

การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลเข้มข้นด้วยผงซิลิกาเจลจากแกลบ

นายสุชานนท์ ติรพัฒน์กบิล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ADSORPTION OF WATER IN CONCENTRATED ETHANOL WITH SILICA GEL POWDER  
FROM RICE HUSK

Mr. Suchanon Tirapatkabin

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลเข้มข้นด้วยผงซิลิกาเจลจาก  
แกลบ

โดย

นายสุชานนท์ ติรพัฒน์กบิล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภาวสันต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บรรเจิด จงสมจิตร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์)

สุชานนท์ ตีรพัฒน์กบิล : การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลเข้มข้นด้วยผงซิลิกาเจลจาก  
 แกลบ. (ADSORPTION OF WATER IN CONCENTRATED ETHANOL WITH  
 SILICA GEL POWDER FROM RICE HUSK) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก :  
 รศ. ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช, 108 หน้า.

การสังเคราะห์ผงซิลิกาเจลจากแกลบ โดยการแช่กรดไฮโดรคลอริกและผ่านการเผา  
 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผงซิลิกาเจลที่สังเคราะห์จากแกลบถูก  
 นำมาใช้ในการดูดซับน้ำในเอทานอลเข้มข้นเริ่มต้น 92.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ  
 บรรยากาศ ได้ศึกษาสมมูลดูดซับ รวมไปถึงการดูดซับของน้ำในเอทานอลเข้มข้น นอกจากนี้  
 ประสิทธิภาพปรับคืนสภาพของการของผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบสามารถทำได้  
 โดยการดูดซับสามารถเข้าสู่สมดุลในเวลา 60 นาที สามารถแสดงด้วยแบบจำลองสมมูล  
 ดูดซับของเฮนรี โดยมีค่าคงที่สมมูลดูดซับของแบบจำลองคือ  $K_H$  ผงซิลิกาเจลสามารถ  
 นำกลับมาใช้ใหม่ได้จากการผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง  
 ซึ่งสามารถทำให้ประสิทธิภาพคล้ายคลึงกับตัวดูดซับใหม่ที่สามารถใช้งานมากกว่า 20 รอบ  
 การดูดซับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์.....  
 ปีการศึกษา.....2554.....

# # 5070507021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION / ETHANOL / WATER / RICE HUSK

SUCHANON TIRAPATKABIN : ADSORPTION OF WATER IN  
CONCENTRATED ETHANOL WITH SILICA GEL POWDER FROM RICE  
HUSK. ADVISOR : ASSOC. PROF. DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D., 108 pp.

Rice husk silica gel powder was synthesized by soaking with HCl and burning at 700 °C for 2 hours, consecutively. The silica gel powder was employed to adsorb the remaining water in 92.8% ethanol at ambient temperature. The adsorption equilibrium, including water adsorption isotherm, was investigated. In addition, the adsorption performance of regenerated silica gel powder was assessed. The adsorption equilibrium was reached within 60 min. The adsorption isotherm agreed with Henry's model, where the model parameter was  $K_H$ . The spent silica gel powder was regenerated by drying at 150 °C for 24 hours. The similar adsorption performance could be achieved more than 20 cycles of adsorption.

Department : .....Chemical Engineering..... Student's Signature .....

Field of Study : .....Chemical Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : .....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เดชา  
ฉัตรศิริเวช ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และคอยเอาใจใส่ สำหรับงานวิจัยนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ  
ภวสันต์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. บรรเจิด จงสมจิตร และ อาจารย์  
ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์ สำหรับความช่วยเหลือ ตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ตลอดจน  
ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการศึกษาวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี นายพิบูลย์ เกิดโภคทรัพย์  
นายวรรณดารา อินทรปัญญา และ นายณพัทธ์ รัชมพิพิธ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการ  
ทดลอง ตลอดจนจบการศึกษาวิจัยนี้

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่ช่วยสนับสนุน และให้กำลังใจ  
ด้วยดีตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
สัญลักษณ์และอักษรย่อ .....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เหนือทอนอล .....	4
2.2 ซิลิกาเจล.....	5
2.3 แกลบ.....	6
2.4 การสกัดซิลิกาจากแกลบ .....	9
2.5 การดูดซับ.....	12
2.5.1 พฤติกรรมการดูดซับของสาร.....	13
2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	13
2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี.....	13
2.5.2 ประเภทของตัวดูดซับ .....	14
2.5.2.1 คาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon).....	14
2.5.2.2 อลูมินากัมมันต์ (Activated Alumina) .....	14
2.5.2.3 ซิลิกาเจล (Silica Gel) .....	14
2.5.2.4 โมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular Sieves) .....	15

บทที่	หน้า
2.5.2.5	15
2.5.3	15
2.5.4	16
2.5.5	17
2.5.5.1	17
2.5.5.2	18
2.5.5.3	18
2.5.6	19
2.6	20
2.7	21
2.8	22
2.9	24
2.10	25
3	27
3.1	28
3.1.1	27
3.1.2	28
3.1.3	28
3.1.4	28
3.2	29
3.2.1	29



3.2.2 การหาชนิดและปริมาณในสารตัวอย่างโดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF).....	29
3.2.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD) .....	29
3.2.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โมเลกุลของสารด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR).....	29
3.3 ทดสอบการคืนสภาพตัวดูดซับของการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำด้วย ผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ .....	29
3.4 การดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาเจลพาณิชย์ .....	30
3.4.1 การเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาเจลพาณิชย์.....	30
3.4.2 การทดลองดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอล .....	30
3.4.3 นำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ .....	30
3.5 การดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและ ผงซิลิกาเจลพาณิชย์แบบต่อเนื่อง.....	31
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	32
4.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบ .....	32
4.1.1 การเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ .....	32
4.1.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของผงซิลิกาเจลที่สังเคราะห์ จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์ .....	38
4.1.2.1 การตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนโดยวิธีบีอีที (Bruauer- Emmett-Teller Method, BET) .....	38
4.1.2.2 การหาชนิดและปริมาณในสารตัวอย่างโดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF).....	39
4.1.2.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD) .....	40
4.1.2.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โมเลกุลของสารด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) .....	43
4.1.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ .....	44

บทที่	หน้า
4.1.4 การทดสอบดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบจากวิธีต่างๆ .....	45
4.2 การทดลองการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลเข้มข้น .....	46
4.2.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสม เอทานอลปนน้ำ .....	46
4.2.2 ผลการทดลองดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ ...	47
4.2.3 ผลการทดลองดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพานิชย์ .....	51
4.2.4 ผลการทดลองเปรียบเทียบการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจล สังเคราะห์จากแกลบกับผงซิลิกาเจลพานิชย์ .....	55
4.3 ผลการทดสอบการปรับสภาพตัวดูดซับของการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำด้วย ผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ .....	57
4.3.1 ทดสอบการปรับสภาพตัวดูดซับ .....	56
4.3.2 ทดสอบการดูดซับซ้ำ .....	59
4.4 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จาก แกลบและผงซิลิกาเจลพานิชย์แบบต่อเนื่อง.....	60
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	65
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก ผลการทดลองการสังเคราะห์ซิลิกาเจลจากแกลบ .....	70
ภาคผนวก ข ผลการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างผงซิลิกาเจล .....	72
ภาคผนวก ค ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสม เอทานอลปนน้ำโดยวิธีวัดความหนาแน่น .....	77
ภาคผนวก ง ผลการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ และผงซิลิกาเจลพานิชย์ .....	80
ภาคผนวก จ การคำนวณสมมูลดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมมูล .....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงคุณสมบัติทางเคมีของสารซิลิกาเจล..... 6
2.2	แสดงปริมาณออกไซด์ต่างๆในเกลบที่ผ่านการเผาแล้ว ..... 7
4.1	ผลการเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบในวิธีต่างๆ..... 36
4.2	แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของซิลิกาเจลจากเถ้าขาวในกระบวนการต่างๆ..... 37
4.3	ผลการตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนโดยวิธีบีอีที ของผงซิลิกาเจลที่สกัดจากเกลบและผงซิลิกาเจลพานิชย์ ..... 38
4.4	ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบในรูปออกไซด์ของตัวดูดซับโดยวิธีเอ็ก-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี ของผงซิลิกาเจลที่สกัดจากเกลบและผงซิลิกาเจลพานิชย์ ..... 39
4.5	ผลการตรวจวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างของตัวดูดซับโดยวิธีเอ็ก-เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ของผงซิลิกาเจลที่สกัดจากเกลบและผงซิลิกาเจลพานิชย์..... 41
4.6	การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โมเลกุลของสารด้วยเครื่องเอพทีไอ ของผงซิลิกาเจลที่สกัดจากเกลบและผงซิลิกาเจลพานิชย์ ..... 43
4.7	แสดงการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ในการผลิตผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบ..... 44
4.8	แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุล ..... 48
4.9	แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1..... 50
4.10	แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุล ..... 52
4.11	แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1..... 54
4.12	แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุล ..... 56
4.13	การดูดซับเอทานอลและน้ำของตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบและผงซิลิกาเจลพานิชย์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง..... 58
4.14	แสดงค่าคงที่ได้จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี .... 64
ก.1	การเผาเกลบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ..... 71
ก.2	การเผาเถ้าดำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 71
ก.3	การเผาเกลบที่ผ่านการแช่กรดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ..... 72
ก.4	การเผาเถ้าดำที่ผ่านการแช่กรดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ..... 72
ก.5	การตกผลึกซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบในกระบวนการต่างๆ ..... 72

ตารางที่	หน้า
ค.1 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ที่อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส.....	77
ง.1 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:4 (SG25) .....	80
ง.2 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:5 (SG20) .....	81
ง.3 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:6 (SG17) .....	82
ง.4 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:7 (SG14) .....	83
ง.5 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:8 (SG13) .....	84
ง.6 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:9 (SG11) .....	85
ง.7 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:10 (SG10) .....	86
ง.8 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลฟานิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:4 (SGC25).....	87
ง.9 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลฟานิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:5 (SGC20).....	88
ง.10 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลฟานิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:6 (SGC17).....	89
ง.11 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลฟานิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:7 (SGC14).....	90
ง.12 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลฟานิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:8 (SGC13).....	91
ง.13 การดูดซับซึบน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลฟานิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:9 (SGC11).....	92

ตารางที่	หน้า
ง.14 การดูดซับชั้นน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพานิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:10 (SGC10).....	93
จ.1 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุลของการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบ .....	95
จ.2 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุลของการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพานิชย์.....	95
จ.3 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG25) .....	97
จ.4 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG20) .....	98
จ.5 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG17) .....	98
จ.6 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG14) .....	99
จ.7 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG13) .....	99
จ.8 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG11) .....	100
จ.9 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG10) .....	100
จ.10 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC25).....	101
จ.11 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC20).....	101
จ.12 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC17).....	102
จ.13 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC14).....	102
จ.14 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC13).....	103
จ.15 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC11).....	103
จ.16 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC10).....	104
จ.17 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบ .....	106
จ.18 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1 ของการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพานิชย์ .....	107

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงปริมาณการปลูกข้าวในประเทศไทย..... 2
2.1	โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล..... 4
2.2	เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (BET) ..... 20
2.3	เครื่อง X-ray Fluorescence ..... 21
2.4	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์..... 22
2.5	แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นโดยผลึก ตามหลักการของ Bragg's law..... 23
2.6	เครื่องFourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)..... 24
4.1	แถบดูดและแถบที่ผ่านการจำลองการเผาที่อุณหภูมิปกติ (แก้ดำ) ..... 32
4.2	แก้ขาวที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 32
4.3	แก้ที่เหลือจากการกรองบนกระดาษกรองที่ผ่านการอบ ..... 33
4.4	ซิลิกาเจลที่ได้จากการตกตะกอนก่อนนำไปอบแห้ง ..... 34
4.5	ผงซิลิกาเจลที่ได้จากการสังเคราะห์จากแอลกอฮอล์และการคัดขนาด..... 34
4.6	การเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแอลกอฮอล์โดยใช้กระบวนการต่างๆ..... 35
4.7	ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์จากเครื่อง XRD ของผงซิลิกาเจล 1 ..... 42
4.8	ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์จากเครื่อง XRD ของผงซิลิกาเจลพาณิชย์ ..... 42
4.9	การทดลองดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากแอลกอฮอล์ในวิธีต่างๆ ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ..... 45
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยวิธีวัดความหนาแน่น..... 46
4.11	การทดลองดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ เป็นเวลา 120 นาที..... 47
4.12	ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลกับสัดส่วนตัวดูดซับต่างๆ..... 49
4.13	การทดลองดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาเจลพาณิชย์ในอัตราส่วนต่างๆ เป็นเวลา 60 นาที..... 51
4.14	ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำกับสัดส่วนตัวดูดซับต่างๆ..... 53

รูปที่	หน้า
4.15 การทดลองเปรียบเทียบการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จาก เกลบกับผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่สัดส่วนตัวดูดซับ 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ .....	55
4.16 การปรับสภาพของตัวดูดซับในการทดลองดูดซับเอทานอลเข้มข้น .....	57
4.17 การปรับสภาพของตัวดูดซับในการทดลองดูดซับน้ำกลั่น.....	57
4.18 การดูดซับซ้ำของของตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากเกลบ โดยใช้ดูดซับน้ำใน สารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลเข้มข้น ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 (SG25) .....	59
4.19 แสดงแบบจำลองการดูดซับแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบกับระบบดูดซับในหอดูดซับ.....	60
4.20 การดูดซับแบบต่อเนื่องของผงซิลิกาสังเคราะห์จากเกลบ .....	61
4.21 การดูดซับแบบต่อเนื่องของผงซิลิกาเจลพาณิชย์ .....	61
4.22 การดูดซับแบบต่อเนื่องของตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบและผงซิลิกาเจล พาณิชย์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อรอบการดูดซับ.....	62
4.23 การดูดซับแบบต่อเนื่องของตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบและผงซิลิกาเจล พาณิชย์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อรอบการดูดซับที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลอง .....	63
ข.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 1 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ .....	72
ข.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 2 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ .....	72
ข.3 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 3 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ .....	73
ข.4 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 4 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ .....	73
ข.5 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 5 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ .....	74
ข.6 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 1 ด้วยเครื่องเอพทีไออาร์.....	74
ข.7 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 2 ด้วยเครื่องเอพทีไออาร์.....	75
ข.8 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 3 ด้วยเครื่องเอพทีไออาร์.....	75
ข.9 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 4 ด้วยเครื่องเอพทีไออาร์.....	76
ข.10 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 5 ด้วยเครื่องเอพทีไออาร์.....	76
ค.1 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นและความหนาแน่นของผสมเมทานอลกับน้ำที่ อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส .....	78
ค.2 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นและความหนาแน่นของผสมเมทานอลกับน้ำที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส .....	78

รูปที่	หน้า
ค.3	กราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นและความหนาแน่นของของผสมเมทานอลกับน้ำที่ อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส ..... 79
ค.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลกับน้ำ ด้วยวิธีวัดความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 29-31 องศาเซลเซียส ..... 79



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

## สัญลักษณ์

$C$	=	ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ หลังการดูดซับ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
$C_o$	=	ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ เริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
$C_e$	=	ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่สมดุล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
$b$	=	ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับ
$q_{EtOH}$	=	มวลเอทานอลที่ถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
$q_{H_2O}$	=	มวลน้ำที่ถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
$C_1$	=	ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ ก่อนการดูดซับ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
$C_2$	=	ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ หลังการดูดซับ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
$M_1$	=	มวลของของผสมเอทานอล-น้ำ ก่อนการดูดซับ (กรัม)
$M_2$	=	มวลของของผสมเอทานอล-น้ำ หลังการดูดซับ (กรัม)
$M$	=	มวลตัวดูดซับ (กรัม)
$q_t$	=	ปริมาณการดูดซับที่ได้จากการทดลอง (กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)
$q_e$	=	ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)
$k_1$	=	ค่าคงที่ของจลพลศาสตร์อันดับ 1
$t$	=	เวลา (นาที)

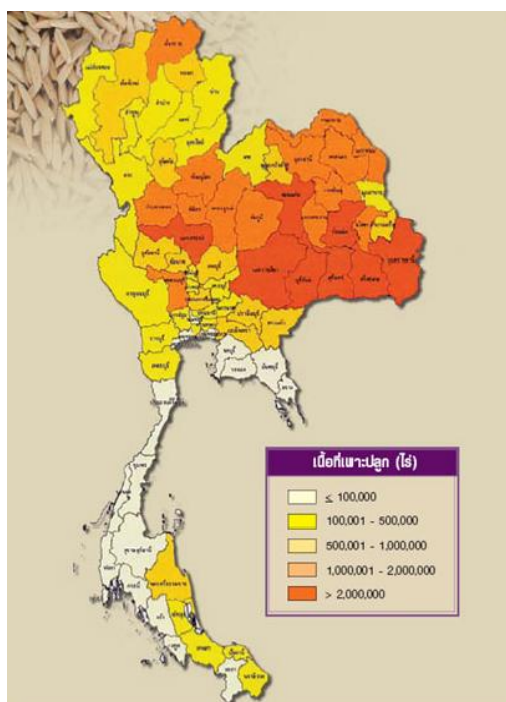
## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ซึ่งนับวันยังมีความสำคัญมากขึ้นและขาดเสียมิได้ ทั้งในด้านการอำนวยความสะดวก ด้านการขนส่ง หรือใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ในทางกลับกันแหล่งพลังงานที่มีความต้องการมากกำลังลดลงและหมดไป ดังนั้นพลังงานทางเลือกจึงเป็นแหล่งของพลังงานที่สามารถนำมาทดแทนพลังงานเดิม เอทานอลเป็นพลังงานทางเลือกที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง หรือนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลในสัดส่วนที่แตกต่างกันเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานเชื้อเพลิง เนื่องจากเอทานอลเป็นสารที่ให้ค่าออกเทนสูง แต่เอทานอลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้นต้องเป็นเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร[1] ซึ่งสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น มันสำปะหลัง กากน้ำตาล และธัญพืชต่างๆ เป็นต้น การเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งทั่วไปคือยีสต์ จะได้ความเข้มข้นเพียงร้อยละ 5-15 โดยมวล ด้วยสาเหตุนี้เองความต้องการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลเพื่อจะสามารถนำไปใช้งานในด้านเชื้อเพลิง หรือวัตถุดิบในอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งสำคัญ [2]

เนื่องด้วยประเทศไทยนั้นเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการปลูกข้าวกระจายอยู่ทั่วประเทศ พื้นที่เพาะปลูกข้าวในปี 2549 มีประมาณ 67.6 ล้านไร่ แบ่งเป็นพื้นที่นาปรังร้อยละ 85 และพื้นที่นาปรังร้อยละ 15 โดยมีผลผลิตข้าวเปลือกรวม 29.6 ล้านตัน ซึ่งในการสีข้าวก็จะได้แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้ง โดยในข้าวเปลือกจะมีแกลบเป็นปริมาณ 22-25% โดยน้ำหนัก เนื่องด้วยแกลบมีความหนาแน่นต่ำจึงต้องใช้พื้นที่จัดเก็บแกลบเป็นปริมาณมาก การใช้ประโยชน์โดยตรงจากแกลบ เช่น การใช้เป็นเชื้อเพลิง (โดยมีพลังงานความร้อนประมาณ 3,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) ใช้ผสมดินเหนียวในการผลิตอิฐ ใช้ผสมดินทำให้ดินร่วนซุย ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เป็นแหล่งอาหารของพืชโดยใช้เป็นปุ๋ย และใช้ในการคลุมดินรักษาความชุ่มชื้นของดิน เป็นต้น [3]



รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณการปลูกข้าวในประเทศไทย  
(ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปี 2550)

ในการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า แกลบมีสารประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งเป็นวัสดุที่นับวันจะมีมูลค่าเพิ่มขึ้น และยังมีวัฏจักรในการผลิตสั้น โดยมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ไม่นำไฟฟ้าและความร้อน ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี ซึ่งในธรรมชาติพบได้โดยทั่วไปในแหล่งแร่ธรรมชาติ เช่น ททราย เป็นต้น ในอุตสาหกรรม ซิลิกาถูกใช้ในการผลิต แก้ว เซรามิก และอิฐทนไฟ นอกจากนี้ซิลิกาเจลยังมีความสามารถในการดูดซับความชื้นและสารเคมีได้ดี จึงนิยมใช้เป็นสารดูดความชื้น ซึ่งถูกใช้มากในอุตสาหกรรมอาหารและยา [3]

จากการศึกษาและวิจัยของนักวิจัยหลายท่านพบว่า แกลบสามารถใช้เป็นแหล่งผลิตซิลิกาได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเถ้าที่เหลือจากเผาของแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่ และซิลิกาเจลยังมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่นำซิลิกาเจลที่สกัดจากแกลบ มาใช้ในการดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอล เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่จะนำไปใช้งานต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการดูดซับน้ำออกจากสารละลายเอทานอลปนน้ำที่สภาวะของเหลว โดยใช้ผงซิลิกาเจลจากแกลบ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำที่มีความเข้มข้น 92.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบในสภาวะของเหลว ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ

1.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

1.3.3 ทดสอบการคืนสภาพตัวดูดซับของการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำ ด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

1.3.4 เปรียบเทียบการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำของตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบกับผงซิลิกาเจลพาณิชย์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงลักษณะการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

1.4.2 สามารถเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้มาเป็นวัสดุที่มีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น

1.4.3 มีกระบวนการทางเลือกในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของสารละลายเอทานอล

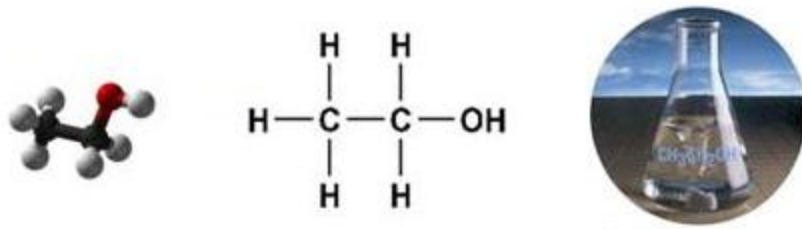
1.4.4 ได้พัฒนาความรู้เกี่ยวกับกระบวนการดูดซับทั้งในด้านทฤษฎีและในทางปฏิบัติ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) คือ แอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีสูตรเคมี  $C_2H_5OH$  มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ติดไฟง่าย มีความไวไฟและค่าออกเทนสูง (เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 มีค่าออกเทนสูงถึง 113) ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นไฮดรอกซิล สารประกอบอนุพันธ์ของไฮโดรคาร์บอน เกิดจากการแทนที่อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl group, (OH)) ซึ่งออกซิเจนประกอบอยู่ในโมเลกุล ออกซิเจนจะจับตัวอยู่ในรูปของอนุมูลไฮดรอกซิล ทำให้โมเลกุลของเอทานอล มีคุณสมบัติเป็นโมเลกุลมีขั้ว และสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของเอทานอลหรือสารประกอบอื่นๆที่มีหมู่ไฮดรอกซิล แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยมีน้ำหนักโมเลกุล 46.07 ความหนาแน่น 0.789 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว  $-114.1$  องศาเซลเซียส จุดเดือด  $78.5$  องศาเซลเซียส สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย ใช้ผลิตอาหารและเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรม ใช้เป็นเชื้อเพลิง [4]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเอทานอล

เอทานอล ผลิตได้ทั้งจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี โดยใช้เอทิลีนเป็นวัตถุดิบ และกระบวนการทางชีวเคมี โดยใช้พืชผลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลสูงเป็นวัตถุดิบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมและมีวัตถุดิบที่สามารถเลือกใช้ได้หลากหลายชนิดตามความเหมาะสมของแต่ละประเทศ เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันสำปะหลัง อ้อย กากน้ำตาล

