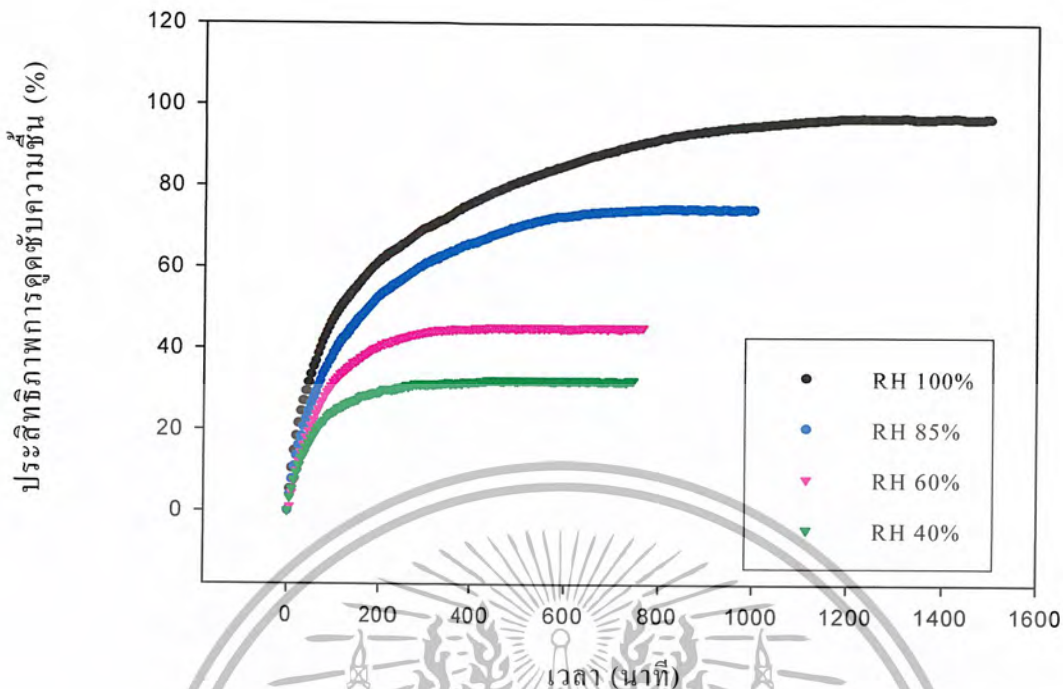
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์ ก่อนดูดความชื้นจะมีผลกึ่งสีขาวทึบ เมื่อดูดความชื้นจนถึงจุดอิ่มตัวผลึกยังคงมีสีจุ่นขาว เพราะซีโอไลต์ที่เติมมีสีขาวและไม่ละลายในน้ำ ดังนั้นเมื่อสัมผัสกับน้ำซีโอไลต์จึงยังคงสีขาวเช่นเดิมดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ลักษณะของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง ก่อนและหลังดูดซับความชื้น

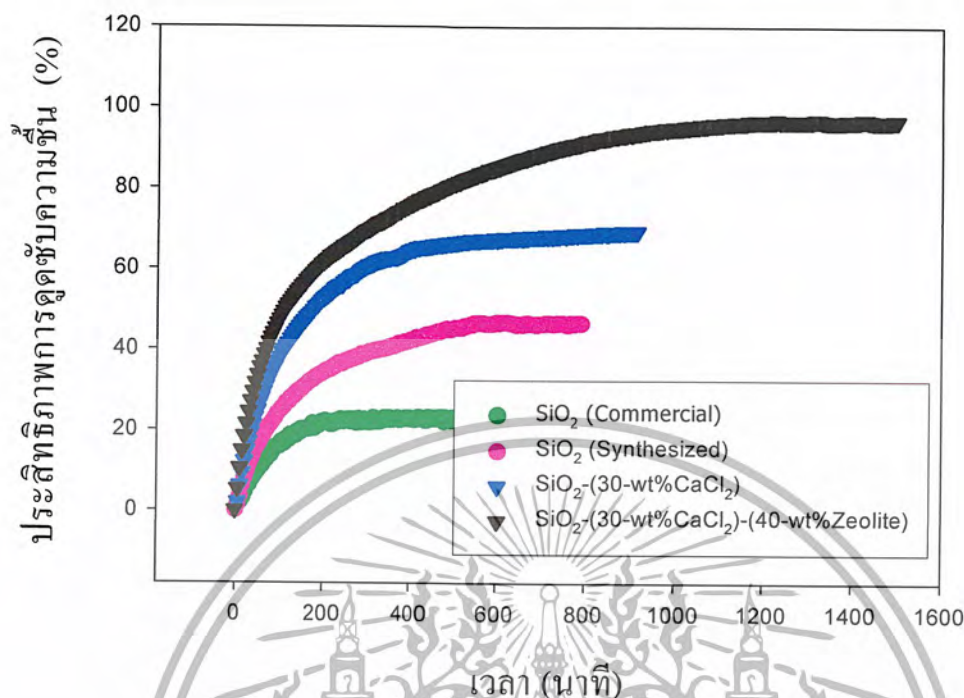
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง และเติมซีโอไลต์ 40% โดยน้ำหนักแห้ง ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 40% , 60% , 85% และ 100%