สำหรับหลาย ๆ นอกจากนั้นยังมีความพยายามพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบที่มีเซลลูโลสสูง เช่น ฟางข้าว ชี้อ้อย หญ้า เป็นต้น [3]

## 2.2 ซิลิกาเจล

ซิลิกาเจล คือ สารสังเคราะห์ที่สกัดจากทรายขาวผสมกรดกำมะถันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า ซิลิกอน ไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) มีลักษณะเป็นเม็ดกลม โดยทั่วไป ซิลิกาเจล จะมีลักษณะเป็นโพรง มีรูพรุน ทำให้มีพื้นผิว ที่ใช้ในการดูดความชื้นเป็นจำนวนมาก ประมาณ 800 ตารางเมตรต่อน้ำหนัก 1 กรัม หรือประมาณ 35-40 % ของน้ำหนักตัวเอง [5]

ซิลิกาเจล (Silica Gel) มี 4 ชนิดคือ

1. ชนิดเม็ดสีขาว (White Silica Gel) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นประมาณ 35-40% ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแต่ละเม็ดประมาณ 2-5 มิลลิเมตร
2. ชนิดเม็ดสีน้ำเงิน (Blue Silica Gel) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นเหมือนกับเม็ดใสทุกประการ เพียงแต่มีการเพิ่มสารพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดปริมาณความชื้นที่กักเก็บไว้ คือ โคบอลต์ ซึ่งใช้เป็นสารอินดิเคเตอร์ ทำให้ผู้ใช้รู้ว่ามีการเก็บความชื้นไว้ในปริมาณเท่าไร โดยจะแสดงเป็นสีน้ำเงินและสีชมพู หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เม็ดเป็นสีน้ำเงิน หมายความว่า สารดูดความชื้นนั้นยังไม่ได้ใช้งานหรือไม่ทำงานนั่นเอง ส่วนเม็ด ที่เป็นสีชมพูหรือสีม่วงอ่อน แสดงว่าหมดอายุในการใช้งาน ควรเปลี่ยนสารดูดความชื้นใหม่
3. ชนิดเม็ดสีส้ม (Orange Silica Gel) มีคุณสมบัติเหมือนกับชนิดสีน้ำเงินทุกประการ การทำงานจะเปลี่ยนจากสีส้ม เป็นสีเขียวอ่อน ซิลิกาเจลชนิดนี้ยังไม่ได้ได้รับความนิยมในเมืองไทย เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูง
4. ชนิดเม็ดทราย (Silica Sand) มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นเช่นเดียวกับเม็ดใสทุกประการแตกต่างกันที่ขนาดของเม็ดของสาร ซึ่งสารดูดความชื้นชนิดเม็ดทรายจะมีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของสารซิลิกาเจล

ส่วนประกอบ (Composition)	ปริมาณ (Content) (%)
SiO <sub>2</sub>	99.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03
CaO	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.09
ZnO <sub>2</sub>	0.02
Ig. loss	0.02

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของซิลิกาเจลทั่วไป โดยจะมี SiO<sub>2</sub> เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 99.71 % โดยน้ำหนัก และยังมีสารประกอบออกไซด์อื่นๆปนอยู่ด้วย

### 2.3 แกลบ

แกลบข้าว (Rice Husk) คือ ผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว เป็นเปลือกของข้าวสาร เป็นส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสาร เมล็ดมีลักษณะเป็นรูปทรงรี เม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาล หรือเหลืองนวลแล้วแต่ภูมิภาคที่มีการปลูกข้าว ปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกแกลบข้าวรายใหญ่ของโลก จากการนำแกลบข้าวไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่างๆและยังสามารถนำไปผสมกับวัสดุอื่น ๆ ทำเป็นวัสดุก่อสร้างแล้ว แกลบข้าวยังถูกนำไปผลิตเป็นขี้แกลบ (Rice Husk Ash) เพื่อนำขี้แกลบไปใช้ประโยชน์อีกมาก ซึ่งส่วนประกอบหลักของขี้แกลบ คือ ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) สามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี และการเผาที่อุณหภูมิสูง ซิลิกาในขี้แกลบมีทั้งที่เป็น ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) ซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะผลึกและความหนาแน่นของซิลิกา รูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์และเส้นยาว และซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีรูปร่างไม่เป็นผลึก (Non-crystalline Silica) [6]

ซิลิกาที่อยู่ในแกลบนั้นเกิดขึ้นจากการดูดซึมธาตุอาหารของต้นข้าว โดยรากของข้าวก็จะดูดซึมธาตุอาหารต่างๆที่จำเป็นรวมทั้งธาตุซิลิคอน(Si)ด้วย จากนั้นสารละลายซิลิคอนจะถูกสะสมอยู่ที่บริเวณผิวด้านนอกของเปลือกเมล็ดข้าว กลายเป็นซิลิกาที่รวมตัวกับเส้นใยประเภทเซลลูโลส และลิกนิน เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของเปลือกข้าวหรือที่เรียกกันว่าแกลบนั่นเอง โดยองค์ประกอบของแกลบนั้นประกอบด้วยสารอนินทรีย์ประมาณ 20-25% เซลลูโลส 30-40% ลิกนิน 19-47% และน้ำตาลประมาณ 17-26% โดยในส่วนของสารอนินทรีย์นั้นองค์ประกอบหลักก็คือซิลิกา ซึ่งมีช่วงอยู่ตั้งแต่ 85-99% นอกจากนั้นยังมี  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$  และอื่นๆซึ่งปริมาณซิลิกาและมลทินเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่เพาะปลูกข้าว ชนิดของข้าวและปุ๋ยที่ใช้ด้วย [7]

การสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบขาวที่อยู่ในรูปออสซิลอน ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา การเผาแกลบจำเป็นต้องทำในอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากหากเผาเป็นเวลานานเกินไปจะส่งผลให้ซิลิกานั้นอยู่ในรูปของผลึก ซึ่งยากในการบดละเอียดและเฉื่อยในการทำปฏิกิริยา

## ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณออกไซด์ต่างๆในแกลบที่ผ่านการเผา

%ออกไซด์	แกลบดิบเผาที่ 650 °C	แกลบดิบผ่านการล้างและเผาที่ 650 °C
%SiO <sub>2</sub>	95-96	98.5-99.5
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0-1.5	0.5-0.8
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-0.8	0.05
%CaO	0.2-0.5	0.05
%Na <sub>2</sub> O	0.1-0.2	0
%K <sub>2</sub> O	1.3-1.5	0.1-0.3
%MgO	0.3-0.5	0
Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	15-30	250-350

หมายเหตุ: แกลบที่ทำการวิเคราะห์นี้เป็นข้าวหอมมะลิ แหล่งอำเภอสหัสขันธ์ จังหวัดสระบุรี



โดยทั่วไปแกลบที่ได้จากการเผาแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. แกลบดำ เกิดจากการเผาแกลบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C ทำให้สารประกอบคาร์บอนหลงเหลืออยู่มาก คือ ประมาณ 5 – 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. แกลบขาว เกิดจากการเผาแกลบในช่วงอุณหภูมิ 600 – 800 °C ในที่มีอากาศเพียงพอ แกลบชนิดนี้จะมีปริมาณซิลิกาที่สูงมาก

ซิลิกาที่ได้จากแกลบที่ผ่านกระบวนการล้างและเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสนั้นจะยังไม่มีรูปผลึกที่ชัดเจน เป็นอสัณฐานซิลิกา (Amorphous phase) มี%SiO<sub>2</sub> อยู่สูงมาก (มากกว่า99เปอร์เซ็นต์) มีขนาดของอนุภาคที่ละเอียดมาก (ต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร) เมื่อเทียบกับซิลิกาที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบอื่นๆเช่น ซิลิกาที่ได้จากการบดทราย Quartz Flint รวมทั้งเมื่อเทียบกับอสัณฐานซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตเล็กๆพวกไดอะตอมที่ตายแล้วตกตะกอนทับถมกันมานานหลายร้อยล้านปี ซึ่งอสัณฐานซิลิกาเหล่านี้เราเรียกว่า ไดอะตอมไมท์ (Diatomite)

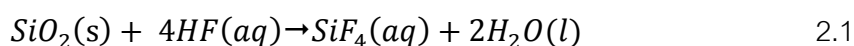
เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ซิลิกาที่มีอยู่ในแกลบเทียบกับส่วนอื่นของต้นข้าวและพืชชนิดอื่นๆแล้ว แกลบก็ยังมีปริมาณของซิลิกาสูงกว่าพืชชนิดอื่นอยู่มาก โดยในฟางข้าวมีซิลิกาอยู่ 82 เปอร์เซ็นต์ เปลือกข้าวโพดมีซิลิกาอยู่ 54 เปอร์เซ็นต์ ไม้ไผ่มีซิลิกาอยู่ 57 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

กระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบนั้นสามารถใช้แกลบดิบหรือซีแกลบที่ผ่านการเผามาแล้วก็ได้ แต่การสังเคราะห์ซิลิกาบริสุทธิ์จากซีแกลบนั้นจะทำได้ยากกว่าและซิลิกาที่ได้จะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าซิลิกาที่สังเคราะห์จากแกลบดิบมาก

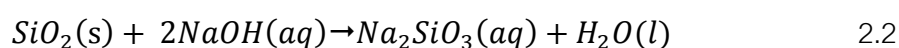
หลังจากผ่านขั้นตอนการล้างเพื่อกำจัดพวก Alkali oxide ให้ออกไปจากแกลบแล้ว นำแกลบไปอบแห้งและเผา โดยอุณหภูมิในการเผาและเวลาในการเผาจะส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วย เมื่อผ่านกระบวนการเผาแล้วก็จะได้ผงซิลิกาสีขาวที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก [8]

## 2.4 การสกัดซิลิกาจากแกลบ

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นผลึกไม่มีสีหรือเป็นของแข็งสีขาวมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2 – 2.6 จุดหลอมเหลวประมาณ 1710 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก ไม่ละลายในกรด ยกเว้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ดังสมการ



และละลายในสารละลายต่างได้เป็นสารละลายซิลิเกต (Silicate) ดังสมการ

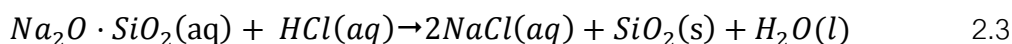


ซิลิกาที่พบในแกลบมี 2 รูปแบบ คือ

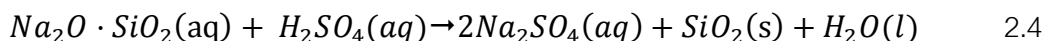
1. ซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amorphous) ได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเนื่องจากมีพื้นที่ผิวของกลุ่มไฮดรอกซิลซิลินอล (Hydroxyl silanol group,  $\text{SiH}_3\text{OH}$ ) คงอยู่เมื่อให้ความร้อนถึง 400 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบไม่เป็นระเบียบ
2. ซิลิกาแบบผลึก (Crystalline) ค่อนข้างอยู่ตัวและเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาและอุณหภูมิในการเผา แต่ที่อุณหภูมิสูงซิลิกาจะเปลี่ยนรูปจากแบบอสัณฐานเป็นผลึกของควอตซ์ (Quartz) คริสโตบาไลต์ (Christobalite) และทรินไดม์ (Tridymite) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งโดยทั่วไปไม่ทำปฏิกิริยากับกรด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งสามารถทำให้ซิลิกาแตกตัวเป็นฟลูออโรซิลิเกต (Fluorosilicate,  $\text{SiF}_4$ )

### การสกัดซิลิกาจากแกลบ

ซิลิกาสามารถผลิตได้จากการต้มสกัดแกลบ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$  หรือ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และการตกตะกอนให้เป็นซิลิกา โดยการปรับ pH ของสารละลายให้ได้น้อยกว่า 10 ซึ่งสามารถใช้กรดไฮโดรคลอริกเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ



หรืออาจจะใช้กรดชนิดอื่น ๆ ในการตกตะกอน เช่น กรดซัลฟูริก ตามสมการ



ซิลิกาหรือซิลิกาเจลที่สกัดได้จากเถ้าแกลบสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต คือ

1. อะควาเจล (Aquagel) โดยรูพรุนของซิลิกาจะเต็มไปด้วยน้ำ
2. เซโรเจล (Xerogel) น้ำที่อยู่ในรูพรุนจะถูกกำจัดโดยการระเหย
3. แอโรเจล (Aerogel) ตัวทำละลายที่อยู่ในรูพรุนของซิลิกาจะถูกกำจัดออกโดยวิธีการสกัดแบบซูเปอร์คริติคัล (Supercritical extraction)

เนื่องจากคุณสมบัติของปริมาณรูพรุนที่มากของซิลิกาเจล จึงทำให้ซิลิกาเจลเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในการเป็นตัวรองรับสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวดูดซับ หรือวัสดุสำหรับบรรจุในคอลัมน์โครมาโตกราฟี แต่อย่างไรก็ตามสิ่งเจือปนที่พบในซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเถ้าแกลบเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการนำซิลิกาชนิดไปใช้งาน เนื่องจากสิ่งเจือปนดังกล่าวมีผลต่อปฏิกิริยาและมีผลต่อการดูดซับของซิลิกา [9]

### ขั้นตอนการสกัดซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเถ้าแกลบ

ในการสกัดซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเถ้าแกลบสามารถสรุปขั้นตอนได้ 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการปรับสภาพเถ้าแกลบ การต้มสกัดซิลิกา และการตกตะกอนซิลิกา โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. การปรับสภาพของเถ้าแกลบ

การปรับสภาพของเถ้าแกลบโดยการล้างด้วยสารละลายกรดมีความจำเป็นต่อคุณภาพของซิลิกาที่ได้ โดยกรดจะทำหน้าที่ในการกำจัดแร่ธาตุและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกจากเถ้าแกลบ

โดยทั่วไปจะแช่แก้วแกลบในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นสูง เช่น กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นต้น สภาวะเหล่านี้สามารถละลายสิ่งเจือปนในแก้วออกมาได้ดี

## 2. การต้มสกัดซิลิกา

หลังจากการปรับสภาพแก้วแกลบแล้ว ต้องทำการล้างแก้วแกลบด้วยน้ำจนกระทั่งน้ำล้างมีสภาพเป็นกลางแล้วจึงนำมาต้มกับสารละลายต่าง สารละลายต่างที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ การต้มสกัด จะสามารถผลิตซิลิกาได้ประมาณร้อยละ 91 การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถเพิ่มสัดส่วนการผลิตได้มากนัก ถ้าใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.1 โมลาร์ จะไม่สามารถสกัดซิลิกาจากแก้วแกลบได้ อุณหภูมิสำหรับการต้มสกัดอยู่ที่ประมาณ 80 - 95 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองแก้วออกด้วยกระดาษกรองและล้างแก้วที่เหลือด้วยน้ำร้อน และปล่อยให้สารละลายให้เย็น การเพิ่มระยะเวลาของการต้มสกัดให้ยาวนานขึ้นไม่ช่วยเพิ่มปริมาณของซิลิกาได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

## 3. การตกตะกอนซิลิกา

การตกตะกอนของซิลิกานั้น ขึ้นกับ การปรับสภาพ pH ของสารละลายที่สกัดได้ หรือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต การเติมกรดหรือสารละลายอื่น ๆ ลงในสารละลายโซเดียมซิลิเกตจนมี pH ต่ำกว่า 10 ซิลิกาในสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะก่อตัวเป็นคอลลอยด์และตกตะกอนออกมาในที่สุด โดยสามารถแบ่งวิธีการตกตะกอนได้ 2 วิธี ดังนี้

### 3.1 การตกตะกอนด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการนี้จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตได้เป็นซิลิกาออกมา โดยการอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันไม่เกิน 1.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ปัจจัยที่ต้องควบคุมเพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีคุณภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตซึ่งนิยมควบคุมให้อยู่ในช่วง 4.5 - 6.5 เปอร์เซ็นต์ หากสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีความเข้มข้นสูงเกินไปจะทำให้การตกตะกอนเกิดขึ้นได้ยาก

### 3.2 การตกตะกอนด้วยกรด

การตกตะกอนด้วยกรดเป็นวิธีที่นิยมใช้ทั่วไป กรดที่นิยมใช้ คือ กรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 1 M โดยไทเทรตกับสารละลายไซเดียมซิลิเกตที่สกัดได้ และเมื่อ pH ของสารละลายไซเดียมซิลิเกตมีค่าต่ำกว่า 10 แล้วซิลิกาจะเริ่มมีการตกตะกอนออกมาเป็นชั้นเจล และเมื่อตกตะกอนซิลิกาตาม pH ที่ต้องการแล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 18 ชั่วโมงเพื่อให้ชั้นเจลเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ จากนั้นจึงล้างเจลด้วยน้ำกลั่นและแยกเจลออกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อกำจัดไอออนที่ตกค้าง และนำเจลไปอบให้แห้งจะเป็นซิลิกาแบบซีโรเจล (Xerogel) และหากนำซิลิกานี้มาล้างน้ำแล้วนำไปอบแห้งอีกครั้ง จะได้เป็นซิลิกาบริสุทธิ์แบบอสัณฐาน (Amorphous)

### 2.5 การดูดซับ

กระบวนการดูดซับ คือ กระบวนการแยกมวลสารซึ่งอาจอยู่ในรูปของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ทั้งในสถานะก๊าซและของเหลวที่มีอยู่ในสารละลายหรือก๊าซให้เกาะอยู่บนผิวของของแข็ง โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จะอยู่บนผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยสารถูกดูดซับจะถูกดูดติดกับผิวของของแข็งที่เป็นสารดูดซับด้วยแรงที่มีลักษณะเดียวกันกับที่ทำให้เกิดการควบแน่น กระบวนการดูดซับจึงเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) โดยอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับอาจเป็นแรงที่ไม่เฉพาะเจาะจง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงที่มีลักษณะเจาะจงซึ่งเป็นแรงที่อยู่ในรูปของพันธะเคมี ในกระบวนการดูดซับส่วนใหญ่จะมีของแข็งเป็นส่วนประกอบ

ในกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวสัมผัส (Interface) ซึ่งอาจเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับก๊าซ ของแข็งกับก๊าซ ของแข็งกับของเหลว หรือของเหลวกับของเหลวก็ได้ ดังนั้นคุณสมบัติที่สำคัญของการดูดซับ คือ ความเป็นรูพรุนของตัวดูดซับ เพื่อที่จะสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน ซึ่งคุณสมบัติอื่นๆก็สามารถส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วย เช่น การจัดเรียงตัวของสาร โครงสร้าง ขนาด และความสม่ำเสมอ เป็นต้น ในการเลือกสารที่เหมาะสมในการดูดซับจะทำให้สามารถแยกโมเลกุลบางชนิดออกจากของผสมและติดอยู่กับตัวดูดซับนั้นได้ เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล อาจสามารถนำตัวถูกดูดซับที่ใช้งานแล้วมาไล่สารที่ถูกดูดไว้

ออกมา โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ การเปลี่ยนความดัน เป็นต้น ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [10]

### 2.5.1 พฤติกรรมการดูดซับของสาร

พฤติกรรมการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างสารดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี ดังนี้

#### 2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption) คือ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกัน แรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่

1. แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ
2. แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ
3. แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิต่ำ หรืออุณหภูมิมรรยาอากาศทั่วไป และสามารถเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิมรรยาอากาศ

#### 2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้นการดูดซับประเภทนี้จึงมักเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูงๆ และจะเกิดเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

## 2.5.2 ประเภทของตัวดูดซับ

ประเภทของตัวดูดซับชนิดต่างๆจะมีลักษณะประจำตัวทางธรรมชาติทางเคมี ปริมาณของพื้นที่ผิว ลักษณะการกระจายของรูพรุน และขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน โดยจะสามารถแบ่งเป็นตัวดูดซับประเภทต่างๆดังนี้

### 2.5.2.1 คาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon)

คาร์บอนกัมมันต์ สามารถเตรียมได้จากวัตถุดิบหลายชนิด เช่น ถ่านหิน ไม้ ชี้อเลื่อย เป็นต้น โดยจะผลิตโดยการให้ความร้อนไล่สารระเหยได้ออกจากถ่านให้เหลือเพียงองค์ประกอบของคาร์บอน เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่คาร์บอน จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยสารละลายเคมีที่เหมาะสม โดยการพ่นไอน้ำ อากาศ หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซเหล่านั้นจะเข้ากัดกร่อนคาร์บอนและเพิ่มโครงสร้างของรูพรุนขึ้น

### 2.5.2.2 อลูมินากัมมันต์ (Activated Alumina)

อลูมินากัมมันต์ผลิตได้จากการเผาสารอลูมินาออกไซด์ที่มีผลึกน้ำ (Hydrated Alumina) การระเหยน้ำจากการเผาทำให้เกิดการแตกของโครงสร้างภายใน ซึ่งช่วยให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น อลูมินากัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับของเหลว ไอ หรือ ก๊าซ แต่จะใช้มากในการลดความชื้นของก๊าซ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะความดันสูง และใช้เป็นตัวรองรับในปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.5.2.3 ซิลิกาเจล (Silica Gel)

ซิลิกาเจลเป็นตัวดูดซับที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการสะเทิน จากการผสมกรดลงในสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) แล้วนำไปอบแห้ง โดยพื้นที่ผิวเฉลี่ยอยู่ 600-800 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเฉลี่ยอยู่ที่ 20-50 อังสตรอม ซึ่งซิลิกาเจลส่วนใหญ่ถูกใช้เพื่อลดความชื้นในแก๊สหรือของเหลว ซิลิกาเจลสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าผงคาร์บอนกัมมันต์ และอลูมินากัมมันต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่มีความดันปานกลาง

#### 2.5.2.4 โมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular Sieves)

โมเลกุลาร์ซีฟ เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรม มีโครงสร้างภายในไม่สม่ำเสมอ แต่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นผลึกแบบมีแบบแผนแน่นอน โดยโมเลกุลาร์ซีฟเป็นสารประกอบจำพวกออลูมิโนซิลิเกต ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแร่ธรรมชาติ ได้แก่ ซีโอไลท์ (Zeolites) เป็นต้น ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์อยู่ในช่วง 3 – 10 อังสตรอม ซีโอไลต์นิยมใช้ดูดความชื้น และแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

#### 2.5.2.5 ตัวดูดซับพาดิชย์

ตัวดูดซับพาดิชย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม สามารถใช้ธาตุองค์ประกอบหลักของตัวดูดซับแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. ตัวดูดซับอนินทรีย์ คือ ตัวดูดซับที่มีธาตุกลุ่มโลหะชนิดต่างๆ เป็นองค์ประกอบหลัก โดยสามารถแบ่งย่อยได้ออกเป็น 2 ชนิด คือ ตัวดูดซับอินทรีย์ธรรมชาติ และ ตัวดูดซับอินทรีย์สังเคราะห์
2. ถ่านดูดซับ คือ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากวัสดุสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ โดยสามารถจำแนกย่อยตามขนาดปากโพรงของเม็ดถ่านดูดซับออกเป็น ถ่านดูดซับทั่วไป ซึ่งจะมีขนาดโพรงใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร และถ่านดูดซับคัดโมเลกุล ซึ่งจะมีขนาดโพรงเล็กกว่า 1 นาโนเมตร

### 2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 2.5.3.1 ลักษณะของตัวดูดซับ

คุณสมบัติของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ ประกอบด้วย พื้นที่ผิวสัมผัสและโครงสร้างของรูพรุน โดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นถ้าพื้นที่ผิวสัมผัสการดูดซับมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการคำนึงถึงพื้นที่ผิวสัมผัสอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพ โครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับก็มีส่วนช่วยในการดูดซับ เพราะถ้าหากขนาดของโมเลกุลไม่สามารถถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้ ประสิทธิภาพของการดูดซับก็จะต่ำลง