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้น ด้วย SiO₂- (30-wt% CaCl₂)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดความชื้นของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% และซีโอไลต์ 40% โดยน้ำหนักแห้ง ที่ใช้เวลาบ่ม 7 วัน จะเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40%, 60%, 85% และ 100% เท่ากับ 32.14%, 54.48%, 74.30% และ 96.84% ตามลำดับ แสดงดังตาราง ก.11 ถึง ก.14

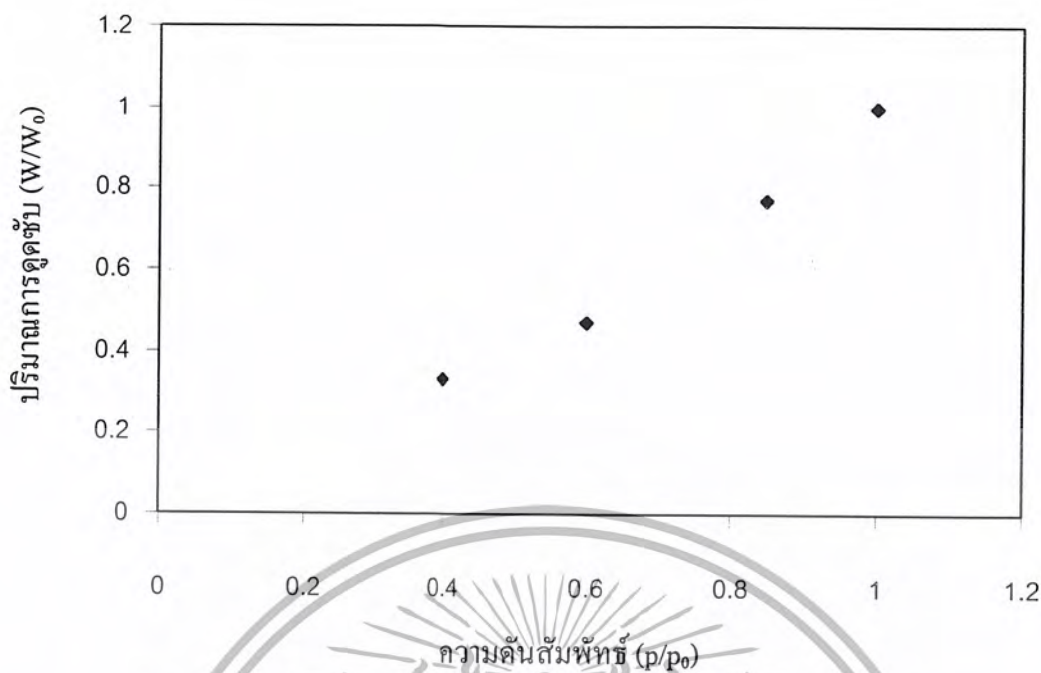
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นต่างๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของ SiO₂ ทางการค้า SiO₂ ที่สังเคราะห์ SiO₂-(30-wt% CaCl₂) โดยน้ำหนักแห้ง และ SiO₂-(30-wt% CaCl₂)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง

จากรูปที่ 4.24 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์ขึ้นสูงกว่าสารดูดความชื้นทางการค้า เมื่อเติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง และแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง กับซีโอไลต์ 40% โดยน้ำหนักแห้ง ประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น

Adsorption isotherm ของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% และซีโอไลต์ 40% โดยน้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.25

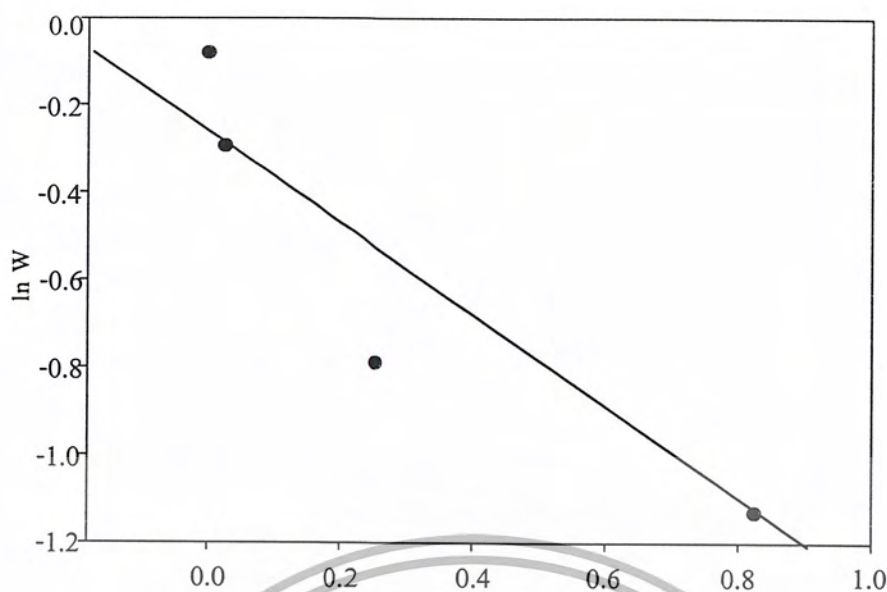


รูปที่ 4.25 Adsorption isotherm ของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง

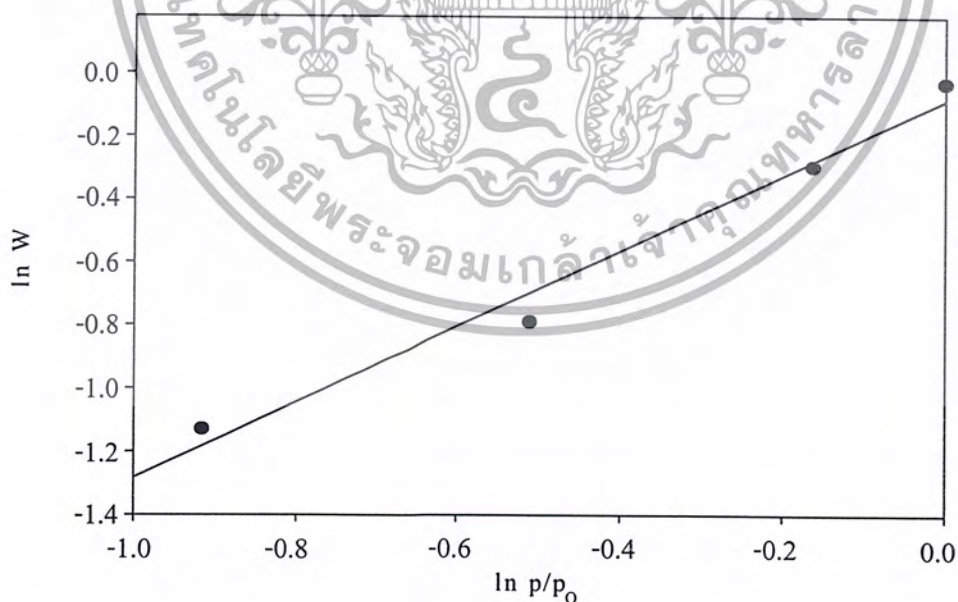
จากรูปที่ 4.25 เมื่อ p/p_0 เพิ่มขึ้น ความดันบริเวณพื้นผิวของสารดูดความชื้นจะมีค่ามากขึ้น ส่งผลในการเร่งอัตราการแพร่ของความชื้นที่ผิวภายนอกเข้าไปในรูพรุน ทำให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้น

ผลการทดลองจากรูปที่ 4.25 นำเข้าแบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ หาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ต่างๆ ด้วยสมการของ Dubinin-Astakhov (สมการที่ 2.12) สามารถหาค่า $n = 2$ และค่า $E_0 = 2.5$ ได้ และจากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] นำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดง ดังรูปที่ 4.26

จากรูปที่ 4.26 เส้นตรงเป็นค่าทางทฤษฎีที่ได้จากสมการ Dubinin-Astakhov และจุดในกราฟเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าทางทฤษฎีอยู่บ้าง ดังนั้นสมการ Dubinin-Astakhov จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการอธิบาย แสดงว่าการดูดซับน่าจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จึงใช้สมการ Langmuir ในการอธิบายค่าที่ได้จากการทดลอง ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 Logarithmic Dubinin-Astakhov equation ของการดูดซับความชื้นของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.27 Logarithmic Langmuir equation ของการดูดซับความชื้นของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt% Zeolite) โดยน้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วย สมการ Langmuir การดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งเส้นตรงเป็นค่าทางทฤษฎีที่ได้จากสมการ Langmuir และจุดในกราฟเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงมากกว่าเมื่อใช้สมการ Dubinin-Astakhov ดังนั้นค่าประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของสารดูดความชื้นนี้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ สามารถหาได้จากเส้นตรงในรูปที่ 4.27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

5.1.1 สามารถสังเคราะห์สารดูดความชื้นด้วย TEOS/H₂O/EtOH/HCl อัตราส่วนโดยโมล 1:4:4.5:8×10⁻⁴ ไฮโดรไลซิสสารละลายด้วยการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วเติมสารละลาย EtOH และ NH₄OH ด้วยอัตราส่วนโดยโมล TEOS/EtOH/NH₄OH เท่ากับ 1:4.5:8×10⁻³ สารละลายจะเปลี่ยนสภาพเป็นเจล สกักน้ำและเอทานอลออก ใช้เวลาบ่ม 7 วัน หรือ 30 วัน ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