### 2.5.3.2 ลักษณะของตัวดูดซับ

คุณสมบัติของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความสามารถในการละลาย ความมีขี้ของโมเลกุล น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล

### 2.5.3.3 อุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มอัตราเร็วของการดูดซับ และเนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

### 2.5.3.4 เวลา

เวลาเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะต่อนานเพียงพอที่จะทำให้ตัวดูดซับทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ

## 2.5.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงถึงความสัมพันธ์ของการดูดซับกับเวลา โดยปกติแล้ว อัตราเร็วของการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงระยะเริ่มต้นของการดูดซับ และอัตราเร็วจะลดลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ สมการที่นิยมใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ได้แก่ จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 (First order kinetic) จลนพลศาสตร์อันดับที่ 1 เสมือน (Pseudo first order kinetic) และจลนพลศาสตร์อันดับที่ 2 เสมือน (Pseudo second order kinetic)

จลนพลศาสตร์อันดับ 1 มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.5 และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $1/q_t$  และ  $1/t$  ได้ตามสมการที่ 2.6

$$q_t = \frac{q_e k_1 t}{1 + k_1 t} \quad 2.5$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{k_1}{q_e} \frac{1}{t} + \frac{1}{q_e} \quad 2.6$$

เมื่อ  $q_t$  และ  $q_e$  คือ ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ และปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุลตามลำดับ  $k_1$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ และ  $t$  คือระยะเวลาของการดูดซับ

จลนพลศาสตร์อันดับ 1 เสมือน มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.7 และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  และ  $\ln(q_e)$  ได้ตามสมการที่ 2.8

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad 2.7$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad 2.8$$

จลนพลศาสตร์อันดับ 2 เสมือน มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.9 และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $\frac{t}{q_t}$  และ  $t$  ได้ตามสมการที่ 2.10

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad 2.9$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad 2.10$$

เมื่อ  $k_2$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

## 2.5.5 แบบจำลองสมดุลดูดซับ

### 2.5.5.1 แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี

เมื่อระบบดูดซับของเหลวที่มีสารดูดซับน้อยๆ ประมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะแปรผันเป็นสัดส่วนความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับในของเหลว แบบจำลองสมดุลดูดซับของระบบดูดซับของเหลวนี้จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง

$$q = K_H C \quad 2.11$$

โดยที่  $K_H$  คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของเฮนรี

ค่าคงที่สมดุลดูดซับของเฮนรี ( $K_H$ ) ของระบบ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดลักษณะเฉพาะของระบบสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลว

### 2.5.5.2 แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงมัวร์

เมื่อปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะของระบบดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวมีลักษณะโค้งคว่ำ แบบจำลองสมดุลดูดซับจึงมีลักษณะเดียวกับแบบจำลองสมดุลดูดซับดังนี้

$$q = \frac{q_{\max} K_L C}{1 + K_L C} \quad 2.12$$

โดยที่  $K_L$  คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงเมียร์

$q_{\max}$  คือ ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสูงสุด

พารามิเตอร์ที่สำคัญของแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงมัวร์สำหรับระบบดูดซับสารถูกดูดซับในระบบของเหลว โดยประกอบด้วยปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับสูงสุด ( $q_{\max}$ ) และค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงมัวร์ ( $K_L$ ) โดยสามารถคำนวณจากจุดตัดแกนตั้งและความชันของความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างส่วนกลับของปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $1/q$ ) กับส่วนกลับของความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับ ( $1/C$ ) ดังสมการ

$$\frac{1}{q} = \left( \frac{1}{q_{\max} K_L} \right) \frac{1}{C} + \frac{1}{q_{\max}} \quad 2.13$$

### 2.5.5.3 แบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช

เมื่อความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับในของเหลวเพิ่มมากขึ้น ความสัมพันธ์ของปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับนั้นกับความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับในของเหลวดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง แม้ว่าเส้นโค้งสมดุลของระบบดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวดังกล่าวส่วนใหญ่มีลักษณะโค้งคว่ำ แบบจำลองสมดุลดูดซับของเหลวของฟรุนดลิช เป็นแบบจำลองเส้นโค้งสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวที่สามารถนำไปใช้ประยุกต์ใช้กับสมดุลดูดซับในของเหลวที่มีลักษณะโค้งคว่ำหรือลักษณะโค้งหงายดังนี้

$$q = K_F C^n \quad 2.14$$

โดยที่  $K_F$  คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของฟรอนดลิตซ์

$n$  คือ ดัชนีชี้กำลัง สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรอนดลิตซ์

ค่าคงที่สมดุลดูดซับของเหลวของฟรอนดลิตซ์ ( $K_F$ ) และดัชนียกกำลัง ( $n$ ) สามารถคำนวณจากจุดตัดแกนตั้งและความชันของความสัมพันธ์เส้นตรงของสมการเชิงเส้นระหว่าง  $\ln q$  กับ  $\ln C$  ดังนี้

$$\ln q = n \ln C + \ln K_F \quad 2.15$$

## 2.5.6 การคายกลับ

การคายกลับ (Desorption) หรือการคืนสภาพของตัวดูดซับที่ใช้แล้ว (Regeneration) มีวัตถุประสงค์คือเพื่อรักษาสมรรถภาพของการดูดซับของสารดูดซับที่เสื่อมไป หรือให้สารถูกดูดซับในสารดูดซับกลับคืนมา

การคายกลับนั้นต้องพิจารณาว่าเป็นการดูดซับแบบกายภาพ หรือทางเคมี เพราะการดูดซับทางกายภาพสามารถย้อนกลับได้ ส่วนทางเคมีจะต้องมีกระบวนการต่างๆ ที่ยุ่งยากกว่า การคายกลับทำได้ไม่สมบูรณ์นัก การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้นั้นต้องพิจารณาถึงค่าการดูดซับที่ผิวตัวดูดซับเดิมที่นำมาดูดซับตัวถูกดูดซับใหม่ ตัวดูดซับที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่จะมีความจุในการดูดซับเท่ากับที่ตอนเริ่มต้นหรือไม่ กรณีตัวถูกดูดซับเป็นสารที่ต้องการจึงควรพิจารณาถึงว่าจะนำตัวถูกดูดซับกลับออกมาจากตัวดูดซับได้มากน้อยเพียงใด กระบวนการคายกลับหรือการรีเจนเนอเรทมีตัวต้องพิจารณาคือระยะเวลาในการคายกลับจะต้องสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ และถ้าจำเป็นต้องทำให้มีการดูดซับและนำสารดูดซับแยกกลับเพื่อเวียนใช้ใหม่อย่างต่อเนื่องแล้ว ต้องติดตั้งระบบรีเจนเนอเรทหลายระบบ [11]

วิธีการปฏิบัติสำหรับการคายกลับตัวดูดซับที่ใช้แล้วมีดังนี้

- การเพิ่มอุณหภูมิ
- การลดความดันย่อย
- การลดความเข้มข้น
- การไล่ด้วยของไหลเฉื่อย

- การแทนที่ด้วยสารที่ดูดซับในตัวดูดซับนั้นได้ดีกว่า
- การเปลี่ยนเงื่อนไขทางเคมีเช่นความเป็นกรดต่าง

## 2.6 การตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนโดยวิธีบีอีที (Brauauer-Emmett-Teller Method, BET) [12-13]

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface Area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 2.2 เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (BET)

โดยปกติการวัดพื้นที่ผิวโดยวิธีบีอีที (Brauauer-Emmett-Teller Method) จะอาศัยการวัดปริมาณแก๊สที่พื้นผิวดูดซับเอาไว้ แก๊สที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือแก๊สไนโตรเจน โดยจะวัดที่อุณหภูมิจุดเดือดของแก๊สไนโตรเจน (ประมาณ  $-196$  องศาเซลเซียส) สิ่งสำคัญก่อนที่จะวัดคือต้องไล่แก๊สที่ไม่ใช่แก๊สไนโตรเจนและแก๊สที่มีจุดเดือดสูงกว่าแก๊สไนโตรเจน (เช่นออกซิเจนและน้ำ) ออกจากพื้นผิวให้หมดเสียก่อน จากนั้นจึงดูดซับแก๊สไนโตรเจน แล้ววัดว่าพื้นผิวดูดซับแก๊สไนโตรเจน โดยอาจคำนวณปริมาณแก๊สที่หายไปตอนที่ป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปหรือจากปริมาณแก๊สที่คายออกมาตอนที่ไล่แก๊สออกด้วยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง

## 2.7 การหาชนิดและปริมาณในสารตัวอย่างโดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ สามารถใช้ได้กับงานวิจัยในหลายๆ ด้าน เช่น วัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อม ทางการแพทย์ รวมถึงตัวอย่างจากอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น การวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะอาศัยหลักการเรืองรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง โดยยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่างๆที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย (Fluorescence) ออกมานั้นจะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้นๆ ทำให้เราสามารถแยกได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้น มีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยวัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง [14]



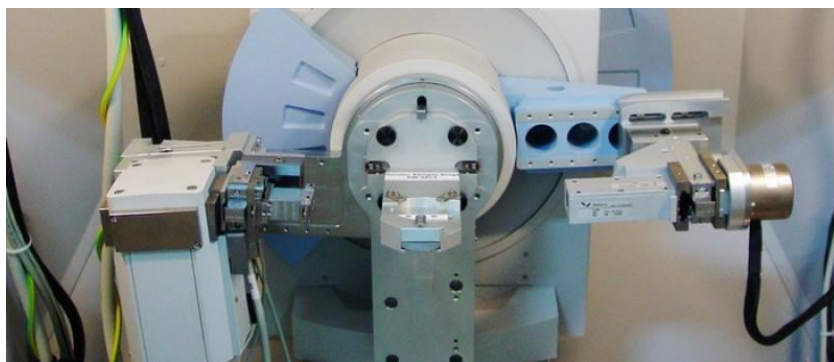
รูปที่ 2.3 เครื่อง X-ray Fluorescence

ข้อดีของเครื่อง XRF เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ก็คือ เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (ยกเว้นกรณีที่ต้องบดตัวอย่างเพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ด) และให้ผลการทดสอบที่รวดเร็ว และไม่จำเป็นต้องใช้สารมาตรฐาน ในการทดสอบเครื่อง XRF แม้ว่าจะสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในหลายรูปแบบ แต่ตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดคือ ตัวอย่างที่อยู่ในรูปของแข็งและสามารถทนต่อสภาพความดันต่ำกว่าบรรยากาศได้ ดังนั้นในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงต้องทำการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด โดยต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร (ด้านกว้าง - ยาว หรือ เส้นผ่าศูนย์กลาง) และต้องมีขนาดไม่เกิน 15 เซนติเมตร หนาไม่เกิน 7.5 เซนติเมตร (สำหรับตัวอย่างที่เป็นทรงกระบอก) ในกรณีที่ตัวอย่าง

อยู่ในรูปของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบ ต้องขัด หรือ ทำให้เรียบ ส่วนในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของเหลว แล้วต้องการทดสอบด้วยเครื่อง XRF ควรทำให้ตัวอย่างนั้น มีความหนืดมากขึ้นโดยการระเหยน้ำก่อนทำการทดสอบ

## 2.8 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง วิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย [15]

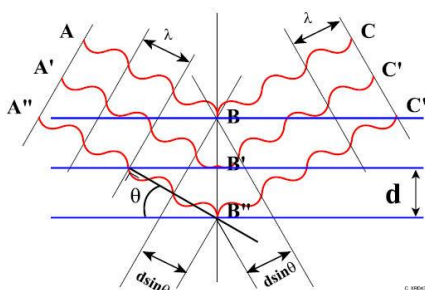


รูปที่ 2.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law ดังสมการที่ 2.16

$$2d \sin\Theta = n\lambda \quad 2.16$$

ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะ ได้รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆของการทดสอบ



รูปที่ 2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นโดยผลึก ตามหลักการของ Bragg's law

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือองค์ประกอบตัวอย่างที่เป็นไม่เป็นผลึก(Amorphous)ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่ไม่เป็นผลึกในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนเท่าใดก็เปอร์เซ็นต์ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็งหรือตัวอย่างที่เป็นผงได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 เมช หรือประมาณ 40 ไมครอน (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้งจะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อนต้องมีขนาดกว้างยาวไม่เกิน 10 เซนติเมตร ทั้งนี้พื้นที่ที่จะทำการทดสอบจะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆประมาณ 10 มิลลิเมตร เท่านั้น กรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณน้อยมากอาจทำการทดสอบได้โดยทางห้องปฏิบัติการจะใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ ในกรณีที่ต้องการทดสอบ ThinFilm เพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์ม ความหนาของฟิล์มที่เตรียมต้องอยู่ระหว่าง 10 – 100 นาโนเมตร ต่ำกว่า 10 นาโนเมตร ผลการทดสอบจะมีความคลาดเคลื่อน(Error)สูงมาก และหากหนาเกิน 100 นาโนเมตร จะไม่สามารถคำนวณความหนาได้



## 2.9 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โมเลกุลของสารด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ และ อินทรีย์ ที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสงซึ่งโดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุลซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกันโดยช่วงความยาวคลื่น 1500-4000 จะเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันนัลของโมเลกุล เช่น -OH, C=O, N-H, CH<sub>3</sub> เป็นต้น แต่ในช่วงความยาวคลื่นจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัวแต่เนื่องจากมีพีคเกิดค่อนข้างเยอะ ดังนั้นการวิเคราะห์สเปกตรัมช่วงนี้ ค่อนข้างยาก การทำปริมาณวิเคราะห์ นิยมใช้เทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว [16]



รูปที่ 2.6 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) [17]

เทคนิคสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ ด้านวัสดุศาสตร์ เช่น พอลิเมอร์ ช่วยในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ และในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างถูกรวมไปถึงชนิดของตัวอย่างสามารถวิเคราะห์ได้เกือบทุกชนิด

## 2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นางสาวศุภรัตน์ ก๊กเครือ [18] ได้ศึกษาการเตรียมแผ่นสารดูดความชื้นจากซิลิกาเจลผง ขนาด 0.6 นาโนเมตร และวัดพื้นที่ผิวได้เท่ากับ 344.72 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งแผ่นซิลิกาเจล มีความสามารถในการดูดความชื้น 15.07 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของ การทดสอบอายุการใช้งาน ทำการทดสอบ เมื่อซิลิกาเจลผ่านการดูดและคายความชื้น 90 รอบทดสอบ พบว่าความสามารถ ในการดูดความชื้น และสมบัติทางกายภาพ ซึ่งได้แก่ ขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลงเพียง เล็กน้อย

ศรีไฉล ชุนทน และคณะ [19] ได้ศึกษาประโยชน์ของซีแกลบต่อการผลิตซิลิกาเจลดูด ความชื้น พบว่าซิลิกาที่ได้จากการจากการทดลองเป็นซิลิกาประเภทอสัณฐาน (Amorphous Silica) มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 ตารางเมตรต่อกรัม ทำโดยการแปรรูปของซิลิกาในซีแกลบ ให้เป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต นำซีแกลบไปบดละเอียดรีฟลักซ์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ซิลิกาประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของซีแกลบ โดยได้เปรียบเทียบวิธีการล้างแกลบข้าวด้วยกรดแล้วนำไปเผา พบว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ ออสัณฐานที่มีความบริสุทธิ์และพื้นที่ผิวสูงกว่า

Dongmin An และคณะ [20] ได้ศึกษาการผลิตผงซิลิกาและถ่านคาร์บอนกัมมันต์ จากแกลบ โดยนำเปลือกข้าวหรือแกลบมาชะล้างด้วยกรด เพื่อชะล้างเอาส่วนประกอบที่ไม่ ต้องการออกไป แล้วจึงนำไปต้มด้วยสารละลายด่าง  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ที่ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก ในอัตราส่วน 6 ต่อ 1 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อชะล้างซิลิกาออกมา และได้นำไปกรองเพื่อนำเอาไปสังเคราะห์เป็นซิลิกาต่อไป โดยสามารถชะล้างซิลิกาออกมาได้ 84.57 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักจากแกลบ ส่วนกากที่เหลือจากการกรองโดยจะถูกนำไปใช้เตรียมเป็นถ่านกัมมันต์

สุภาพ ศิปปคัมภีรภาพ และ สุพจน์ อ้วนเจริญกุล [21] ได้ศึกษาการเตรียมและตรวจสอบ คุณภาพของ ซิลิกาเจลที่ได้จากแกลบ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากแกลบเมื่อ เเผาในภาชนะเปิด ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ในที่มีแก๊สออกซิเจน จนกระทั่งหมดควัน แล้วเผาที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส จะได้แกลบสีขาว ซึ่งพบว่าซิลิกาสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์

และนำแคลบสีขาวที่ได้มาเตรียมเป็นสารละลายไฮเดียมซิลิเกตให้มี เปอร์เซ็นต์  $\text{SiO}_2$  สูงสุด โดยใช้ อัตราส่วนไฮเดียมไฮดรอกไซด์ต่อ แคลบเป็น 7 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก การเตรียมซิลิกาเจล โดยใช้กรด ซัลฟิวริกกรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก

สันติ รัตนวีรนนท์ [22] ได้ทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตซิลิกาจากแคลบ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแคลบ คือ การเผาแคลบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็น ระยะเวลา 2 ชั่วโมง และยังพบอีกว่าการแช่กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตซิลิกาบริสุทธิ์ เนื่องจากสามารถทำให้สารไฮโดรคาร์บอน สลายตัวได้หมดเมื่อนำไปเผา

Kyle E. Berry, Michael R. Ladisch [23] ได้ศึกษาการดูดซับน้ำจากของผสมเอทานอล และน้ำ ในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ตัวดูดซับ Starch-Based ได้แก่ แป้งข้าวโพด ซิลิกาเจล โมเลกุลาร์ซีฟ สามารถทำการขจัดน้ำในสถานะของเหลวระหว่าง 1-20 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักเอทานอล โดยไม่มีตัวดูดซับละลายอยู่ จะพบว่าน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซับต่อกรัมของ ตัวดูดซับแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น และพบว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับน้ำด้วยการเกิด ระหว่างพันธะไฮโดรเจนกับพันธะ ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบ

##### 3.1.1 การเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบและเถ้าดำ

3.1.1.1 ชั่งแกลบ 30 กรัมใส่ซามระเหย นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.1.1.2 ชั่งเถ้าขาว 25 กรัม ใส่ปีกเกอร์แบบพลาสติกขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณ 250 มิลลิลิตร และนำไปปั่นปวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.1.3 กรองสารละลายด้วยชุดเครื่องกรองสุญญากาศ และล้างเถ้าที่เหลือบนกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นปริมาณ 250 มิลลิลิตร

3.1.1.4 ปรับ pH ของสารละลายด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ จนกระทั่ง pH 7 และปล่อยให้เกิดเป็นเจลนาน 24 ชั่วโมง

3.1.1.5 เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนบดให้เจลแตกตัว น้ำไปกรองด้วยชุดกรองสุญญากาศ และล้างเจลด้วยน้ำกลั่นอีก 100 มิลลิลิตร

3.1.1.6 นำเจลไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.1.1.7 บดซิลิกาที่ผ่านการอบแห้ง และนำไปคัดขนาด

3.1.1.8 นำซิลิกาที่ผ่านการคัดขนาดไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3.1.1.9 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3.1.1.1 ถึง 3.1.1.8 โดยเปลี่ยนจากแกลบ เป็นแกลบที่ผ่านการจำลองการเผาเป็นเถ้าดำมาแล้ว

### 3.1.2 การเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบและเถ้าดำที่ผ่านการแช่กรด

3.1.2.1 ชั่งแกลบ 100 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร ปริมาณ 750 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ที่มีแกลบ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.1.2.2 ล้างแกลบที่ผ่านการต้มด้วยน้ำกลั่น และวัดค่า pH ด้วยกระดาษลิตมัส จนกระทั่งแกลบที่ผ่านการต้มมี pH = 7

3.1.2.3 นำแกลบไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.1.2.4 ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3.1.1.1 ถึง 3.1.1.9

### 3.1.3 การทดลองดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอล

3.1.3.1 นำผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบมาซึ่งในอัตราส่วนตัวดูดซับผงซิลิกาเจลต่อเอทานอลเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยใช้ผงซิลิกาเจนน้ำหนัก 2 กรัม ในสารละลายเอทานอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

3.1.3.2 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำตัวอย่างที่ได้ไปปั่นตกตะกอน เป็นเวลา 10 นาที

3.1.3.3 ชั่งน้ำหนักสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอล และผงซิลิกาเจลหลังการดูดซับ

3.1.3.4 ตรวจวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยวิธีการวัดความหนาแน่น เพื่อหาค่าความเข้มข้นของของผสมน้ำที่ปนในเอทานอลหลังการดูดซับ และวัดและบันทึกอุณหภูมิ

3.1.2.5 ทดลองซ้ำดังข้อที่ 3.1.2.1 ถึง 3.1.2.4 โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนดูดซับผงซิลิกาเจลต่อเอทานอลอยู่ระหว่าง 10 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

### 3.1.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ค่าความสามารถดูดซับจำเพาะที่สภาวะสมดุล และแบบจำลองสมดุลดูดซับที่เหมาะสม

3.1.4.1 นำข้อมูลความเข้มข้นหลังจากการดูดซับ คำนวณค่าความสามารถดูดซับที่เวลาใด ๆ

3.1.4.2 ทดสอบข้อมูลที่ได้ด้วยแบบจำลองจลศาสตร์การดูดซับ เพื่อคำนวณความเข้มข้นที่สมดุลและค่าความสามารถดูดซับที่สมดุล

3.1.4.3 นำข้อมูลความเข้มข้นที่สมดุล และค่าความสามารถดูดซับที่สมดุลไปสร้างแบบจำลองสมดุลดูดซับ

## 3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

3.2.1 การตรวจวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนโดยวิธีบีอีที (Brauauer-Emmett-Teller Method, BET)

3.2.2 การหาชนิดและปริมาณในสารตัวอย่างโดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF)

3.2.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

3.2.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โมเลกุลของสารด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)

## 3.3 ทดสอบการคืนสภาพตัวดูดซับของการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

3.3.1 นำผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่ผ่านการดูดซับแล้วนำมาคืนสภาพโดยการนำไปล้างน้ำและนำไปอบเพื่อไล่น้ำออกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2 นำผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่ผ่านการคืนสภาพแล้วมาทดสอบดูดซับในรอบที่ 2 เช่นเดียวกับการทดลองในขั้นตอนที่ 3.1.2

3.3.3 ทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 3.3.1 และ 3.3.2 เป็นจำนวน 20 รอบการทดลอง

3.3.4 นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นที่ได้หลังการดูดซับมาวิเคราะห์ผล

### 3.4 การดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาเจลพาณิชย์

#### 3.4.1 การเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาเจลพาณิชย์

3.4.1.1 นำผงซิลิกาเจลมาซึ่งน้ำหนักก่อนการนำไปอบไล่ความชื้นแล้วจึงนำไปอบไล่ความชื้นที่เตาอบอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.1.2 ชั่งน้ำหนักผงซิลิกาเจลที่ผ่านการอบไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบันทึกน้ำหนักที่ได้

#### 3.4.2 การทดลองดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอล

3.4.2.1 นำผงซิลิกาเจลพาณิชย์มาซึ่งในอัตราส่วนตัวดูดซับผงซิลิกาเจลต่อเอทานอลเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยใช้ผงซิลิกาเจLN้ำหนัก 2 กรัม ในสารละลายเอทานอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