5.1.2 สามารถสังเคราะห์สารดูดความชื้นด้วยวิธีการโซลเจลและเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้ด้วยการเติมสารอนินทรีย์และซีโอไลต์ สำหรับงานวิจัยนี้สารอนินทรีย์ที่เหมาะสม คือ แคลเซียมคลอไรด์ ปริมาณ 30% โดยน้ำหนักแห้ง ซีโอไลต์ คือ JRC-Z-HY5.3 ปริมาณ 40% โดยน้ำหนักแห้ง การเติมซีโอไลต์ปริมาณมากกว่า 40% โดยน้ำหนักแห้ง จะไม่สามารถสร้างผลึกของสารดูดความชื้นได้

ข้อดีของวิธีการโซลเจล คือ เตรียมสารได้ง่ายและใช้พลังงานในการสังเคราะห์ต่ำ

5.1.3 สารดูดความชื้นที่สังเคราะห์โดยใช้เวลาในการบ่ม 30 วัน มีประสิทธิภาพการดูดความชื้นสูงกว่าสารดูดความชื้นที่สังเคราะห์โดยใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน (เปรียบเทียบเพื่อดูแนวโน้มจาก 2 ตัวอย่าง คือ สารดูดความชื้นที่ไม่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์ และสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 20% โดยน้ำหนักแห้ง)

5.1.4 สารดูดความชื้นที่ไม่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์ ที่ใช้เวลาในการบ่ม 30 วัน มีประสิทธิภาพการดูดความชื้น เท่ากับ 48.91% สารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 20% โดยน้ำหนักแห้ง ที่ใช้เวลาในการบ่ม 30 วัน มีประสิทธิภาพการดูดความชื้น เท่ากับ 92.23% สารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์ 30% โดยน้ำหนักแห้ง และซีโอไลต์ 40% โดยน้ำหนักแห้ง ที่ใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน มีประสิทธิภาพการดูดความชื้น เท่ากับ 96.84% สารดูดความชื้นที่สังเคราะห์ สารดูดความชื้นที่สังเคราะห์โดย Julita Mrowiec-Biaton [7] มีประสิทธิภาพการดูดความชื้น 100%

5.1.5 สามารถใช้สมการ Langmuir อธิบาย Adsorption isotherm ของสารดูดความชื้นที่เติมแคลเซียมคลอไรด์และซีโอไลต์โดยน้ำหนักแห้งในงานวิจัยนี้ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การสังเคราะห์สารดูดความชื้นต้องควบคุมอุณหภูมิขณะไฮโดรไลซิสให้คงที่ 50 องศาเซลเซียส และปั่นกวนสารตลอดการสังเคราะห์

5.2.2 การสังเคราะห์สารดูดความชื้นโดยเติมซีโอไลต์ ต้องปั่นกวนจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนสภาพเป็นเจล เนื่องจากซีโอไลต์ไม่ละลายในสารละลาย และจะตกตะกอนอยู่ด้านล่าง จึงต้องปั่นกวนเพื่อให้ซีโอไลต์กระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อเจล ถ้าต้องการทดลองใช้ซีโอไลต์ที่มากกว่า 40% โดยน้ำหนักแห้ง ต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถปั่นกวนได้ที่รอบความเร็วสูง

5.2.3 หลังจากบ่มสารดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศครบ 7 วัน หรือ 30 วันแล้ว ต้องอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้สารดูดความชื้นที่ได้ปราศจากน้ำและแอลกอฮอล์ ไม่ควรอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส เพราะสารดูดความชื้นจะไหม้

5.2.4 การควบคุมความชื้นโดยใช้สารละลายเกลือต้องใช้สารละลายเกลืออิมตัว เพราะสารละลายเกลือที่อิมตัวจะทำให้เกิดค่าคงที่ของความชื้นสัมพัทธ์ขึ้น

5.2.5 ในการศึกษาต่ออาจเปลี่ยนอัตราส่วนของสารที่ใช้สังเคราะห์สารดูดความชื้น คือ $\text{TEOS}/\text{H}_2\text{O}/\text{EtOH}/\text{HCl}/\text{NH}_4\text{OH}$