3.4.2.2 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำตัวอย่างที่ได้ไปปั่นตกตะกอน เป็นเวลา 10 นาที

3.4.2.3 ชั่งน้ำหนักสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอล และผงซิลิกาเจลหลังการดูดซับ

3.4.2.4 ตรวจวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยวิธีการวัดความหนาแน่น เพื่อหาค่าความเข้มข้นของของผสมน้ำที่ปนในเอทานอลหลังการดูดซับ วัดและบันทึกอุณหภูมิ

3.4.2.5 ทดลองซ้ำ ดังข้อที่ 3.1.2.1 ถึง 3.1.2.4 โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนดูดซับผงซิลิกาเจลต่อเอทานอลอยู่ระหว่าง 10 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

### 3.4.3 นำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

## 3.5 การดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ และผงซิลิกาเจลพาณิชย์แบบต่อเนื่อง

3.5.1 นำผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์มาชั่งในอัตราส่วนตัวดูดซับผงซิลิกาเจลต่อเอทานอลเป็น 25 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยใช้ผงซิลิกาเจนน้ำหนัก 5.0 กรัม ในสารละลายเอทานอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

3.5.2 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำตัวอย่างที่ได้ไปปั่นตกตะกอน เป็นเวลา 10 นาที

3.5.3 ชั่งน้ำหนักสารละลายน้ำที่ปั่นในเอทานอล และผงซิลิกาเจลหลังการดูดซับ

3.5.4 ตรวจสอบวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ปั่นในเอทานอลด้วยวิธีการวัดความหนาแน่น เพื่อหาค่าความเข้มข้นของของผสมน้ำที่ปั่นในเอทานอลหลังการดูดซับ และวัดและบันทึกอุณหภูมิ

3.5.5 นำสารที่เหลือหลังการดูดซับมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำการทดลองครั้งต่อไป โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับเป็นปริมาณเท่าเดิมคือ 25 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

3.5.6 ทดลองซ้ำ ดังข้อที่ 3.5.1 ถึง 3.5.5 จนกว่าสารตั้งต้นจะไม่เพียงพอต่อการตรวจวัด



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบ

##### 4.1.1 การเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

การเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ โดยใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นแกลบดิบเริ่มต้นและเถ้าดำจากแกลบ โดยเถ้าดำเกิดจากการผ่านการจำลองในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิการเผาไหม้ปกติ แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แกลบดิบและแกลบที่ผ่านการจำลองการเผาที่อุณหภูมิปกติ (เถ้าดำ)

จากนั้นนำวัตถุดิบตั้งต้นทั้ง 2 มาผ่านกระบวนการ คือ การไม่แช่กรด และการแช่กรด ก่อนที่จะนำไปเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้เถ้าขาว แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เถ้าขาวที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อได้เถ้าขาวจะชั่งน้ำหนักมา 25 กรัม และนำไปให้ความร้อนกับสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากแคลบกลายเป็นสารละลายไฮเดียมซิลิเกต จากนั้นจึงนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง จะได้เถ้าไฮโดรคาร์บอนที่หลงเหลือติดอยู่บนกระดาษกรองแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจากการทดลองพบว่าการแช่กรดส่งผลต่อการขจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการออกไป ทำให้ได้เถ้าขาวที่มีซิลิกาที่บริสุทธิ์มากขึ้น โดยจะเห็นได้จากกระดาษกรองในภาพ ซึ่งเมื่อผ่านการแช่กรดจะทำให้มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลืออยู่บนกระดาษกรองน้อยมาก



รูปที่ 4.3 เถ้าที่เหลือจากการกรองบนกระดาษกรองที่ผ่านการอบ

แล้วจึงนำสารละลายไฮเดียมซิลิเกตมาตกตะกอนด้วยสารละลายกรดไนตริก จนกระทั่ง pH เท่ากับ 7 จะได้เป็นเจลเกิดขึ้น และทิ้งเจลไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้เป็นเจลอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะได้เป็นซิลิกาเจลแสดงดังรูปที่ 4.4



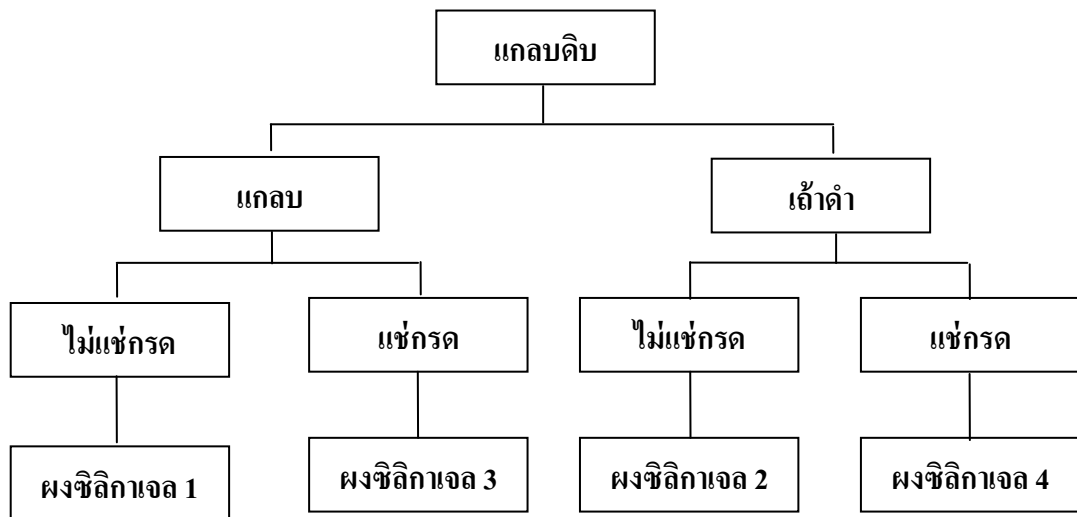
รูปที่ 4.4 ซิลิกาเจลที่ได้จากการตกตะกอนก่อนนำไปอบแห้ง

นำเจลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะเกิดเป็นเจลที่มีลักษณะแห้งเกิดขึ้น จากนั้นนำไปคั้ดขนาด และนำไปอบ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อขจัดสารระเหยออกไป ซึ่งจะทำให้ได้ผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบมา แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผงซิลิกาเจลที่ได้จากการสังเคราะห์จากแกลบและผ่านการคั้ดขนาด

จากการเตรียมตัวดูตลับผงชิลิกาเจลสังเคราะห์จากแก้วกลบ โดยใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่เป็น  
 แกลบบดเริ่มต้นและแก้วดำ และการเตรียมจากการไปนำแร่กรดและไม่แร่กรดแสดงแผนผังดัง  
 รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การเตรียมตัวดูตลับผงชิลิกาเจลสังเคราะห์จากแก้วโดยใช้  
 กระบวนการต่างๆ

การนำแก้วบดและแก้วดำที่มาจากกำลงนำแก้วบดไปเผาที่อุณหภูมิการเผาใหม่  
 ปกติ จากนั้นนำไปสังเคราะห์เป็นผงชิลิกาเจลจะได้เป็นซิลิกาเจล 1 และ ผงชิลิกาเจล 2 ส่วนการ  
 นำแก้วบดและแก้วดำไปผ่านการแร่กรดเพื่อขจัดสิ่งเจือปนบางชนิดออกไป จากนั้นนำไป  
 สังเคราะห์เป็นผงชิลิกาเจลจะได้เป็นผงชิลิกาเจล 3 และ ผงชิลิกาเจล 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการเตรียมตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบในวิธีต่างๆ

ชนิด	แกลบ (กรัม)	เถ้าดำ (กรัม)	แช่กรด (กรัม)	เถ้าขาว (กรัม)	ซิลิกาเจล (กรัม)	% Yield
ผงซิลิกาเจล 1	200	-	-	42.41	34.18	17.09 ± 0.94
ผงซิลิกาเจล 2	200	77.14	-	48.82	38.97	19.48 ± 0.91
ผงซิลิกาเจล 3	200	-	191.34	40.28	36.85	18.43 ± 0.92
ผงซิลิกาเจล 4	200	77.14	72.59	44.04	38.35	19.18 ± 0.89

การสังเคราะห์ผงซิลิกาเจลจากแกลบ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 แกลบที่ผ่านการเผาไหม้ให้เป็นเถ้าดำด้วยการจำลองอุณหภูมิการเผาไหม้ปกติ จากนั้นจึงนำมาเผาไหม้อีกรอบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจนเป็นเถ้าขาวก่อนนำมาสังเคราะห์เป็นซิลิกาเจลดังวิธีที่ผลิตผงซิลิกาเจล 2 จะส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสุทธิมากที่สุดคือที่ 19.48 เปอร์เซ็นต์ของแกลบดิบ การเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ไฮโดรคาร์บอนในแกลบหายไปจากการสลายตัวด้วยความร้อน และจากการทดสอบด้วยการนำมาแช่กรด ซึ่งพบว่าการนำแกลบดิบมาแช่กรดก่อนเพื่อขจัดสิ่งที่ไม่ต้องการบางอย่างออกไปด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร การแช่กรดทำให้สารไฮโดรคาร์บอนสลายตัวได้ดีขึ้นเมื่อนำไปเผาและสามารถละลายสิ่งที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ไปกับสารละลายกรด จึงสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ผลผลิตสุทธิจากที่ไม่ได้แช่กรดได้เพียง 17.09 เปอร์เซ็นต์ของแกลบดิบ มาเป็น 18.43 เปอร์เซ็นต์ของแกลบดิบ และจากการทดลองพบว่าการที่นำแกลบดิบมาเผาให้ความร้อนถึง 2 รอบ แล้วนำไปแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจะไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิตสุทธิที่เพิ่มขึ้นดังเช่นวิธีการผลิตผงซิลิกาเจล 4 ซึ่งส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสุทธิ ลดลงจากวิธีผลิตผงซิลิกาเจล 2 ที่ได้ 19.48 เปอร์เซ็นต์ของแกลบดิบ เหลือเพียง 19.18 เปอร์เซ็นต์ของแกลบดิบ เพราะเถ้าดำบางส่วนอาจหายไปกับการล้างสารละลายกรด

ตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของซิลิกาเจลจากเถ้าขาวในกระบวนการต่างๆ

ชนิด	เถ้าขาว (g)	ซิลิกาเจล (g)	% Yield
ซิลิกาเจล 1	42.41	34.18	80.59
ซิลิกาเจล 2	48.82	38.97	79.81
ซิลิกาเจล 3	40.28	36.85	91.49
ซิลิกาเจล 4	44.04	38.35	87.08

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของซิลิกาเจลที่ได้จากเถ้าขาว พบว่าซิลิกาเจลจากกระบวนการที่ 3 สามารถให้เปอร์เซ็นต์ผลได้จากการนำเถ้าขาวมาใช้ผลิตเป็นซิลิกาเจลมากที่สุด คือ 91.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเถ้าขาว จากการทดลองจะเห็นได้ว่า เถ้าขาวจากกระบวนการที่ 3 เป็นเถ้าขาวที่มีความบริสุทธิ์ของซิลิกามากที่สุด ไม่มีไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดหลงเหลืออยู่ ทำให้เมื่อผ่านกระบวนการจากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต และนำไปผ่านการกรอง พบว่ามีตะกอนที่หลงเหลือบนกระดาษกรองน้อยมากส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้สูงที่สุด และสะดวกและง่ายต่อการผลิตเป็นซิลิกาเจลมากที่สุด

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณลักษณะของผงซิลิกาเจลที่สังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์

##### 4.1.2.1 การตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนโดยวิธีบีอีที (Bruauer-Emmett-Teller Method, BET)

บีอีทีเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการหาพื้นที่ผิวของแข็งที่มีรูพรุนและมีขนาดเล็ก เนื่องจากของแข็งที่มีรูพรุนสามารถดูดซับ (Adsorb) แก๊สที่สามารถควบแน่นได้ในปริมาณมาก การหาการแจกแจงขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวที่เปิดสัมผัสกับอากาศจึงช่วยทำนายความสามารถในการดูดซับแก๊สต่างๆได้

#### ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนโดยวิธีบีอีที ของผงซิลิกาเจลที่สกัดจากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $m^2/g$ )	ปริมาตรรูพรุน (cc/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (A)
ผงซิลิกาเจล 1	200.25	0.7492	149.66
ผงซิลิกาเจล 2	225.86	0.8597	152.25
ผงซิลิกาเจล 3	200.08	0.8005	160.05
ผงซิลิกาเจล 4	222.4	0.8858	159.31
ผงซิลิกาเจลพาณิชย์	493.96	0.873	70.7

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของผงซิลิกาเจลที่สังเคราะห์จากแกลบในวิธีที่ 1 ถึง 4 ที่ตรวจวัดได้จากวิธีบีอีทีจะมีปริมาณน้อยกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของผงซิลิกาเจลพาณิชย์ และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยขนาดใหญ่กว่าผงซิลิกาเจลพาณิชย์ แต่ปริมาตรรูพรุนกลับมีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาตรรูพรุนของผงซิลิกาเจลพาณิชย์ ซึ่งในการดูดซับแก๊สความสำคัญของพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนอาจสำคัญกว่าในการดูดซับของเหลว

#### 4.1.2.2 การหาชนิดและปริมาณในสารตัวอย่างโดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF)

เอ็กซ์-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและสารแขวนลอยได้ โดยอาศัยหลักการที่เมื่อรังสี X (โฟตรอนที่มีพลังงานสูง) ไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (Fluoresced) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่างข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

#### ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบในรูปออกไซด์ของตัวดูดซับ โดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี ของผงซิลิกาเจลที่สกัดจากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์

สารประกอบ	ผงซิลิกาเจล 1	ผงซิลิกาเจล 2	ผงซิลิกาเจล 3	ผงซิลิกาเจล 4	ผงซิลิกาเจล พาณิชย์
Na <sub>2</sub> O	2.471	1.675	3.196	1.874	0.134
MgO	0.076	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	96.476	97.673	96.585	97.886	99.731
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.067	0.037	-	-	-
SO <sub>3</sub>	0.037	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	0.368	0.261	0.03	0.064	-
CaO	0.174	-	0.065	0.038	0.021
TiO <sub>2</sub>	-	0.115	-	-	0.03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.018	0.018	0.16	0.025	0.014
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	-	0.003
ZnO	-	0.006	-	-	-



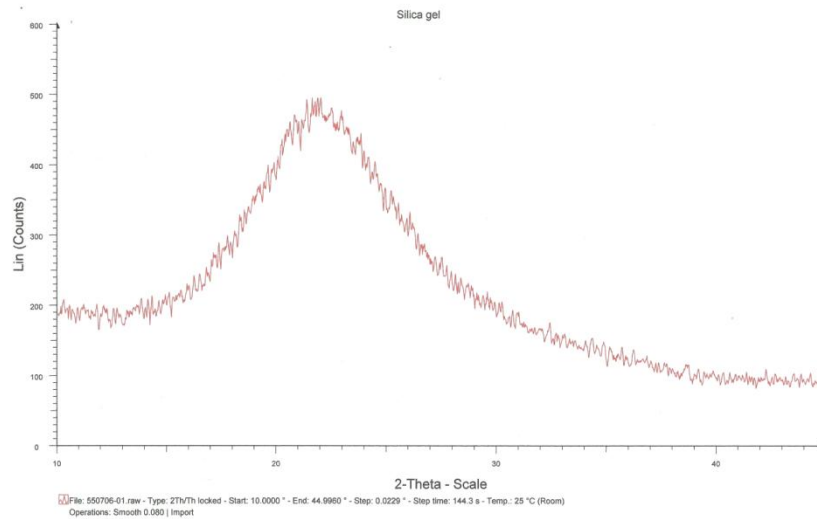
จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าจำนวนสารประกอบต่างๆของผงซิลิกาเจลที่ 3 และ 4 จะมีน้อยกว่าสารประกอบในผงซิลิกาเจลที่ 1 และ 2 ซึ่งส่งผลมาจากการนำไปผ่านการแช่กรดเพื่อขจัดสิ่งเจือปนบางอย่างออกไปก่อน และทำให้ได้ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นด้วย จากข้อมูลผลการตรวจวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าผงซิลิกาเจลที่สังเคราะห์จากแกลบทั้ง 4 วิธี มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับผงซิลิกาเจลพาณิชย์เช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับกรดแช่แกลบด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนเผาที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่าแกลบดังกล่าวมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบมากกว่าแกลบที่ไม่ได้ผ่านการแช่กรด

#### 4.1.2.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โดยวิธีเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

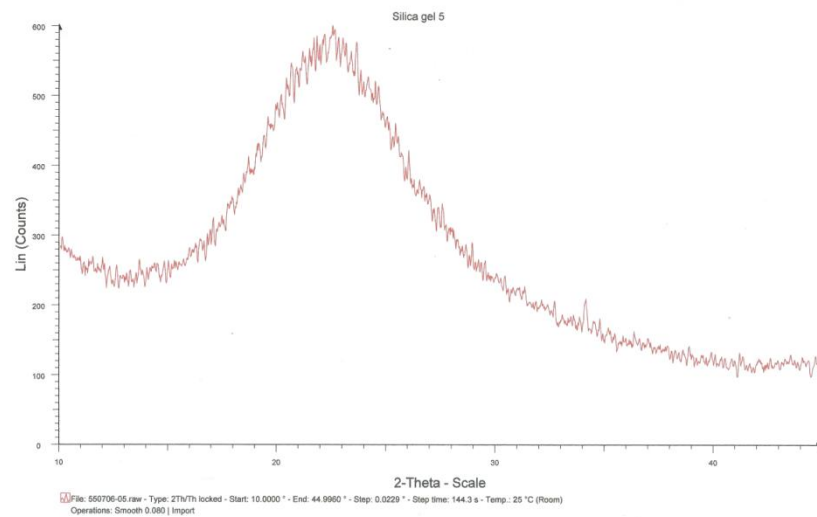
เอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสี จะสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน โดยนำมาศึกษา รูปแบบโครงสร้างผลึกการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างของตัวดูดซับโดยวิธีเอ็กซ์-เรย์  
ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ ของผงซิลิกาเจลที่สกัดจากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์

ตัวอย่าง	Angle 2-Theta°	d value Angstrom	Intensity Count	% Intensity
ผงซิลิกาเจล 1	22.0092	4.0353	497	100
	22.5053	3.9475	483	97.2
	32.4532	2.7566	175	35.3
	38.6399	2.3283	115	23.2
	38.7751	2.3205	115	23.2
ผงซิลิกาเจล 2	21.7556	4.0818	493	99.8
	22.2735	3.9881	494	100
ผงซิลิกาเจล 3	21.9823	4.0402	504	100
	28.6391	3.1145	244	48.4
	29.6236	3.0132	214	42.4
ผงซิลิกาเจล 4	22.2892	3.9853	489	100
ผงซิลิกาเจล พาณิชย์	22.5357	3.9423	603	100
	34.1759	2.6215	210	34.8



รูปที่ 4.7 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์จากเครื่อง XRD ของผงซิลิกาเจล 1



รูปที่ 4.8 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์จากเครื่อง XRD ของผงซิลิกาเจลพาณิชย์

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีวิธีเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ พบว่าโครงสร้างของผงซิลิกาเจลที่สังเคราะห์จากแอลบในวิธีทั้ง 4 มีลักษณะเหมือนกันกับผงซิลิกาเจลพาณิชย์ ซึ่งเป็นโครงสร้างชนิดเดียวกัน ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่าทั้งผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแอลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์เป็นของแข็งที่ไม่มีรูปผลึก หรือของแข็งอสัณฐาน (Amorphous Solid)

#### 4.1.2.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โมเลกุลของสารด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)

เอฟทีไออาร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ และ อนินทรีย์ โดยศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสงซึ่งโดยการวิเคราะห์โครงสร้างพันธะของสาร

#### ตารางที่ 4.6 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โมเลกุลของสารด้วยเครื่องเอฟทีไอ ของผงซิลิกาเจลที่สกัดจากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์

พันธะ	ซิลิกาเจล 1	ซิลิกาเจล 2	ซิลิกาเจล 3	ซิลิกาเจล 4	ซิลิกาเจล 5
O-H	3407.9	3406.3	3407.2	3407.6	3407
CH <sub>2</sub>	2961.8	2964.2	2965.4	2967.3	2968.1
H-O-H	1612.6	1637	1612.3	1637.8	1636.8
C=C	1511.3	-	1511.6	-	1512.1
C-O	1462.3	-	1460.3	1455.4	1455.6
Si-O-Si	1055.2	1055.3	1058.3	1058.2	1059.1
Si-O	801.3	802	801.5	802	800

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการตรวจการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โมเลกุลของสารด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างพันธะของสารตัวอย่าง คือ ผงซิลิกาเจล จะเห็นได้ว่าพบโครงสร้างของ Si-O-Si และ Si-O เป็นองค์ประกอบสำคัญในผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์

#### 4.1.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ

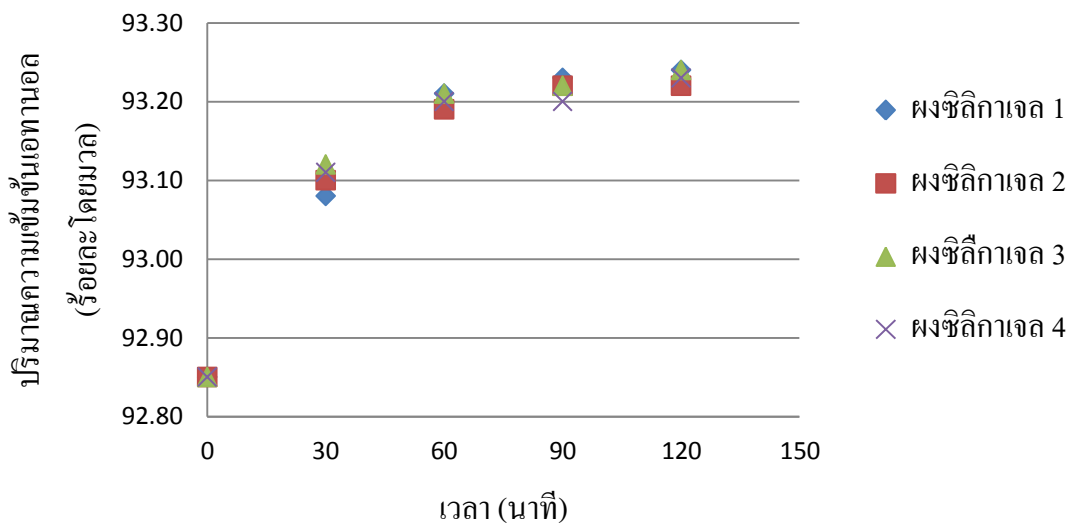
จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและการตรวจวิเคราะห์ นำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.7

**ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ในการผลิตผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ**

งานวิจัย	งานวิจัยนี้	ศรีโฉล ขุนทด	Dongmin An	สุภาพ คิปปคัมภีรภาพ	สันติ รัตนวีรนนท์
อุณหภูมิเผาเถ้าดำ (°C)	-	-	-	400-500	-
สารละลายกรดที่ใช้	HCl	-	-	-	HCl
อุณหภูมิเผาเถ้าขาว (°C)	700	400-1500	650-850	1050	700
สารละลายด่างที่ใช้	NaOH	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaOH	NaOH
BET Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	200	600	1936	470	-
XRD (%SiO <sub>2</sub> )	96.59	99.91	99.6	95-96	99.61
% Yield จากเถ้าแกลบ	91.49	80	84.57	95.04	99.66