รายการอ้างอิง

1. John D. Wright, **Sol-Gel Materials Chemistry and Applications**, Gordon and Breach Science Publishers, 2001.
2. ชฎาภา ธรรมานนท์, ปิณัญญา รัตนสัมฤทธิ์ และ พงษ์ศักดิ์ วัฒนจรูญโรจน์. 2544. การผลิตสารดูดความชื้นด้วย ซิล-เจล เทคโนโลยี. ระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
3. C. Jeffrey Brinker and George W. Schrer, **Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing**. California : Academic Press, 1990.
4. Hajime Tamon, Taketo Kitamura and Morio Okazaki, **Control of Mesoporous Structure of Silica Aerogel Prepared from TMOS**, Journal of Colloid and Interface Science 188, pp. 162-167, 1997.
5. Hajime Tamon, Taketo Kitamura and Morio Okazaki, **Preparation of Silica Aerogel from TEOS**, Journal of Colloid and Interface Science 197, pp. 353-359, 1998.
6. Julita Mrowiec-Biaton, **Water Vapor Adsorption on the Sol-Gel Composites Prepared Using Ethyl Silicate 40 as a Silica Precursor**, Langmuir, 17, pp. 626-630, 2001.
7. Julita Mrowiec-Biaton, **Effective Inorganic Hybrid Adsorbents of Water Vapor by the Sol-Gel Method**, Chem.Mater., 9, pp. 2486-2490, 1997.
8. Julita Mrowiec-Biaton, **SiO₂-LiBr Nanocomposite Sol-Gel Adsorbents of Water Vapor: Preparation and Properties**, Journal of Colloid and Interface Science, 218, pp. 500-503, 1999.
9. สุณี ลาวัณยากุล, ซีโอไลต์, วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 41, 131 (มค. 36) หน้า 28-30
10. Adam Chen, **Adsorption on Zeolite**, Chemical Engineering , 489-500, Dec. 14, 2001.
11. Frank L. Slejko, **Adsorption Technology: A Step-by-Step Approach to Process Evaluation and Applications**. New York: Marcel Dekker, 1985.
12. K.D. Henning and J. Degel, **Active Carbon for Solvent Recovery**, France: Paper presented at the Meeting of the European Rotogravure Association Engineers Group, 1990.
13. F. Stoeckli, **Recent Delevopments in Dubinin's Theory**, Carbon Vol. 36, No. 4, pp. 363-368, 1998. **Composites**, Langmuir, 15, pp. 6505-6509, 1999.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

ตาราง ก.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดความชื้น (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน)
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

สาร	น้ำหนักสาร ดูดความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ดูดได้ (กรัม)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
SiO ₂	0.500	0.233	46.60
SiO ₂ - (20-wt%CaCl ₂)	0.504	0.336	66.67
SiO ₂ - (30-wt%CaCl ₂)	0.506	0.351	69.37
SiO ₂ - (40-wt%CaCl ₂)	0.504	0.431	85.52
SiO ₂ - (30-wt%CaCl ₂)- (10-wt%Zeolite)	0.506	0.369	72.92
SiO ₂ - (30-wt%CaCl ₂)- (20-wt%Zeolite)	0.506	0.435	85.97
SiO ₂ - (30-wt%CaCl ₂)- (30-wt%Zeolite)	0.506	0.473	93.48
SiO ₂ - (30-wt%CaCl ₂)- (40-wt%Zeolite)	0.506	0.490	96.84
SiO ₂ (Commercial)	0.501	0.113	22.55

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่ดูดได้(กรัม)} \times 100\%}{\text{น้ำหนักตัวดูดซับเริ่มต้น(กรัม)}}$$

ตาราง ก.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt%Zeolite)
(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	น้ำหนักสารดูดความชื้นเริ่มต้น (กรัม)	น้ำหนักน้ำที่ดูดได้ (กรัม)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
40	0.501	0.162	32.34
60	0.500	0.272	54.48
85	0.502	0.374	74.50
100	0.506	0.490	96.84

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่ดูดได้ (กรัม)} \times 100\%}{\text{น้ำหนักตัวดูดซับเริ่มต้น (กรัม)}}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.3 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO₂(Commercial) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน)

ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาทื)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.0639	6.39
60	0.1118	11.18
90	0.1557	15.57
120	0.1756	17.56
150	0.2019	20.19
180	0.2036	20.36
210	0.2176	21.76
240	0.2255	22.55
270	0.2255	22.55
300	0.2236	22.36
330	0.2216	22.16
360	0.2275	22.75
390	0.2295	22.95
420	0.2315	23.15
450	0.2295	22.95
480	0.2315	23.15
510	0.2315	23.15
540	0.2236	22.36
570	0.2216	22.16
600	0.2295	22.95
630	0.2295	22.95
660	0.2315	23.15
690	0.2255	22.55
720	0.2255	22.55
750	0.2255	22.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.4 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 ที่สังเคราะห์ (ใช้เวลายบ่ม 7 วัน)
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัม/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.1120	11.20
60	0.1820	18.20
90	0.2300	23.00
120	0.2700	27.00
150	0.3020	30.20
180	0.3300	33.00
210	0.3480	34.80
240	0.3640	36.40
270	0.3800	38.00
300	0.3900	39.00
330	0.4000	40.00
360	0.4080	40.80
390	0.4180	41.80
420	0.4280	42.80
450	0.4400	44.00
480	0.4500	45.00
510	0.4540	45.40
540	0.4620	46.20
570	0.4660	46.60
600	0.4680	46.80
630	0.4660	46.60
660	0.4620	46.20
690	0.4620	46.20
720	0.4660	46.60
750	0.4660	46.60
780	0.4660	46.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.5 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (20-wt% CaCl_2) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน)

ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัม/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.1528	15.28
60	0.2738	27.38
90	0.3532	35.32
120	0.4087	40.87
150	0.4544	45.44
180	0.4960	49.60
210	0.5298	52.98
240	0.5556	55.56
270	0.5813	58.13
300	0.5933	59.33
330	0.6131	61.31
360	0.6270	62.70
390	0.6329	63.29
420	0.6468	64.68
450	0.6548	65.48
480	0.6627	66.27
510	0.6647	66.47
540	0.6647	66.47
570	0.6647	66.47
600	0.6667	66.67
630	0.6667	66.67
660	0.6667	66.67
690	0.6667	66.67
720	0.6667	66.67
750	0.6687	66.87
780	0.6687	66.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.5 (ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (20-wt% CaCl_2) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน)
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
810	0.6667	66.67
840	0.6667	66.67
870	0.6667	66.67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.6 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) (ใช้เวลาดม 7 วัน)

ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัม/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.1700	17.00
60	0.2806	28.06
90	0.3577	35.77
120	0.4150	41.50
150	0.4644	46.44
180	0.5040	50.40
210	0.5336	53.36
240	0.5593	55.93
270	0.5850	58.50
300	0.6067	60.67
330	0.6206	62.06
360	0.6285	62.85
390	0.6403	64.03
420	0.6522	65.22
450	0.6581	65.81
480	0.6621	66.21
510	0.6660	66.60
540	0.6719	67.19
570	0.6739	67.39
600	0.6739	67.39
630	0.6779	67.79
660	0.6779	67.79
690	0.6818	68.18
720	0.6838	68.38
750	0.6858	68.58
780	0.6858	68.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.6 (ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน)
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาท)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
810	0.6877	68.77
840	0.6917	69.17
870	0.6917	69.17
900	0.6937	69.37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.7 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (40-wt% CaCl_2) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน)
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาทึ)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.1925	19.25
60	0.2897	28.97
90	0.3591	35.91
120	0.4147	41.47
150	0.4583	45.83
180	0.4960	49.60
210	0.5278	52.78
240	0.5575	55.75
270	0.5813	58.13
300	0.6032	60.32
330	0.6250	62.50
360	0.6448	64.48
390	0.6607	66.07
420	0.6766	67.66
450	0.6925	69.25
480	0.7083	70.83
510	0.7202	72.02
540	0.7321	73.21
570	0.7440	74.40
600	0.7540	75.40
630	0.7659	76.59
660	0.7738	77.38
690	0.7817	78.17
720	0.7877	78.77
750	0.7956	79.56
780	0.8036	80.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.7 (ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (40-wt% CaCl_2) (ใช้เวลามบ่ม 7 วัน)

ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาทึ)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
810	0.8095	80.95
840	0.8155	81.55
870	0.8214	82.14
900	0.8254	82.54
930	0.8294	82.94
960	0.8373	83.73
990	0.8433	84.33
1020	0.8472	84.72
1050	0.8512	85.12
1080	0.8532	85.32
1110	0.8552	85.52
1140	0.8571	85.71
1170	0.8571	85.71
1200	0.8552	85.52
1230	0.8571	85.71
1260	0.8571	85.71
1290	0.8552	85.52
1320	0.8552	85.52
1350	0.8552	85.52
1380	0.8552	85.52
1410	0.8552	85.52
1440	0.8552	85.52
1470	0.8552	85.52
1500	0.8552	85.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.8 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(10-wt%Zeolite) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน)
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัม/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.1818	18.18
60	0.2964	29.64
90	0.3735	37.35
120	0.4269	42.69
150	0.4664	46.64
180	0.5040	50.40
210	0.5316	53.16
240	0.5573	55.73
270	0.5810	58.10
300	0.5929	59.29
330	0.6146	61.46
360	0.6265	62.65
390	0.6443	64.43
420	0.6621	66.21
450	0.6680	66.80
480	0.6818	68.18
510	0.6957	69.57
540	0.7036	70.36
570	0.7075	70.75
600	0.7115	71.15
630	0.7154	71.54
660	0.7194	71.94
690	0.7233	72.33
720	0.7292	72.92
750	0.7332	73.32
780	0.7292	72.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.8 (ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(10-wt%Zeolite)

(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาท)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
810	0.7273	72.73
840	0.7292	72.92
870	0.7372	73.72
900	0.7332	73.32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.9 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(20-wt%Zeolite) (ใช้เวลาบ่ม 7 วัน)
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.1897	18.97
60	0.3103	31.03
90	0.3755	37.55
120	0.4269	42.69
150	0.4723	47.23
180	0.5040	50.40
210	0.5296	52.96
240	0.5533	55.33
270	0.5751	57.51
300	0.5870	58.70
330	0.6107	61.07
360	0.6245	62.45
390	0.6344	63.44
420	0.6502	65.02
450	0.6640	66.40
480	0.6739	67.39
510	0.6877	68.77
540	0.6957	69.57
570	0.7016	70.16
600	0.7036	70.36
630	0.7154	71.54
660	0.7451	74.51
690	0.7372	73.72
720	0.7510	75.10
750	0.7609	76.09
780	0.7708	77.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.9 (ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(20-wt%Zeolite)