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้มีสถานะในการทดลองใกล้เคียงกับของสันติ รัตนวีรนนท์ คือเผาเถ้าที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผ่านการทำให้เป็นโซเดียมซิลิเกตด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะได้เปอร์เซ็นต์ผลได้จากเถ้าแกลบใกล้เคียงกัน คือ 91.49 และ 99.66 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และยังพบว่าในแต่ละวิธีการทดลองของงานวิจัยอื่นๆ จะมีความสามารถในการสกัดซิลิกอนไดออกไซด์ออกมาใกล้เคียงกัน คือ อยู่ระหว่าง 96-99 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีความแตกต่างในด้านเปอร์เซ็นต์ผลได้จากเถ้าแกลบสุทธิซึ่งแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่ากระบวนการที่ผ่านการแช่กรดจะส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้จากเถ้าแกลบสุทธิที่สูงกว่ากระบวนการอื่นๆ

#### 4.1.4 การทดสอบดูดซับผงซีลีกาเจลสังเคราะห์จากแกลบจากวิธีต่างๆ



รูปที่ 4.9 การทดลองดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซีลีกาสังเคราะห์จากแกลบในวิธีต่างๆ ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

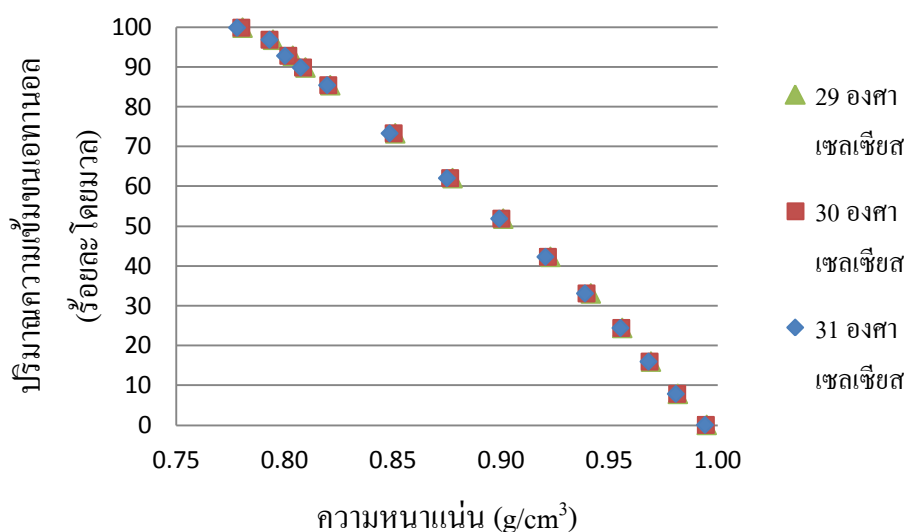
การทดสอบการดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซีลีกาสังเคราะห์จากแกลบในวิธีที่ 1 ถึง 4 ในอัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที เห็นได้ว่าการสังเคราะห์ผงซีลีกาเจลจากกระบวนการทั้ง 4 ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของซีลีกาเจลดังการวิเคราะห์คุณสมบัติที่ผ่านมาและในการดูดซับเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกผลิตผงซีลีกาเจลจากกระบวนการที่ 3 เพราะมีความง่ายและสะดวกในการผลิตเพื่อนำมาใช้ในการดูดซับต่อไป

## 4.2 การทดลองการดูดซับน้ำที่ป็นในเอทานอลเข้มข้น

### 4.2.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ

การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยวิธีวัดความหนาแน่น โดยใช้พิคโนมิเตอร์มาตรฐานที่ผ่านการปรับเทียบมาแล้ว โดยพิคโนมิเตอร์ที่ผ่านการปรับเทียบ มีปริมาตร 10.366 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิระหว่าง 29-31 องศาเซลเซียส



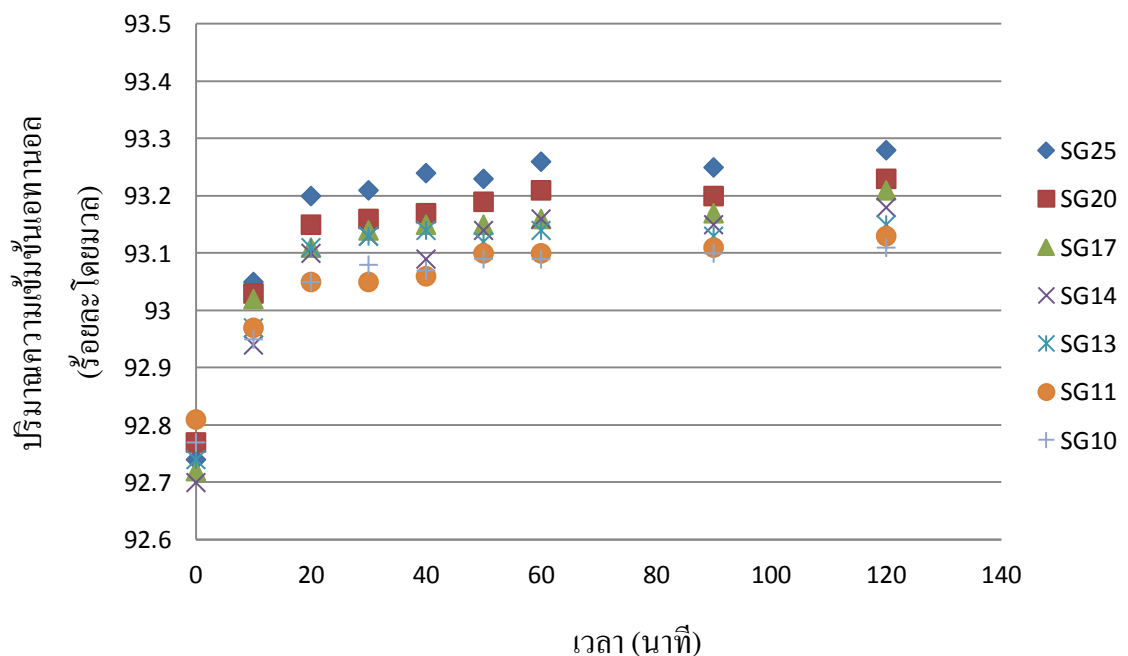
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยวิธีวัดความหนาแน่น

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยวิธีวัดความหนาแน่น รูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเอทานอลบริสุทธิ์ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อของผสมเอทานอลมีความเข้มข้นสูงขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำลง และอุณหภูมิยังส่งผลต่อความหนาแน่นด้วยสอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง

จากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซับที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพบรรยากาศในแต่ละวัน ดังนั้นจึงทดลองสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำด้วยวิธีวัดความหนาแน่นที่อุณหภูมิระหว่าง 29-31 องศาเซลเซียส

#### 4.2.1 ผลการทดลองดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จาก แกลบ

การทดลองดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบจากการสังเคราะห์ในวิธีการที่ 3 (แกลบแช่กรด) ในอัตราส่วนต่างๆที่กำหนดคือ 1:4 (SG25) 1:5(SG20) 1:6 (SG17) 1:7 (SG14) 1:8 (SG13) 1:9 (SG11) และ 1:10 (SG10) เป็นเวลา 120 นาที โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาทีใน 1 ชั่วโมงแรก และทุกๆ 30 นาทีใน 1 ชั่วโมงหลัง



รูปที่ 4.11 การทดลองดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบในอัตราส่วนต่างๆ เป็นเวลา 120 นาที



จากการทดลองพบว่าผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลเข้มข้นได้ โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับมากขึ้นจะยิ่งส่งผลทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลหลังการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในอัตราส่วนต่างๆที่ได้ทำการทดลอง อัตราส่วน 1:4 (SG25) สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลภายหลังจากการดูดซับได้สูงที่สุดคือที่ 93.28 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จากความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นที่มีเพียง 92.74 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

สมการแบบจำลองความเข้มข้นสมดุล

$$\frac{c_o - c}{c_o - c_e} = \frac{bt}{1 + bt} \quad 4.1$$

โดยที่  $b$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

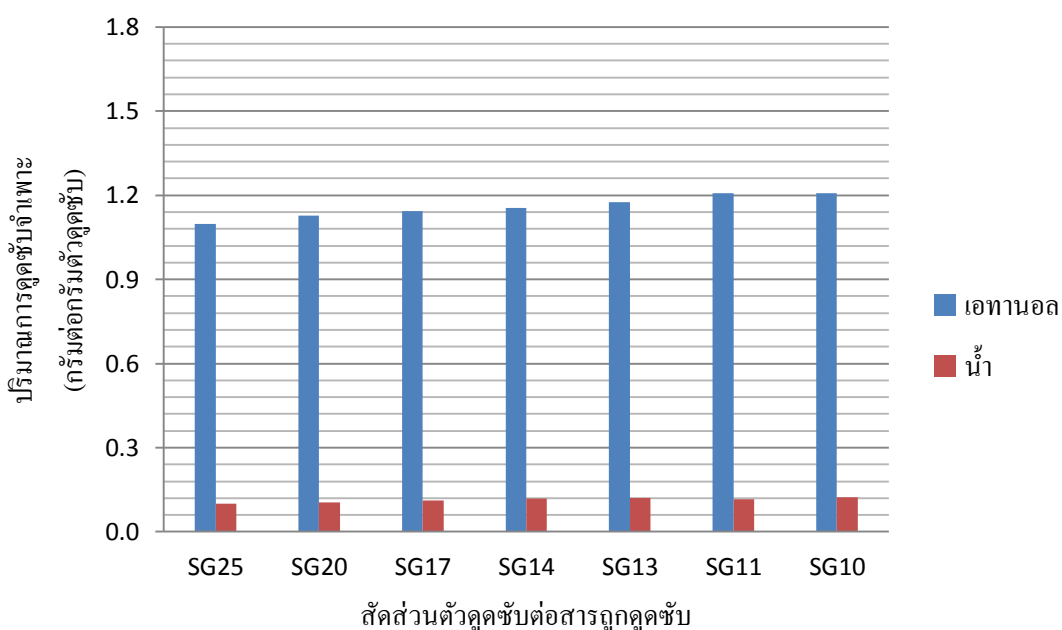
และสามารถเขียนสมการเชิงเส้นเพื่อหาความเข้มข้นที่สมดุลได้ดังนี้

$$\frac{1}{c - c_o} = \left( \frac{1}{b(c_e - c_o)} \right) \left( \frac{1}{t} \right) + \left( \frac{1}{c_e - c_o} \right) \quad 4.2$$

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุล

อัตราส่วน	$C_{\text{exp}}$ (ที่เวลา 120 นาที)	$C_e$	$b$	$r^2$	$\sum (C_{\text{exp}} - C_e)^2$
SG25	93.28	93.33	0.119	0.9365	0.0036
SG20	93.23	93.27	0.117	0.9540	0.0018
SG17	93.21	93.22	0.157	0.9731	0.0010
SG14	93.18	93.21	0.060	0.9017	0.0367
SG13	93.15	93.17	0.080	0.8680	0.0272
SG11	93.13	93.15	0.090	0.9611	0.0010
SG10	93.11	93.14	0.081	0.9375	0.0053

จากผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นที่สมดุลของอัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับในอัตราส่วน 1:4 (SG25) ได้ค่าความเข้มข้นที่สมดุลสูงสุดคือ 93.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนของผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นสมดุลเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และจากการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณกับความเข้มข้นจากการทดลอง พบว่าที่เวลา 60 นาที มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่สมดุลจากการคำนวณ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาที่เวลา 60 นาที เป็นเวลาที่เข้าสู่สมดุลแล้ว



รูปที่ 4.12 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำกับสัดส่วนตัวดูดซับต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 เป็นการแสดงผลของปริมาณการดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำจากตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่เวลา 60 นาที ในอัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จะส่งผลต่อปริมาณการดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อปริมาณตัวดูดซับที่มีมากขึ้นในระบบจะเกิดการบดบังอนุภาคกันเอง และส่งผลให้พื้นที่ที่สามารถสัมผัสกับสารถูกดูดซับมีน้อยลง ทำให้ความสามารถในการดูดซับจำเพาะต่อกรัมตัวดูดซับมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ตัวดูดซับในอัตราส่วนน้อย

สมการจลนพลศาสตร์อันดับ 1

$$q_t = \frac{q_e kt}{1 + kt} \quad 4.3$$

โดยที่  $k_1$  คือ ค่าคงที่ของจลนพลศาสตร์อันดับ 1

และสามารถเขียนสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{k_1}{q_e} \frac{1}{t} + \frac{1}{q_e} \quad 4.4$$

ตาราง 4.9 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1

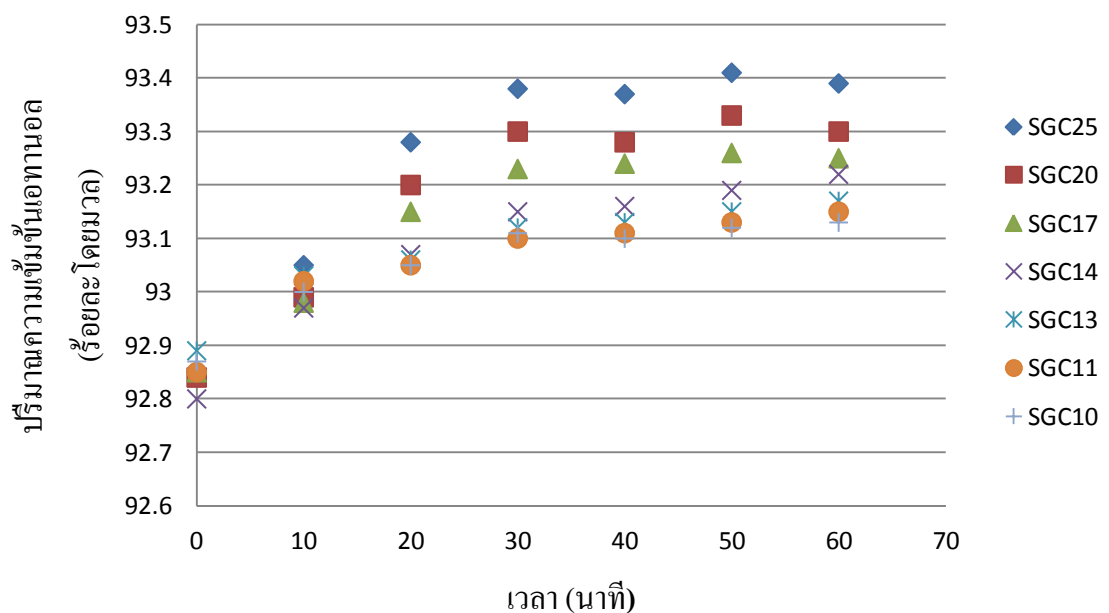
อัตราส่วน	ดูดซับ	$q_e$	$k_1$	$r^2$	$\sum (q_{\text{exp}} - q_e)^2$
SG25	เอทานอล	1.109	1.082	0.8601	0.0016
	น้ำ	0.104	1.712	0.9789	0.0002
SG20	เอทานอล	1.13	0.22	0.8051	0.1953
	น้ำ	0.107	1.021	0.9788	0
SG17	เอทานอล	1.151	0.49	0.9335	0.0335
	น้ำ	0.122	1.375	0.9648	0.0006
SG14	เอทานอล	1.158	0.728	0.7603	0.0073
	น้ำ	0.122	2.091	0.9632	0.0004
SG13	เอทานอล	1.21	1.552	0.8633	0.0164
	น้ำ	0.126	2.594	0.9954	0.0008
SG11	เอทานอล	1.209	0.513	0.8662	0.032
	น้ำ	0.12	1.719	0.9378	0.0002
SG10	เอทานอล	1.219	1.751	0.8187	0.0287
	น้ำ	0.129	3.014	0.9741	0.0012

ผลจากการคำนวณดังตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนผงซิลิกาเจลดมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุลของเอทานอลและน้ำมีค่าลดลง เมื่อปริมาณ

สัดส่วนผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้นก็ตาม แต่เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะส่งผลทำให้มีปริมาณตัวดูดซับในระบบมากขึ้นจนเกิดการทับและบดบังกันเองระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคไม่สามารถดูดซับสารถูกดูดซับได้อย่างอิสระ ส่งผลให้ปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่น้อยกว่า แต่เมื่อคำนวณถึงปริมาณตัวดูดซับที่ใส่ในปริมาณที่มากกว่า ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับรวมของสารมีค่ามากกว่าเมื่อมีอัตราส่วนตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจะส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับและเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลในระบบเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการใส่ตัวดูดซับในอัตราส่วนน้อย

#### 4.2.2 ผลการทดลองดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์

การทดลองดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบในอัตราส่วนต่างๆที่กำหนดคือ 1:4 (SGC25) 1:5(SGC20) 1:6 (SGC17) 1:7 (SGC14) 1:8 (SGC13) 1:9 (SGC11) และ 1:10 (SGC10) เป็นเวลา 60 นาที โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที



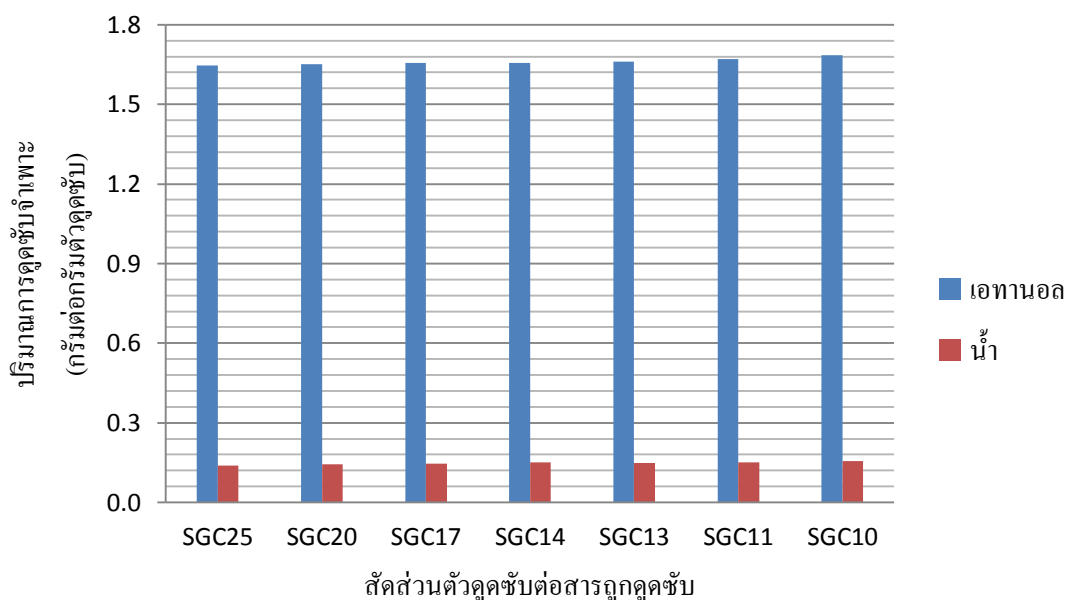
รูปที่ 4.13 การทดลองดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาเจลพาณิชย์ ในอัตราส่วนต่างๆ เป็นเวลา 60 นาที

จากการทดลองพบว่าผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลเข้มข้นได้ โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับมากขึ้นจะยิ่งส่งผลทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลหลังการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในอัตราส่วนต่างๆที่ได้ทำการทดลอง อัตราส่วน 1:4 (SGC25) สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลภายหลังจากการดูดซับได้สูงที่สุดคือ 93.39 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จากความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นที่มีเพียง 92.85 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุล

อัตราส่วน	$C_{exp}$ (ที่เวลา 60 นาที)	$c_e$	b	$r^2$	$\sum (C_{exp}-C_e)^2$
SGC25	93.39	93.99	0.023	0.9353	0.0265
SGC20	93.3	93.95	0.016	0.932	0.0335
SGC17	93.25	93.94	0.014	0.9411	0.0191
SGC14	93.22	93.41	0.039	0.9939	0.0008
SGC13	93.17	93.22	0.071	0.9413	0.0008
SGC11	93.15	93.18	0.101	0.9393	0.0008
SGC10	93.13	93.18	0.091	0.9744	0.0006

จากผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นที่สมดุลของอัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับในอัตราส่วน 1:4 (SGC25) ได้ค่าความเข้มข้นที่สมดุลสูงสุดคือ 93.99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนของผงซิลิกาเจลพาณิชยที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นสมดุลเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และจากแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณกับความเข้มข้นจากการทดลอง พบว่าที่เวลา 60 นาที มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่สมดุลจากการคำนวณ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาที่เวลา 60 นาที เป็นเวลาที่เข้าสู่สมดุลแล้วเช่นกัน



รูปที่ 4.14 ปริมาณดุดซ์จำพะาะของเอทานอลและน้ำกับสัดส่วนตัวดุดซ์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 เป็นการแสดงผลของปริมาณการดุดซ์จำพะาะของเอทานอลและน้ำจากตัวดุดซ์ผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่เวลา 60 นาที ในอัตราส่วนตัวดุดซ์ต่อสารกุกดุดซ์ที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดุดซ์จะส่งผลต่อปริมาณการดุดซ์จำพะาะของตัวดุดซ์ลดลงเล็กน้อย เช่นเดียวกับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบ

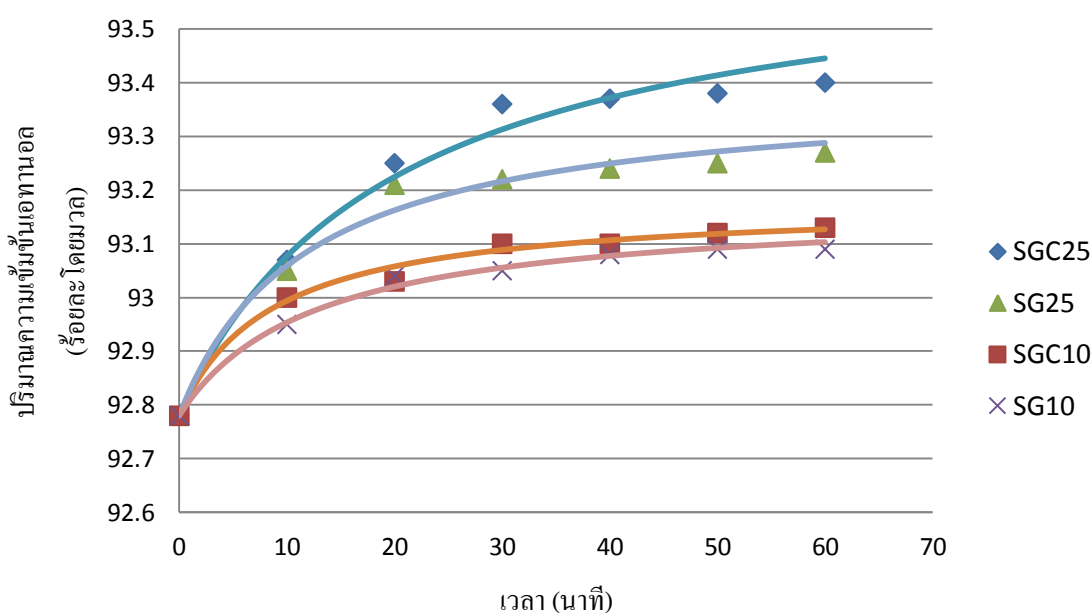
ตาราง 4.11 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ 1

อัตราส่วน	ดูดซับ	$q_e$	$k_1$	$r^2$	$\sum (q_{exp} - q_e)^2$
SGC25	เอทานอล	1.645	0.128	0.7428	0.9618
	น้ำ	0.142	0.905	0.9953	0
SGC20	เอทานอล	1.661	0.297	0.9355	0.2346
	น้ำ	0.148	1.32	0.9723	0.0001
SGC17	เอทานอล	1.662	0.361	0.9015	0.1543
	น้ำ	0.15	1.548	0.9952	0.0002
SGC14	เอทานอล	1.672	0.738	0.9426	0.0119
	น้ำ	0.155	1.912	0.9714	0.0005
SGC13	เอทานอล	1.671	0.555	0.911	0.0472
	น้ำ	0.15	1.272	0.9061	0.0001
SGC11	เอทานอล	1.686	0.632	0.8424	0.0282
	น้ำ	0.153	1.401	0.884	0.0001
SGC10	เอทานอล	1.69	0.309	0.8353	0.2242
	น้ำ	0.159	1.237	0.954	0.0001

ผลจากการคำนวณดังตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนผงซิลิกาเจดมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุลของเอทานอลและน้ำมีค่าลดลงเช่นกัน

#### 4.2.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบกับผงซิลิกาเจลพาณิชย์

การทดลองเปรียบเทียบการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบกับผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่สัดส่วนตัวดูดซับ 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่เวลาการดูดซับ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 การทดลองเปรียบเทียบการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบกับผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่สัดส่วนตัวดูดซับ 25 และ 10 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาพบว่าผงซิลิกาเจลพาณิชย์สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลเข้มข้นได้มากกว่าผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ โดยที่สัดส่วนตัวดูดซับ 25 เปอร์เซ็นต์ของสารถูกดูดซับสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลได้มากถึง 93.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบสามารถเพิ่มได้ถึง 93.27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากัน คือ 92.78 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนที่ปริมาณสัดส่วนตัวดูดซับต่ำคือที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของสารถูกดูดซับสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลได้ไม่ต่างกันมากนัก



ตารางที่ 4.12 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุล

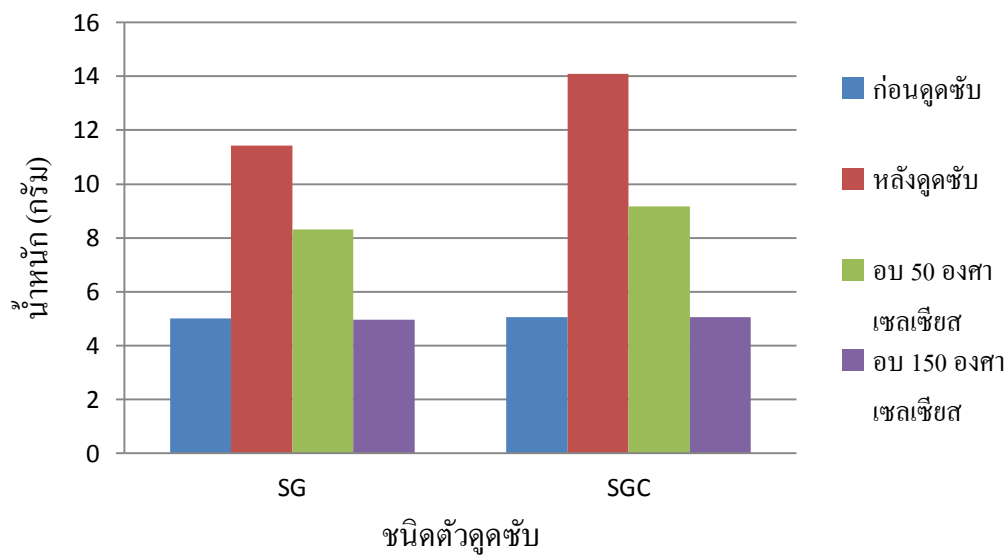
อัตราส่วน	$C_{exp}$ (ที่เวลา 60 นาที)	$c_e$	b	$r^2$	$\sum (C_{exp}-C_e)^2$
SGC25	93.4	93.66	0.0504	0.9746	0.061
SG25	93.27	93.38	0.0848	0.9183	0.001
SGC10	93.13	93.18	0.1171	0.9419	0.0032
SG10	93.09	93.17	0.0797	0.9734	0.0006

จะเห็นได้ว่าผงซีลีกาเจลพาณิชยสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลได้มากกว่าผงซีลีกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ เป็นเพราะว่าผงซีลีกาเจลพาณิชยมีปริมาตรการดูดซับจำเพาะสูงกว่าผงซีลีกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ ซึ่งส่งผลทำให้สามารถดูดซับสารถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับซีลีกาเจลพาณิชยได้มาก และน้ำก็ถูกดูดเข้าไปได้มากด้วยเช่นกัน จึงส่งผลให้สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลได้

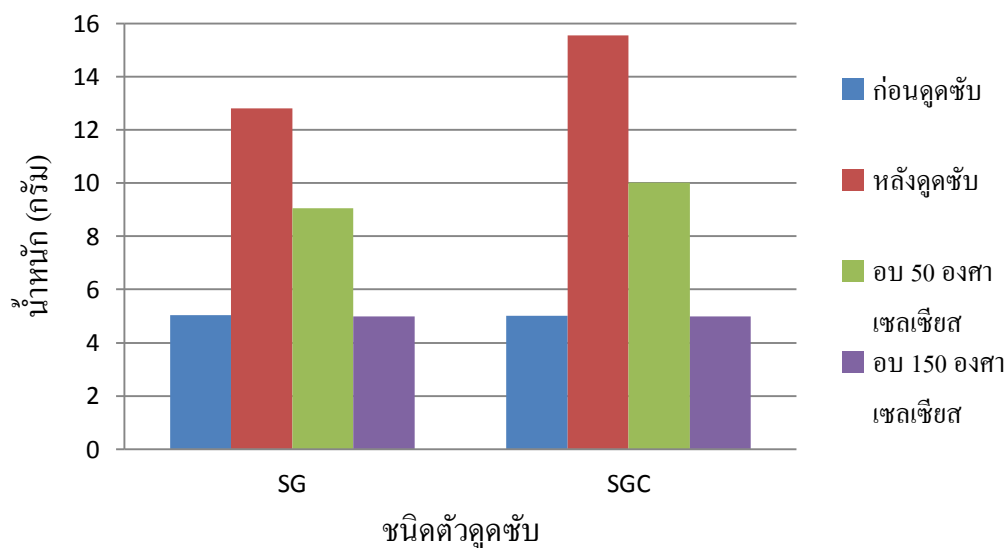
### 4.3 ผลการทดสอบการปรับสภาพตัวดูดซับของการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

#### 4.3.1 ทดสอบการปรับสภาพตัวดูดซับ

การทดสอบการคืนสภาพของผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์โดยการนำไปทดลองดูดซับเอทานอลเข้มข้นและน้ำกลั่น



รูปที่ 4.16 การปรับสภาพของตัวดูดซับในการทดลองดูดซับเอทานอลเข้มข้น



รูปที่ 4.17 การปรับสภาพของตัวดูดซับในการทดลองดูดซับน้ำกลั่น

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อนำตัวดูดซับผงซิลิกาเจลที่สังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์มาทดลองดูดซับเอทานอลเข้มข้นและน้ำ พบว่าเมื่อนำไปปรับสภาพโดยการนำไปอบให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสจะสามารถไล่สารถูกดูดซับบริเวณพื้นผิวรอบนอกของตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับไม่เกาะติดกัน และสามารถแยกกันได้ไม่เป็นกลุ่มก้อน แต่ยังมีสารถูกดูดซับถูกดูดซับอยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับเอง จากนั้นจึงนำไปทดสอบปรับสภาพต่อโดยการนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าจะสามารถไล่สารถูกดูดซับออกจากผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์ได้หมด ทำให้น้ำหนักของตัวดูดซับมีความใกล้เคียงกับตัวดูดซับเริ่มต้นก่อนการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าสารถูกดูดซับสามารถปรับสภาพได้โดยการอบให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารถูกดูดซับบริเวณผิวนอกสามารถไล่ได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิเพียง 50 องศาเซลเซียส แต่สารที่อยู่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับสามารถไล่ออกได้ยากซึ่งต้องใช้พลังงานความร้อนสูงถึง 150 องศาเซลเซียสในการไล่สารถูกดูดซับออกไปได้หมด จนสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ คล้ายกับตัวดูดซับของใหม่

**ตารางที่ 4.13 การดูดซับเอทานอลและน้ำของตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ และผงซิลิกาเจลพาณิชย์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง**

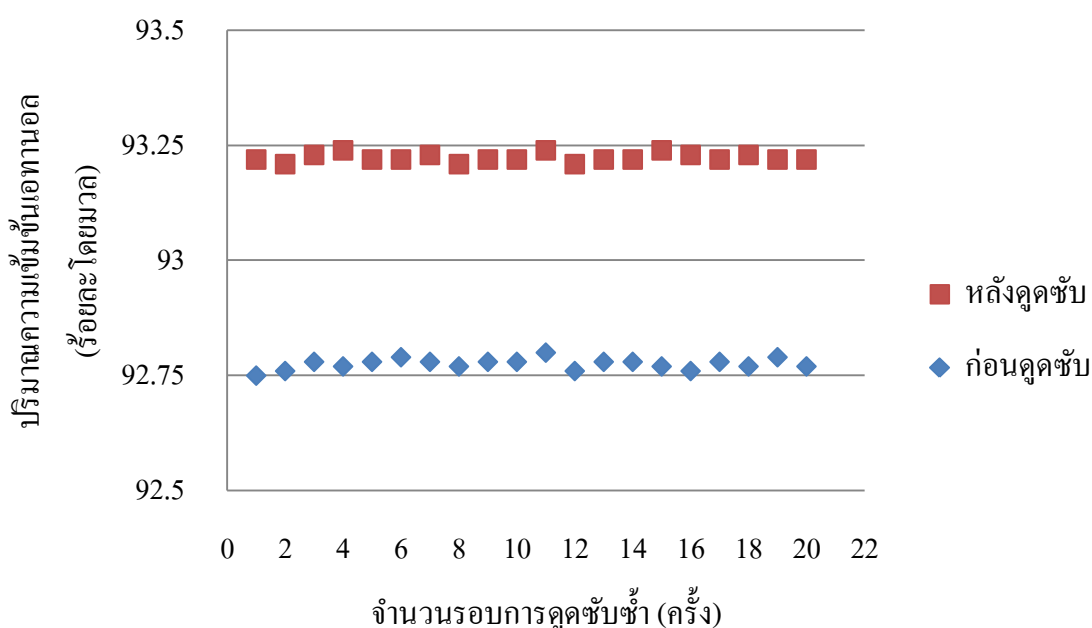
ตัวดูดซับ	สารถูกดูดซับ	ที่ผิวนอก (กรัม)	ภายในรูพรุน (กรัม)	ร้อยละอัตราส่วน ที่ผิวนอก
ผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ	เอทานอล	3.1089	3.3162	48.39
ผงซิลิกาเจลพาณิชย์	เอทานอล	4.9038	4.1262	54.31
ผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ	น้ำ	3.736	4.0192	48.17
ผงซิลิกาเจลพาณิชย์	น้ำ	5.5313	4.9867	52.59

จากการศึกษาพบว่าผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่นำมาใช้ในการทดลองมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าผงซิลิกาเจลที่สังเคราะห์จากแกลบ และที่ผงซิลิกาเจลพาณิชย์มีขนาดเล็กกว่าผงซิลิกาเจลที่สังเคราะห์จากแกลบ (ผงซิลิกาเจลพาณิชย์มีขนาดอยู่ในช่วง 0.06-0.2 มิลลิเมตร

ผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบมีขนาดอยู่ในช่วง 0.21-1 มิลลิเมตร) ด้วยขนาดที่เล็กกว่านี้เอง จึงส่งผลให้ ระยะเวลาของตัวดูดซับมีโพรงในสารถูกดูดซับสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคได้ จึงทำให้สามารถดูดซับสารถูกดูดซับได้มากกว่าผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่มีขนาดใหญ่กว่า

#### 4.3.2 ทดสอบการดูดซับซ้ำ

การทดสอบการดูดซับซ้ำของผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ โดยการนำไปทดลองดูดซับเอทานอลเข้มข้นซ้ำเป็นจำนวน 20 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.18

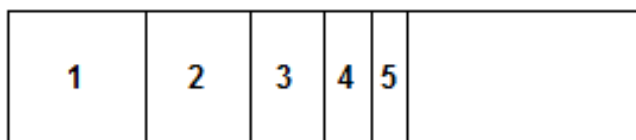


รูปที่ 4.18 การดูดซับซ้ำของของตัวดูดซับผงซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบ โดยใช้ดูดซับน้ำในสารละลายน้ำที่ปนในเอทานอลเข้มข้น ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 (SG25)

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงการนำตัวดูดซับมาใช้ซ้ำจำนวนรอบ 20 รอบ พบว่าตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบสามารถดูดซับซ้ำได้อย่างน้อย 20 ครั้ง จากกราฟแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับที่คงเดิม ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างกับการใช้ตัวดูดซับใหม่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการอบให้ความร้อน 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

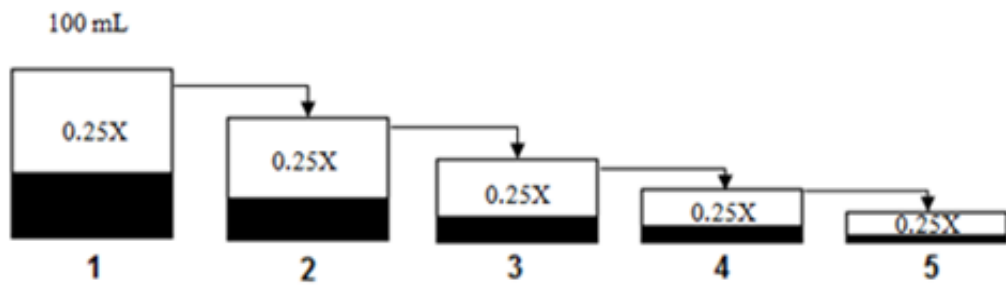
#### 4.4 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำด้วยผงซิลิกาเจล สังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์แบบต่อเนื่อง

การดูดซับแบบต่อเนื่องเป็นการเพิ่มสัดส่วนความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ โดยการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำในครั้งแรก แล้วนำของผสมเอทานอลหลังการดูดซับมาใช้ในการดูดซับครั้งต่อไป โดยใช้ ปริมาณตัวดูดซับในปริมาณเท่าเดิม คือ 25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณของผสมเอทานอลปนน้ำตลอดการดูดซับต่อเนื่อง ซึ่งเปรียบได้กับระบบดูดซับในหลอดดูดซับแบบแพคเกจแสดงดังรูปที่ 4.19 ที่จะมีการไหลจากในส่วนที่ 1 ไปยังส่วนที่ 2 3 4 และ 5 เป็นอัตราส่วนของผสมต่อปริมาณตัวดูดซับเท่าๆกัน ตามลำดับ ในการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล

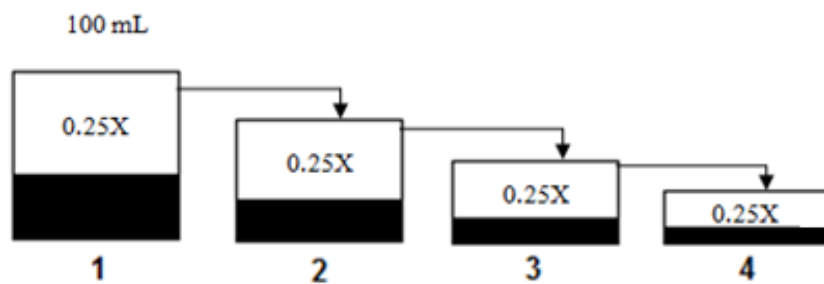


รูปที่ 4.19 แสดงแบบจำลองการดูดซับแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบกับ  
ระบบดูดซับในหลอดดูดซับ

การเปรียบเทียบการดูดซับน้ำในสารละลายเอทานอลปนน้ำของตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเถ้าแกลบกับผงซิลิกาเจลพาณิชย์ โดยนำมาดูดซับน้ำในของผสมเอทานอลเข้มข้น ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในแต่ละรอบการดูดซับแบบต่อเนื่อง ลักษณะการทดสอบการดูดซับแบบต่อเนื่องแสดงไว้ในรูปที่ 4.20 และ 4.21

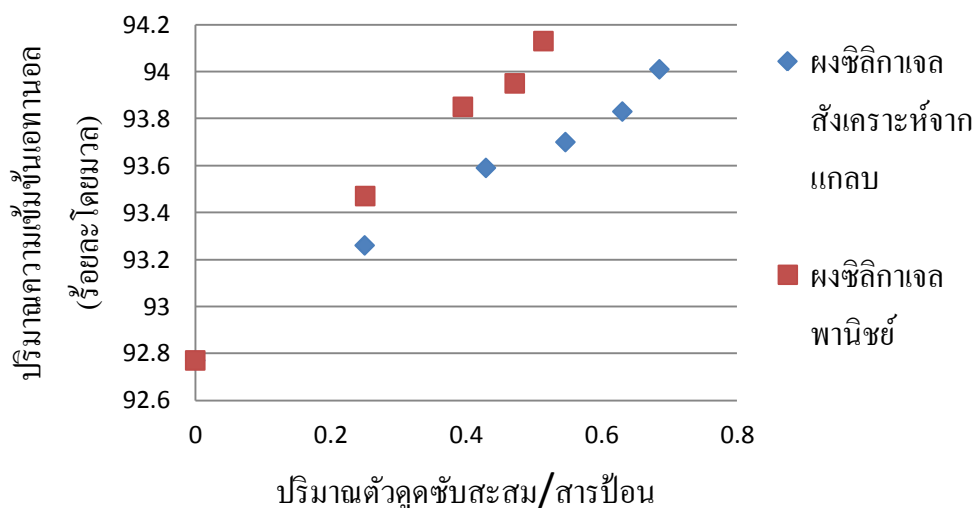


รูปที่ 4.20 การดูดซับแบบต่อเนื่องของผงซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบ



รูปที่ 4.21 การดูดซับแบบต่อเนื่องของผงซิลิกาเจลพาณิชย์

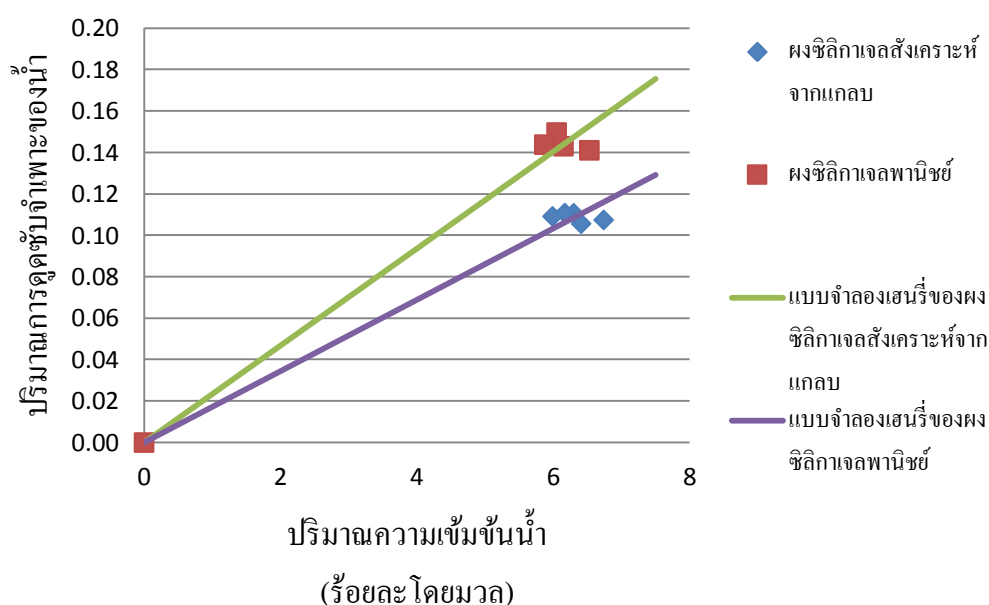
ผลการทดลองดูดซับแบบต่อเนื่องของตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โดยใช้เวลาในการดูดซับต่อรอบการดูดซับเป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่า ผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์สามารถเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลหลังการดูดซับได้ โดยเริ่มต้นจากปริมาณเอทานอลที่เท่ากัน และอัตราส่วนของตัวดูดซับต่อสารถูกดูดซับในปริมาณที่เท่ากัน พบว่าผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบสามารถดูดซับได้จำนวน 5 รอบ และผงซิลิกาเจลพาณิชย์สามารถดูดซับได้ 4 รอบ เป็นเพราะว่าสารถูกดูดซับสามารถถูกดูดซับได้ดีกว่าในผงซิลิกาเจลพาณิชย์เพราะมีขนาดเล็กกว่า ทำให้มีช่องว่างระหว่างพื้นที่ผิวภายนอกให้สารถูกดูดซับแทรกตัวอยู่ได้มากกว่าผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่มีขนาดใหญ่กว่า



รูปที่ 4.22 การดูดซับแบบต่อเนื่องของตัวดูดซับผงชิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบ และผงชิลิกาเจลพาณิชย์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อรอบการดูดซับ

จากรูปที่ 4.22 แสดงถึงการดูดซับของผงชิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบ และการดูดซับของผงชิลิกาเจลพาณิชย์ ในลักษณะการดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยจะเห็นได้ว่าเอทานอลเริ่มต้นปริมาตร 100 มิลลิลิตร จะเห็นได้ว่าผงชิลิกาเจลพาณิชย์สามารถเข้าสู่กระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่องได้ 4 รอบการดูดซับ ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลได้ถึง 94.13 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จนเหลือปริมาตรเอทานอลหลังการดูดซับรอบสุดท้ายเพียง 13.25 มิลลิลิตร ส่วนผงชิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบสามารถเข้าสู่กระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่องได้ถึง 5 รอบการดูดซับซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลได้ถึง 94.01 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จากความเข้มข้นเริ่มต้น 92.77 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยยังเหลือปริมาตรเอทานอลในรอบสุดท้ายถึง 20.25 มิลลิลิตร ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าชิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบและชิลิกาเจลพาณิชย์มีความสามารถในการดูดซับที่ต่างกันในลักษณะความสามารถของตัวดูดซับ แต่ในทางเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลหลังการดูดซับแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเห็นได้จากความเข้มข้นเอทานอลหลังการดูดซับและปริมาตรของเอทานอลที่เหลือหลังการดูดซับทั้ง 2 กระบวนการ

จากผลการดูดซับแบบต่อเนื่องของตัวดูดซับผงซีลีกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซีลีกาเจลพาณิชย์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 สามารถนำมาคำนวณเพื่อเข้าสู่แบบจำลองได้ตามสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี



รูปที่ 4.23 การดูดซับแบบต่อเนื่องของตัวดูดซับผงซีลีกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซีลีกาเจลพาณิชย์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อรอบการดูดซับที่ได้จากการทดลองและแบบจำลอง

จากข้อมูลการดูดซับแบบต่อเนื่องของผงซีลีกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซีลีกาเจลพาณิชย์สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี โดยมีค่าคงที่สมดุลของแบบจำลองคือ  $K_H$  จะพบว่าน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น โดยเอทานอลเข้มข้นมีน้ำปนอยู่ไม่เกิน 8 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ซึ่งเป็นของผสมที่ถือได้ว่ามีน้ำปนอยู่น้อย ดังนั้นแบบจำลองสมดุลของเฮนรีจึงมีความสอดคล้องและเหมาะสมกับผลการทดสอบ



ตารางที่ 4.14 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณแบบจำลอง  
สมดุลดูดซับของเฮนรี่

ชนิดตัวดูดซับ	$K_H$	$R^2$	$\sum (\Delta q)^2$
ผงซีลีกาเจลสังเคราะห์จากเกลบ	0.0172	0.9841	0.0001
ผงซีลีกาเจลพาณิชย์	0.0234	0.9853	0.0002

จากข้อมูลจากตารางที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่สมดุลของแบบจำลองของผงซีลีกาเจลพาณิชย์มีค่ามากกว่าค่าคงที่สมดุลของแบบจำลองของผงซีลีกาเจลสังเคราะห์จากเกลบ ซึ่งส่งผลถึงความสามารถในการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลหลังการดูดซับของผงซีลีกาเจลพาณิชย์มีความสามารถดีกว่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การสังเคราะห์ซิลิกาเจลจากวัตถุดิบเริ่มต้นที่ต่างกัน คือ จากแกลบและเถ้าดำ จะส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิตสุทธิของซิลิกาเจล แต่ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของซิลิกาเจลและการนำไปใช้ในการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลเข้มข้น ซึ่งในการแทรกกรดไฮโดรคลอริกเพื่อขจัดสิ่งที่ไม่ต้องการบางอย่างออกไป สามารถส่งผลต่อเถ้าขาวจากแกลบมีสิ่งเจือปนน้อยลง ทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ซิลิกาเจลจากเถ้าขาวสูงสุด
2. การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลเข้มข้นด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์ สามารถเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 60 นาที โดยอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับ 1 และมีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี
3. การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลเข้มข้นด้วยตัวดูดซับผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลหลังการดูดซับได้จริง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรควบคุมความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นก่อนนำไปดูดซับ โดยควบคุมให้มีความเข้มข้นเท่ากันเพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับ
2. ควรศึกษาปริมาณความเข้มข้นเอทานอลที่ความเข้มข้นต่ำด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีการกระจายตัว ในการนำผลไปวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองต่อไป
3. ควรศึกษาความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำล้างจากการปรับสภาพตัวดูดซับ และควรมีการศึกษากระบวนการนำกลับเอทานอลออกจากตัวดูดซับ ซึ่งการนำกลับโดยใช้ความร้อนเป็นวิธีที่ใช้พลังงานสูง

## รายการอ้างอิง

- [1] Tushar K. Ghosh, Mark A. Prelas. Energy Resources and Systems Volume 2: Renewable Resources. pp. 419-495, 2011
- [2] Suthamma Y., Chumnong S., A Study of Ethanol Production Cost for Gasoline Substitutiin Thailand and Its Competitiveness, J. Sci. Tech. Res. 12, pp. 69-79, 2007
- [3] คณะกรรมการกำกับการซื้อขายสินค้าเกษตรล่วงหน้า. สำนักงาน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.aftc.or.th/> [11 พฤษภาคม 2554]
- [4] วิโรจน์ พุทธิวิถิ. รู้จักเอทานอล. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน [ออนไลน์]. 2553 แหล่งที่มา : <http://www.water-pacific.com/index.php/> [11 พฤษภาคม 2554]
- [5] SilicaThai. ซิลิกาเจล. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา : <http://www.silicathai.com/> [11 พฤษภาคม 2554]
- [6] สารานุกรมเสรี. แกลบข้าว. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา : <http://th.wikipedia.org/wiki/> [11 พฤษภาคม 2554]
- [7] คชินท์ สายอินทวงศ์. แกลบ วัสดุดีบมหัสจรรย์สำหรับงานเซรามิก. [ออนไลน์] แหล่งที่มา : [http://www.thaiceramicsociety.com/rm\\_paint\\_chaff.php](http://www.thaiceramicsociety.com/rm_paint_chaff.php) [2551]
- [8] Ciesielczyk F., Krysztafiewicz A. and Jesionowsk T., Magnesium silicates – adsorbents of organic compounds, Applied Surface Science. vol. 253 (20). pp.8435-8442, 2007
- [9] Kalapathy, U., Proctor, A., and Shultz, J., A simple method for production of pure silica from rice hull ash. Bioresource Technology 73. pp. 257 – 262, 2000
- [10] เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552
- [11] Barry C., John T., Adsorption Technology and Design. Butterworth-Heinemann, 1998
- [12] Surface Area and Porosity Analyzer (BET). Department of Chemical Technology. Faculty of Science Chulalongkorn University. [Online].

- Available : [http://www.sc.chula.ac.th/department/chemical\\_technology](http://www.sc.chula.ac.th/department/chemical_technology)  
[2011, November 16]
- [13] Memoirs of Metal Oxide Catalyst Research Group. Surface Area and Porosity Analyzer (BET). [Online]. 2011. Available :  
<http://tamagozilla.blogspot.com/2010/11/bet-mo-memoir-saturday-27-november-2553.html> [2012, March 10]
- [14] Integrity Testing Laboratory. X-ray Fluorescence (EDXRF or XRF) Spectrometry. [Online]. Available : <http://www.itlinc.com/xrf.html>. [2012, March 10]
- [15] X-ray Diffractometer XRD. Scientific & Technological Instruments Center Mae Fah Luang University. [Online]. 2011. Available : <http://www.mfu.ac.th/center>  
[2012, March 10]
- [16] Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Faculty of Science Naresuan University. [Online]. Available : <http://www.sci.nu.ac.th/slc/tools.php>  
[2012, March 10]
- [17] Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Department of Chemical Technology, Faculty of Science Chulalongkorn University. [Online]. 2011 Available : [http://www.sc.chula.ac.th/department/chemical\\_technology/](http://www.sc.chula.ac.th/department/chemical_technology/)  
[2012, March 10]
- [18] นางสาวศุภรัตน์ ก๊กเครือ. การศึกษาเตรียมแผ่นสารดูดความชื้นเพื่อใช้ในการลดภาวะความชื้นที่ผ่านหลังคา. สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ. คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546
- [19] ศรีไฉล ขุนทนต์, สุพิณ ต่างวิวัฒน์, โสภณ เรืองสำราญ. ประโยชน์ของซีเมนต์ต่อการผลิตซิลิกาเจลดูดความชื้น. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540
- [20] Dongmin A., Yupeng G., Bo Z., Yanchao Z., Zichen W., A study on the consecutive preparation of silica powders and active carbon from rice husk ash, College of Chemistry, Jilin University, Qianjin street 2699. Changchun 130012. China, 2011

- [21] สุภาพ ศิปปคัมภีรภาพ และ สุพจน์ อ้วนเจริญกุล. การเตรียมและตรวจสอบคุณภาพของ ซิลิกาเจลที่ได้จากเถ้าแกลบ. ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537
- [22] สันติ รัตนวีรนนท์. เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2547
- [23] Kyle E., Michael R., Adsorption of Water from Liquid-Phase Ethanol-Water Mixtures at Room Temperature Using Starch-Based Adsorbents, J. Eng. Chem. Res.40. pp. 2112-2115, 2001

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ผลการทดลองการสังเคราะห์ซิลิกาเจลจากแกลบ

ตาราง ก.1 การเผาแกลบที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	เฉลี่ย
น้ำหนักครุฑซีเปิด (กรัม)	187.0311	174.8735	181.1058	177.7338	177.6164	181.0091	181.0618	177.6752	179.7633
น้ำหนักแกลบก่อนเผา (กรัม)	30.46	30.65	30.48	30.48	30.54	30.41	30.47	30.60	30.51
น้ำหนักแกลบหลังเผา (กรัม)	6.69	6.41	6.32	6.35	6.54	6.49	6.46	6.49	6.47

ตาราง ก.2 การเผาถั่วดำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	เฉลี่ย
น้ำหนักครุฑซีเปิด (กรัม)	181.0424	177.6602	181.1016	177.6939	177.694	181.1016	177.6949	181.1033	179.3865
น้ำหนักแกลบก่อนเผา (กรัม)	30.50	30.41	30.56	30.77	30.57	30.58	30.45	30.55	30.55
น้ำหนักแกลบหลังเผา (กรัม)	19.67	19.79	20.51	20.40	17.68	18.33	19.20	19.37	19.37

ตาราง ก.3 การเผาแกลบที่ผ่านการแช่กรดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	เฉลี่ย
น้ำหนักครุชิบีล (กรัม)	187.2532	177.2623	177.2443	187.2023	177.2200	181.6139	177.2274	181.6132	180.8296
น้ำหนักแกลบก่อนเผา (กรัม)	30.54	30.57	30.55	30.6	30.52	30.64	30.64	30.59	30.58
น้ำหนักแกลบหลังเผา (กรัม)	6.43	6.53	6.63	6.13	6.79	6.61	6.17	6.25	6.44

ตาราง ก.4 การเผาเถ้าดำที่ผ่านการแช่กรดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

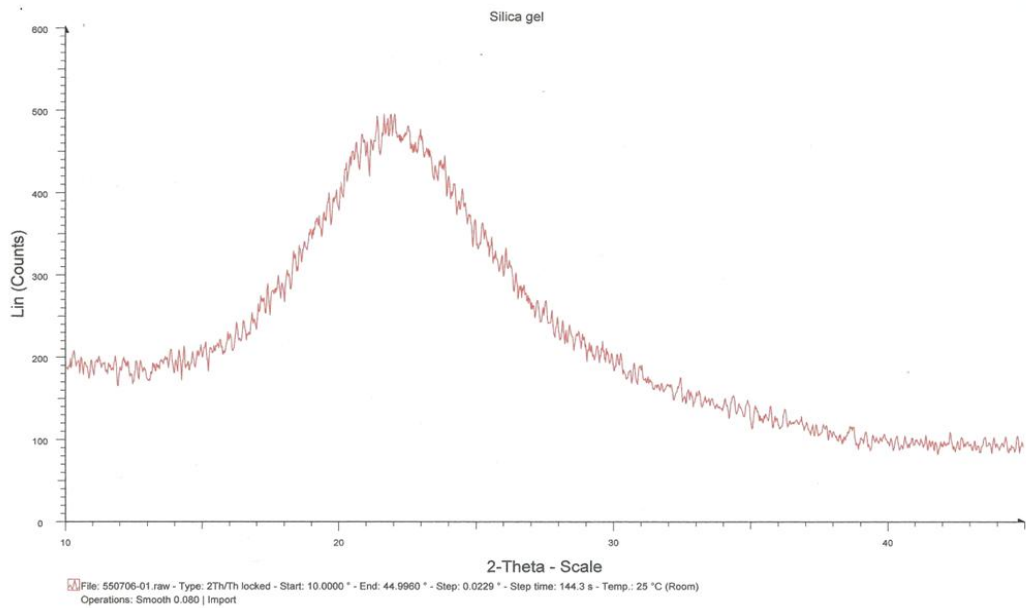
ครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	เฉลี่ย
น้ำหนักครุชิบีล (กรัม)	168.6329	180.9917	168.6329	180.9917	168.6329	180.9917	168.6329	180.9917	174.8123
น้ำหนักแกลบก่อนเผา (กรัม)	30.28	30.40	30.48	30.44	30.20	30.65	30.13	30.6	30.4
น้ำหนักแกลบหลังเผา (กรัม)	18.48	18.59	18.60	18.43	18.23	18.55	18.19	18.5	18.44

ตาราง ก.5 การตกผลึกซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบในกระบวนการต่างๆ

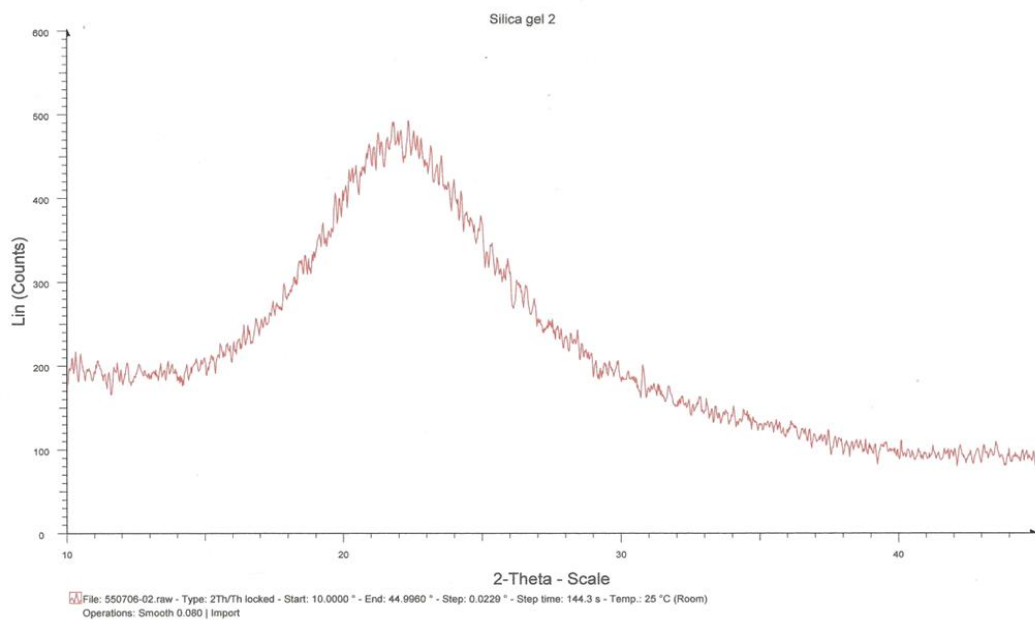
ชนิด	ซิลิกาเจล 1	ซิลิกาเจล 2	ซิลิกาเจล 3	ซิลิกาเจล 4
เถ้าขาว (กรัม)	25.0470	25.0656	25.1284	25.0797
ตะกอน (กรัม)	3.9532	0.0370	4.3293	0.5124
ซิลิกาเจล (กรัม)	20.1847	22.9313	20.0561	21.8385



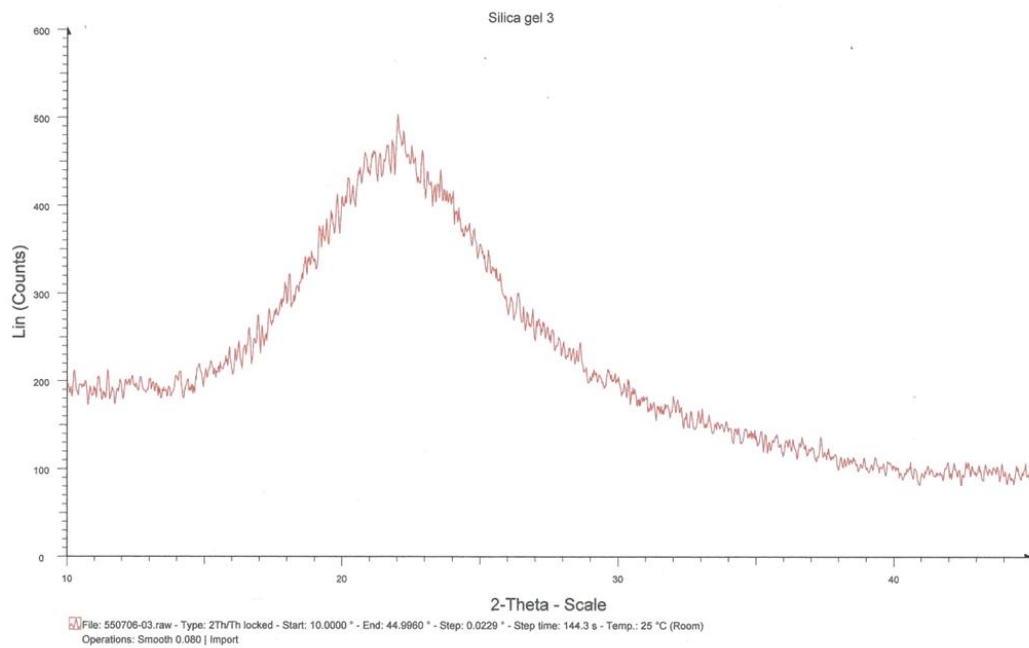
### ภาคผนวก ข. ผลการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างผงซิลิกาเจล



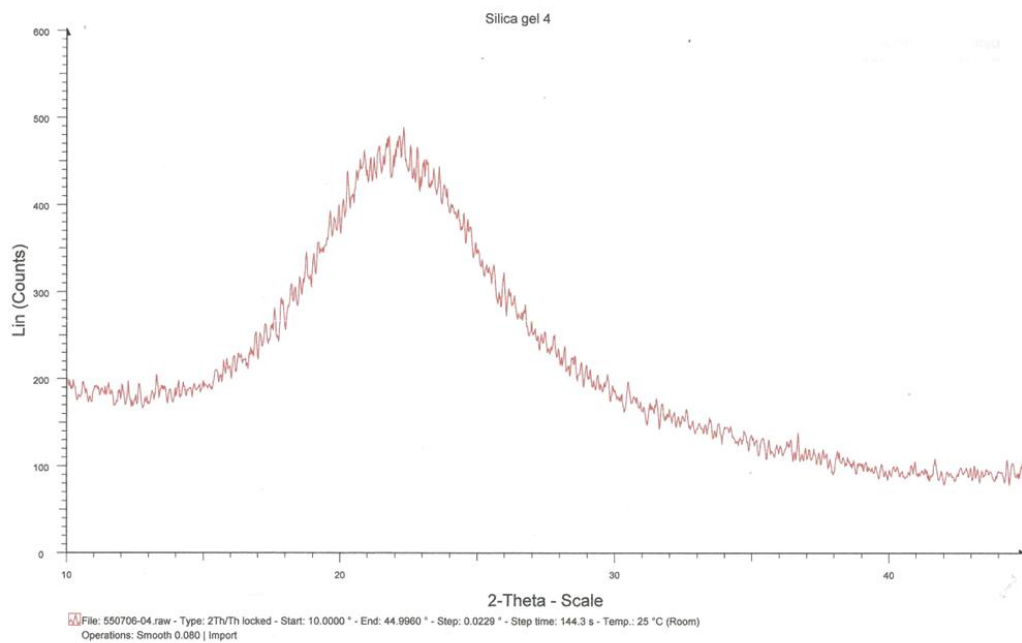
#### รูปที่ ข.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 1 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์



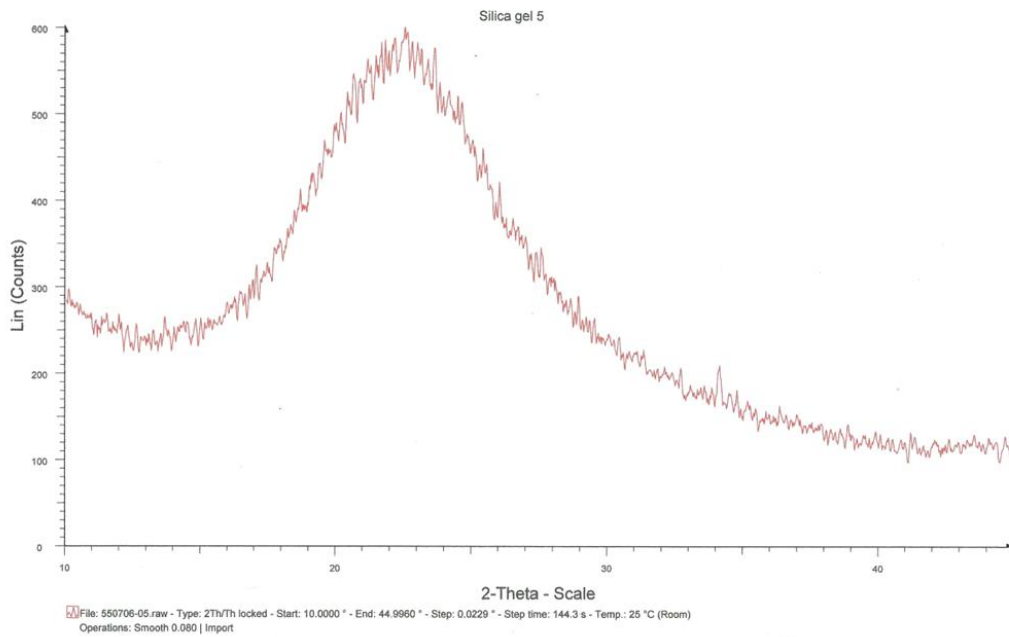
#### รูปที่ ข.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 2 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์



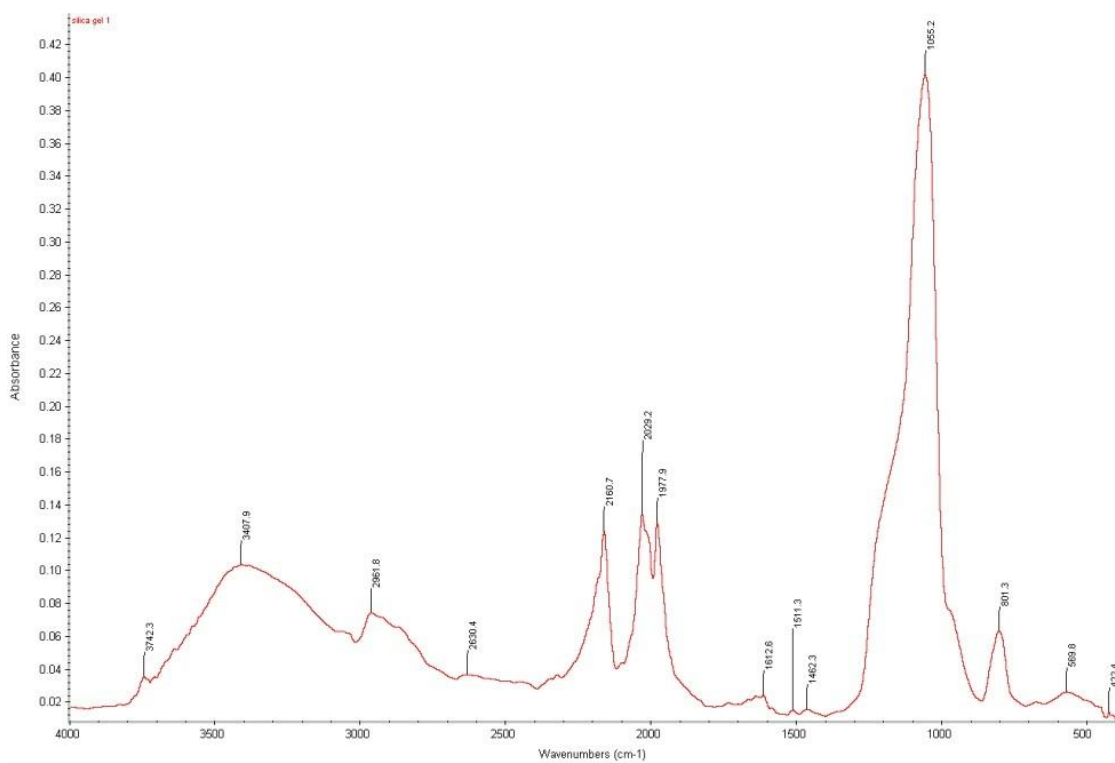
รูปที่ ข.3 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 3 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์