(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
810	0.7708	77.08
840	0.7767	77.67
870	0.7964	79.64
900	0.7964	79.64
930	0.7984	79.84
960	0.8063	80.63
990	0.8103	81.03
1020	0.8182	81.82
1050	0.8221	82.21
1080	0.8261	82.61
1110	0.8320	83.20
1140	0.8241	82.41
1170	0.8379	83.79
1200	0.8340	83.40
1230	0.8597	85.97
1260	0.8459	84.59
1290	0.8498	84.98
1320	0.8557	85.57
1350	0.8518	85.18
1380	0.8557	85.57
1410	0.8538	85.38
1440	0.8577	85.77
1470	0.8617	86.17
1500	0.8597	85.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.10 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(30-wt%Zeolite)

(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.2134	21.34
60	0.3063	30.63
90	0.3834	38.34
120	0.4348	43.48
150	0.4802	48.02
180	0.5178	51.78
210	0.5514	55.14
240	0.5791	57.91
270	0.6067	60.67
300	0.6285	62.85
330	0.6542	65.42
360	0.6759	67.59
390	0.6957	69.57
420	0.7115	71.15
450	0.7332	73.32
480	0.7451	74.51
510	0.7569	75.69
540	0.7767	77.67
570	0.7925	79.25
600	0.8024	80.24
630	0.8142	81.42
660	0.8261	82.61
690	0.8340	83.40
720	0.8478	84.78
750	0.8557	85.57
780	0.8715	87.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.10 (ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(30-wt%Zeolite)

(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
810	0.8696	86.96
840	0.8893	88.93
870	0.8933	89.33
900	0.9032	90.32
930	0.9111	91.11
960	0.9150	91.50
990	0.9209	92.09
1020	0.9190	91.90
1050	0.9308	93.08
1080	0.9190	91.90
1110	0.9348	93.48
1140	0.9328	93.28
1170	0.9328	93.28
1200	0.9348	93.48
1230	0.9308	93.08
1260	0.9308	93.08
1290	0.9328	93.28
1320	0.9308	93.08
1350	0.9308	93.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.11 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO₂- (30-wt%CaCl₂)-(40-wt%Zeolite)

(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาท)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.2451	24.51
60	0.3696	36.96
90	0.4526	45.26
120	0.5119	51.19
150	0.5573	55.73
180	0.5949	59.49
210	0.6245	62.45
240	0.6502	65.02
270	0.6739	67.39
300	0.6957	69.57
330	0.7154	71.54
360	0.7352	73.52
390	0.7530	75.30
420	0.7708	77.08
450	0.7866	78.66
480	0.8024	80.24
510	0.8162	81.62
540	0.8281	82.81
570	0.8399	83.99
600	0.8518	85.18
630	0.8636	86.36
660	0.8755	87.55
690	0.8834	88.34
720	0.8933	89.33
750	0.9032	90.32
780	0.9111	91.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.11 (ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt%Zeolite)
(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาทื)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
810	0.9190	91.90
840	0.9249	92.49
870	0.9308	93.08
900	0.9348	93.48
930	0.9407	94.07
960	0.9447	94.47
990	0.9486	94.86
1020	0.9526	95.26
1050	0.9545	95.45
1080	0.9585	95.85
1110	0.9625	96.25
1140	0.9644	96.44
1170	0.9664	96.64
1200	0.9684	96.84
1230	0.9704	97.04
1260	0.9684	96.84
1290	0.9684	96.84
1320	0.9704	97.04
1350	0.9664	96.64
1380	0.9664	96.64
1410	0.9684	96.84
1440	0.9684	96.84
1470	0.9664	96.64
1500	0.9684	96.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.12 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt%Zeolite) (ใช้เวลัปม 7วัน)
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.1833	18.33
60	0.2928	29.28
90	0.3685	36.85
120	0.4263	42.63
150	0.4721	47.21
180	0.5080	50.80
210	0.5398	53.98
240	0.5657	56.57
270	0.5876	58.76
300	0.6096	60.96
330	0.6275	62.75
360	0.6414	64.14
390	0.6554	65.54
420	0.6673	66.73
450	0.6813	68.13
480	0.6932	69.32
510	0.7052	70.52
540	0.7151	71.51
570	0.7231	72.31
600	0.7251	72.51
630	0.7311	73.11
660	0.7351	73.51
690	0.7371	73.71
720	0.7390	73.90
750	0.7410	74.10
780	0.7430	74.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.12 (ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt%Zeolite)

(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
810	0.7450	74.50
840	0.7450	74.50
870	0.7450	74.50
900	0.7450	74.50
930	0.7430	74.30
960	0.7430	74.30
990	0.7430	74.30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.13 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (30-wt% CaCl_2)-(40-wt%Zeolite)
(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60 %

เวลา (นาท)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัม/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.1728	17.28
60	0.2856	28.56
90	0.3576	35.76
120	0.4080	40.80
150	0.4440	44.40
180	0.4728	47.28
210	0.4920	49.20
240	0.5088	50.88
270	0.5208	52.08
300	0.5280	52.80
330	0.5328	53.28
360	0.5400	54.00
390	0.5400	54.00
420	0.5424	54.24
450	0.5448	54.48
480	0.5424	54.24
510	0.5424	54.24
540	0.5448	54.48
570	0.5448	54.48
600	0.5424	54.24
630	0.5424	54.24
660	0.5424	54.24
690	0.5400	54.00
720	0.5400	54.00
750	0.5448	54.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.14 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO₂- (30-wt%CaCl₂)-(40-wt%Zeolite)

(ใช้เวลาบ่ม 7 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัม/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.1297	12.97
60	0.1956	19.56
90	0.2355	23.55
120	0.2555	25.55
150	0.2735	27.35
180	0.2874	28.74
210	0.2994	29.94
240	0.3034	30.34
270	0.3094	30.94
300	0.3114	31.14
330	0.3134	31.34
360	0.3154	31.54
390	0.3194	31.94
420	0.3214	32.14
450	0.3234	32.34
480	0.3234	32.34
510	0.3234	32.34
540	0.3234	32.34
570	0.3214	32.14
600	0.3234	32.34
630	0.3214	32.14
660	0.3234	32.34
690	0.3214	32.14
720	0.3214	32.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.15 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO₂ (ใช้เวลาบ่ม 30 วัน) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.109	10.93
60	0.1809	18.09
90	0.2346	23.46
120	0.2783	27.83
150	0.3201	32.01
180	0.3519	35.19
210	0.3797	37.97
240	0.4016	40.16
270	0.4274	42.74
300	0.4374	43.74
330	0.4573	45.73
360	0.4652	46.52
390	0.4692	46.92
420	0.4692	46.92
450	0.4811	48.11
480	0.4831	48.31
510	0.4811	48.11
540	0.4851	48.51
570	0.4831	48.31
600	0.4751	47.51
630	0.4871	48.71
660	0.4851	48.51
690	0.4831	48.31
720	0.4891	48.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.16 ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (20-wt% CaCl_2) (ใช้เวลาดำบ่ม 30 วัน)
ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาที)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
0	0	0
30	0.2231	22.31
60	0.3347	33.47
90	0.4044	40.44
120	0.4622	46.22
150	0.5100	51.00
180	0.5478	54.78
210	0.5797	57.97
240	0.6135	61.35
270	0.694	63.94
300	0.6633	66.33
330	0.6853	68.53
360	0.7012	70.12
390	0.7211	72.11
420	0.7351	73.51
450	0.7530	75.30
480	0.7709	77.09
510	0.7789	77.89
540	0.7928	79.28
570	0.8048	80.48
600	0.8127	81.27
630	0.8227	82.27
660	0.8287	82.87
690	0.8386	83.86
720	0.8446	84.46
750	0.8546	85.46
780	0.8645	86.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.16 (ต่อ) ประสิทธิภาพการดูดซับของ SiO_2 - (CaCl_2 20%) (ใช้เวลานับ 30 วัน)

ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

เวลา (นาทีก)	ปริมาณน้ำที่ดูดซับ (กรัมน้ำ/กรัมสารดูดซับ)	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)
810	0.8725	87.25
840	0.8785	87.85
870	0.8825	88.25
900	0.8884	88.84
930	0.8884	88.84
960	0.9004	90.04
990	0.9064	90.64
1020	0.9104	91.04
1050	0.9104	91.04
1080	0.9124	91.24
1110	0.9163	91.63
1140	0.9143	91.43
1170	0.9203	92.03
1200	0.918	91.83
1230	0.9223	92.23
1260	0.9223	92.23
1290	0.9203	92.03
1320	0.9183	91.83
1350	0.9223	92.23
1380	0.9223	92.23
1410	0.9223	92.23
1440	0.9223	92.23
1470	0.9223	92.23
1500	0.9223	92.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ข้อมูลซีโอไลต์

No.	22	23	24	25
Name	JRC-Z-Y5.5	JRC-Z-Y5.3	JRC-Z-HY5.5	JRC-Z-HY5.3
Morphology	Powder	Powder	Powder	Powder
Chemical Composition %				
SiO ₂ wt%	67.3	65.0	75.3	74.9
Al ₂ O ₃ wt%	20.3	21.0	22.2	24.0
Na ₂ O wt%	12.4	14.0	4.3	1.1
Fe ₃ wt%	-	0.03	-	0.03
Ig. Loss	20.7	20.2	1.2	12.1
Si /Al ratio	5.6	5.27	5.6	5.31
Physical Parameters				
Particle size, μm	0.2-0.5	-	0.2-0.5	-
Apparent density, g/cm ³	0.33	0.34	0.53	0.36
Pore volume, cm ³ /g	-	0.40	-	0.42
Surface area, m ² /g	660	728	570	692
Preparation				
Method	NaY	NaY Zeolite prepared from water glass, silica gel and sodium aluminate	No.22 was ion-exchanged and calcined: degree of ion-exchange, 68%	No.23 was ion-exchanged, dried and calcined at 823 K for 3 h, and it was repeatedly ion- exchanged and calcined: degree of ion-exchange, 92%
Supplier	Tosoh	C.C.I.	Tosoh	C.C.I.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้