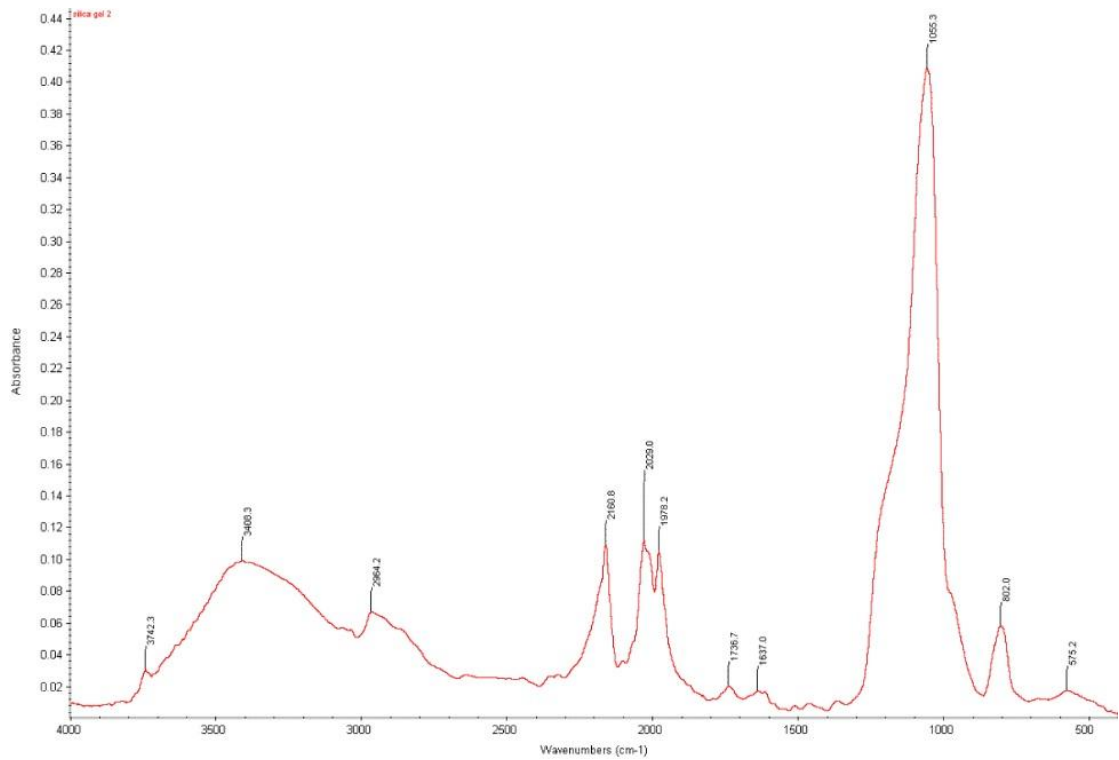
รูปที่ ข.4 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 4 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์



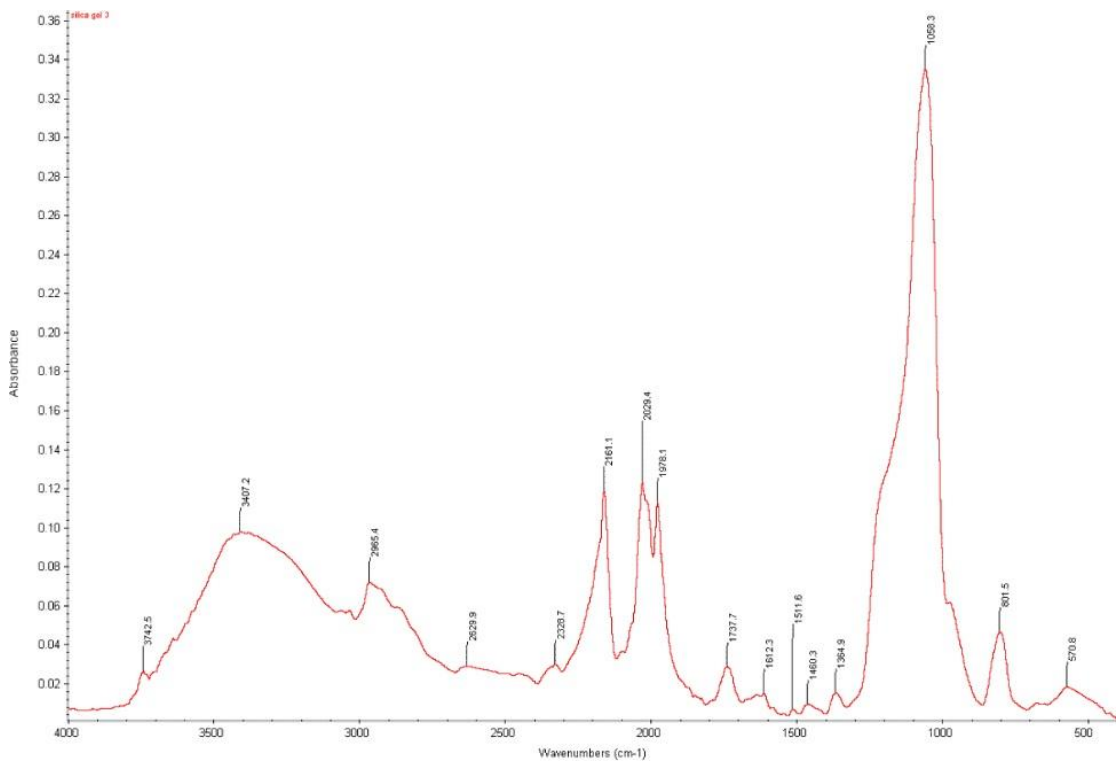
รูปที่ ข.5 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 5 ด้วยเครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์



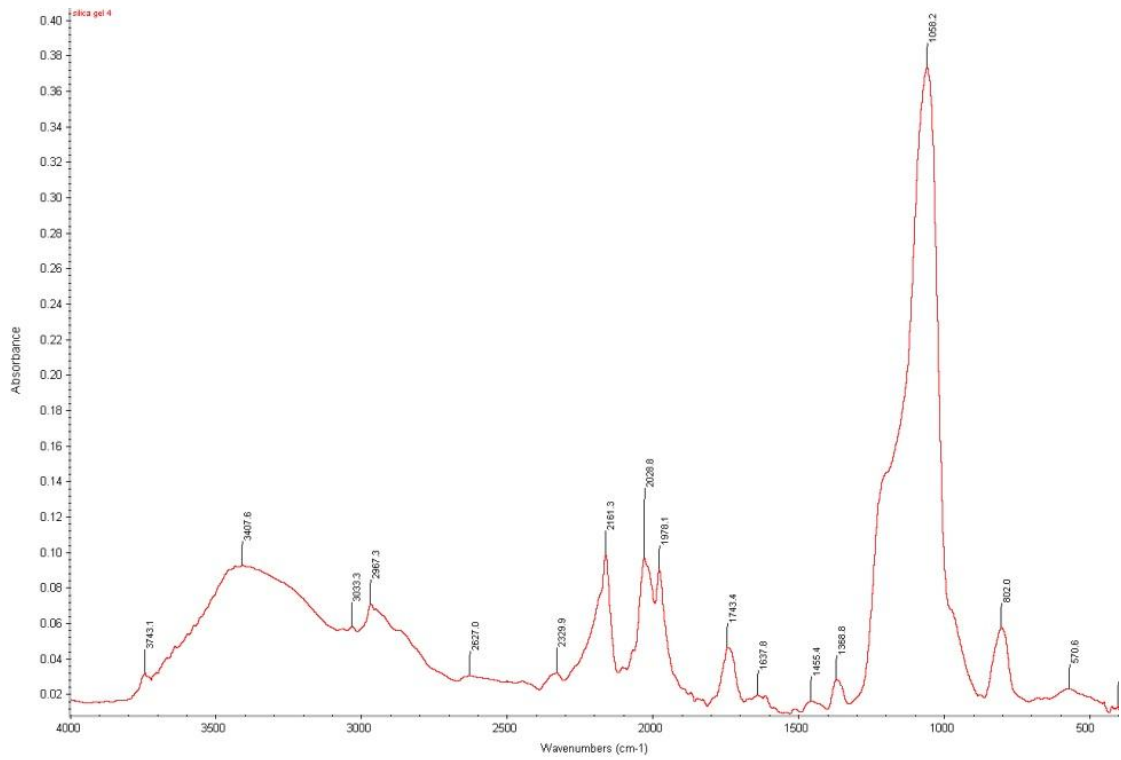
รูปที่ ข.6 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 1 ด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์



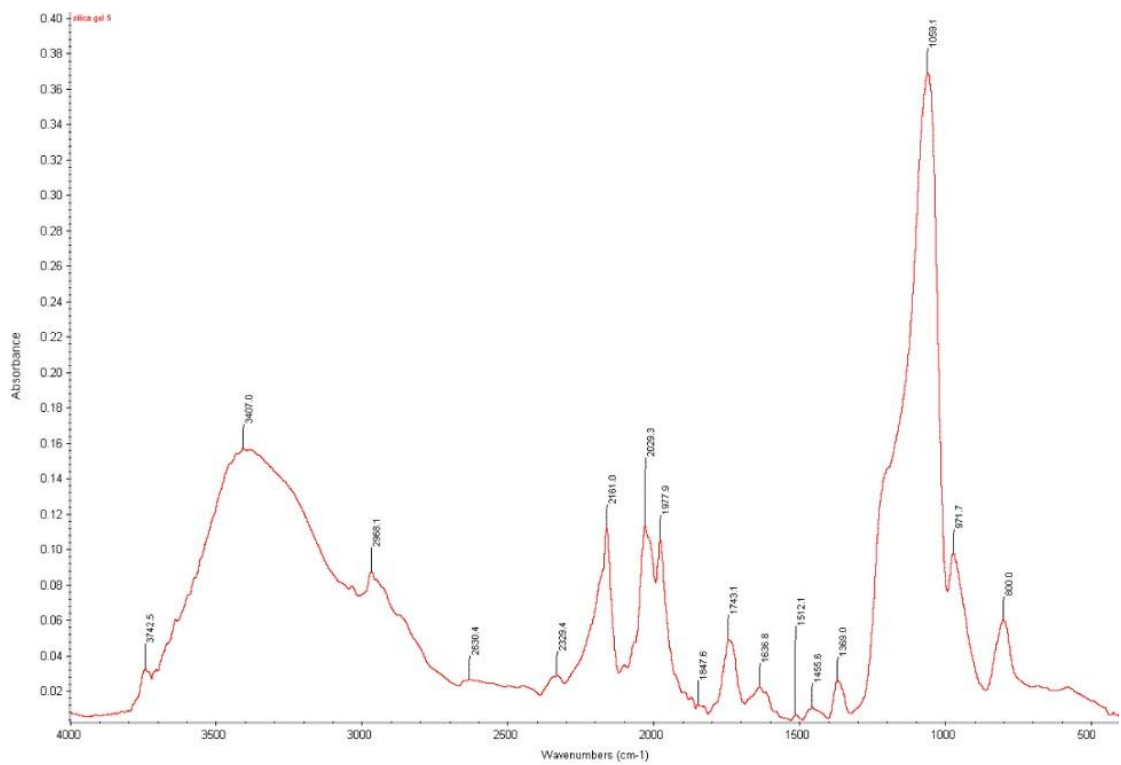
รูปที่ ข.7 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 2 ด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์



รูปที่ ข.8 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 3 ด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์



รูปที่ ข.9 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 4 ด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์

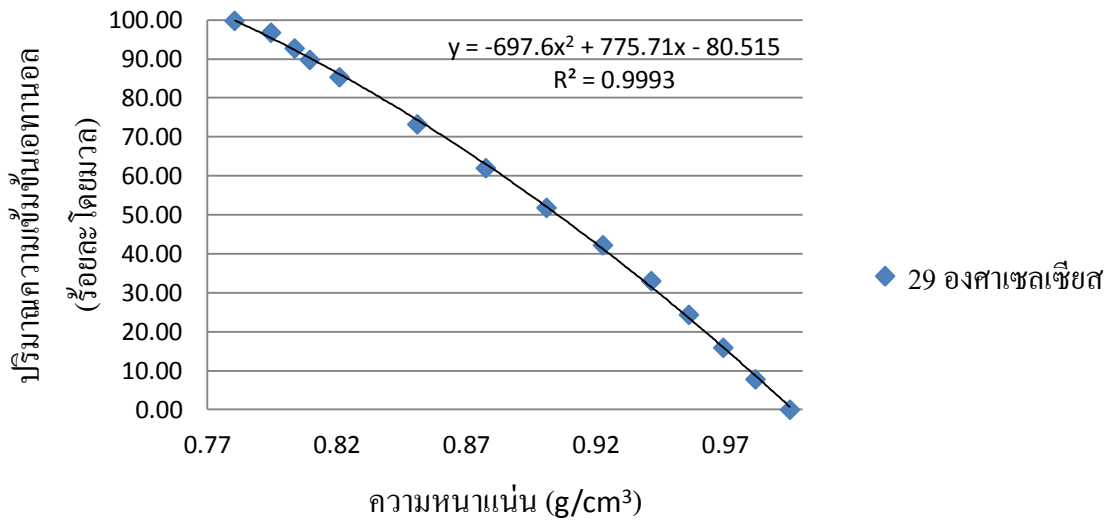


รูปที่ ข.10 ผลการตรวจวิเคราะห์ผงซิลิกาเจล 5 ด้วยเครื่องเอฟทีไออาร์

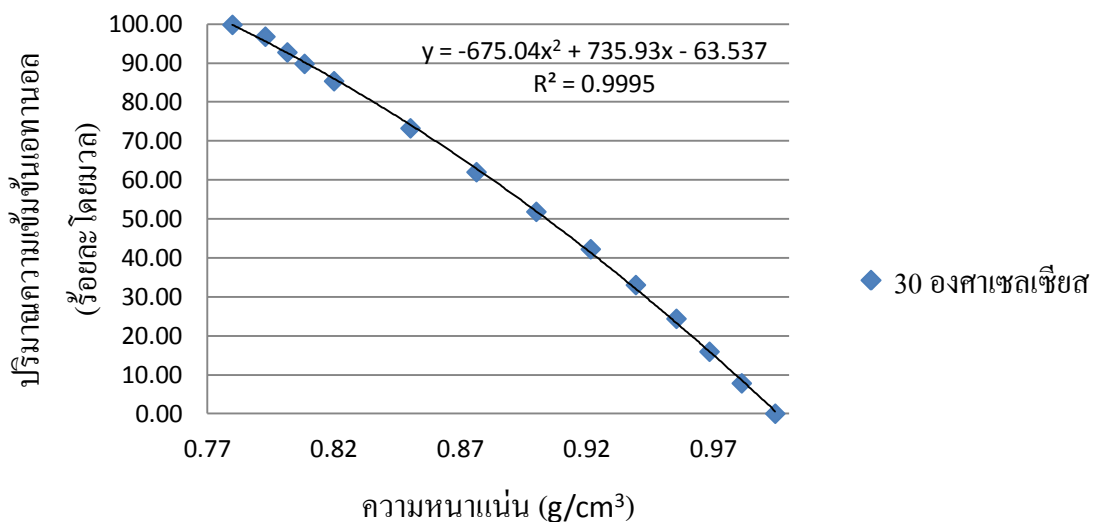
ภาคผนวก ค. ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำโดยวิธีวัดความหนาแน่น  
 ตารางที่ ค.1 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำที่อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ปริมาตร เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ปริมาตร น้ำ (cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก เอทานอล (g)	น้ำหนัก น้ำ (g)	ความเข้มข้น เอทานอลจริง (%)	อุณหภูมิ 29 °C		อุณหภูมิ 30 °C		อุณหภูมิ 30 °C	
						น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
99.8	50	0	39	0	99.8	8.0915	0.78058	8.0854	0.77999	8.0651	0.77803
97.5	48.75	1.25	37.7887	1.2613	96.77	8.2374	0.79466	8.2205	0.79303	8.2104	0.79205
95.5	47.75	2.25	37.0029	2.8999	92.73	8.332	0.80378	8.3105	0.80171	8.2948	0.80019
92.5	46.25	3.75	36.2455	4.1191	89.8	8.3926	0.80963	8.3811	0.80852	8.3699	0.80744
90.0	45	5	34.8990	5.9923	85.35	8.5114	0.82109	8.502	0.82018	8.4964	0.81964
80.0	40	10	30.9677	11.3056	73.26	8.8228	0.85113	8.8152	0.8504	8.7955	0.8485
70.0	35	15	27.0570	16.5829	62	9.0972	0.8776	9.0858	0.8765	9.0702	0.875
60.0	30	20	23.2191	21.5901	51.82	9.3401	0.90103	9.3310	0.90015	9.3207	0.89916
50.0	25	25	19.3831	26.5264	42.22	9.566	0.92282	9.5540	0.92167	9.542	0.92051
40.0	20	30	15.4742	31.3762	33.03	9.7594	0.94148	9.7390	0.93951	9.7315	0.93879
30.0	15	35	11.6063	36.0413	24.36	9.9099	0.956	9.9054	0.95557	9.9014	0.95518
20.0	10	40	7.7015	40.7131	15.91	10.0475	0.96927	10.041	0.96865	10.0357	0.96814
10.0	5	45	3.8146	45.0909	7.8	10.1764	0.98171	10.1731	0.98139	10.1664	0.98074
0.0	0	50	0	49.6912	0	10.3146	0.99504	10.3104	0.99464	10.3062	0.99423

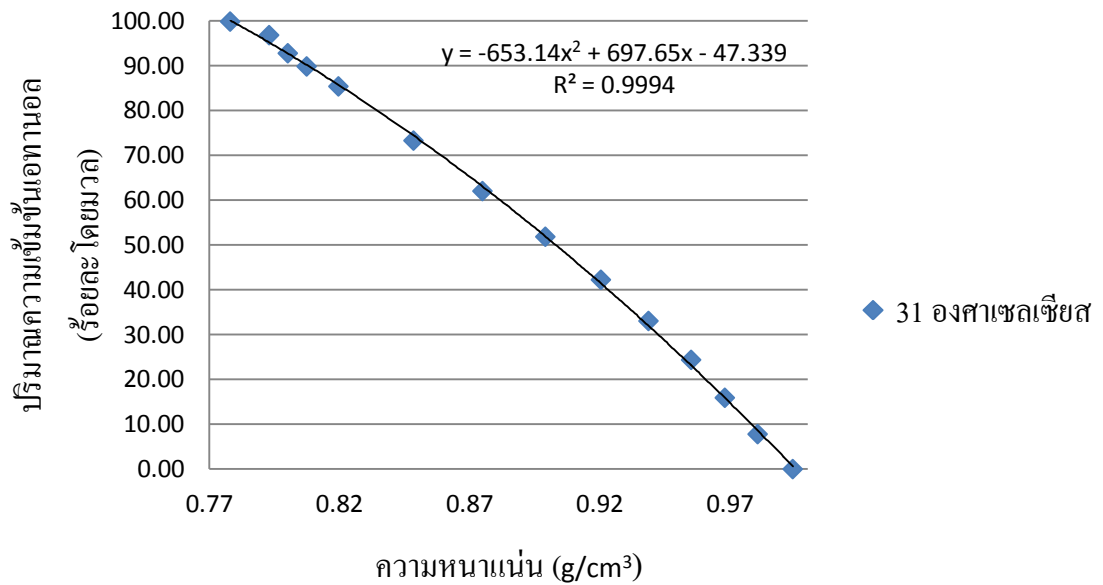
นำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นและความหนาแน่นของของผสมเอทานอลกับน้ำ



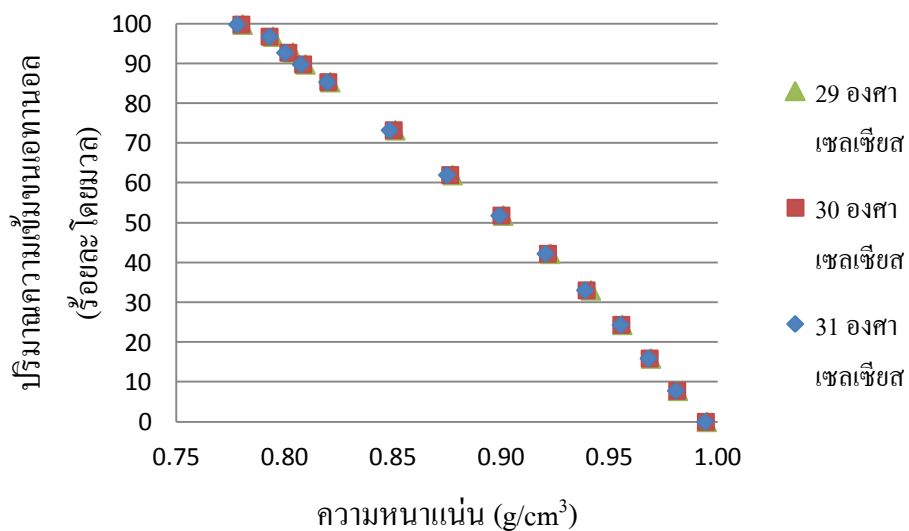
รูปที่ ค.1 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นและความหนาแน่นของของผสมเอทานอลกับน้ำที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.2 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นและความหนาแน่นของของผสมเอทานอลกับน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.3 กราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นและความหนาแน่นของของผสมเอทานอลกับน้ำที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับความเข้มข้นของของผสมเอทานอลปนน้ำ ด้วยวิธีวัดความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 29-31 เซลเซียส



ภาคผนวก ง. ผลการดูดซับชั้นน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบและผงซิลิกาเจลพาณิชย์

ง.1 ผลการดูดซับชั้นน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกานเจลสังเคราะห์จากแคลบ (SG)

ตารางที่ ง.1 การดูดซับชั้นน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแคลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:4 (SG25)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกา เจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.80127	30	92.74
1	10	112.5754	5.0156	19.8356	24.8552	14.3114	17.9	10.642	0.80039	30	93.05
2	20	108.3439	5.0247	19.8433	24.8711	14.1707	17.9	10.6625	0.79995	30	93.2
3	30	108.2672	5.0206	19.8692	24.8904	14.1109	17.8	10.6057	0.79992	30	93.21
4	40	106.1659	5.0197	19.8827	24.9077	14	17.7	10.4844	0.79982	30	93.24
5	50	106.2599	5.0142	19.8633	24.8577	13.8722	17.5	10.8588	0.79986	30	93.23
6	60	111.2248	5.0168	19.866	24.8877	13.85	17.5	10.903	0.79978	30	93.26
7	90	110.3963	5.0158	19.8655	24.8824	13.8003	17.4	10.8143	0.7998	30	93.25
8	120	107.9820	5.0257	19.8577	24.8411	13.7891	17.4	11.0131	0.7997	30	93.28

ตารางที่ ง.2 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:5 (SG20)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกา เจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.80119	30	92.77
1	10	112.5022	4.0134	19.8418	23.8552	15.0011	19	8.8066	0.80045	30	93.03
2	20	108.2653	4.0113	19.8658	23.8771	14.9994	19	8.9082	0.8001	30	93.15
3	30	108.1953	4.0143	19.8576	23.8719	14.9582	19	8.8961	0.80006	30	93.16
4	40	106.0887	4.0153	19.8527	23.868	14.932	18.9	8.897	0.80002	30	93.17
5	50	106.192	4.0174	19.8734	23.8908	14.9347	18.9	8.8813	0.79996	30	93.19
6	60	111.1535	4.0173	19.8877	23.905	14.9326	18.9	8.8912	0.79992	30	93.21
7	90	110.3098	4.0139	19.8454	23.8593	14.8862	18.8	8.8952	0.79994	30	93.2
8	120	98.8822	4.0223	19.883	23.9053	14.9092	18.8	8.9039	0.79986	30	93.23

ตารางที่ ง.3 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:6 (SG17)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกา เจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.80135	30	92.72
1	10	112.4912	3.3402	19.9003	23.2762	15.8889	20.2	7.2339	0.80046	30	93.02
2	20	108.2676	3.3344	19.8601	23.2225	15.7576	20.1	7.1919	0.80021	30	93.11
3	30	108.1922	3.3425	19.8969	23.2696	15.7463	20.1	7.2896	0.80012	30	93.14
4	40	106.1146	3.343	19.8833	23.2545	15.7300	20.1	7.224	0.8001	30	93.15
5	50	106.2095	3.353	19.8604	23.227	15.6901	20.1	7.2089	0.80008	30	93.15
6	60	111.1638	3.3442	19.8854	23.2488	15.6900	20.1	7.1418	0.80005	30	93.16
7	90	110.3271	3.3302	19.7782	23.1252	15.5705	20	7.3721	0.80002	30	93.17
8	120	107.9083	3.3307	19.8819	23.2038	15.6633	20.1	7.2927	0.79992	30	93.21

ตารางที่ ง.4 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:7 (SG14)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกา เจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0								0.8014	30	92.7
1	10	112.4755	2.8598	19.8518	22.7277	16.4395	20.7	6.2094	0.80069	30	92.94
2	20	108.2498	2.8583	19.8266	22.7017	16.3573	20.6	6.3175	0.80058	30	93.1
3	30	108.1772	2.8537	19.8752	22.7402	16.3806	20.6	6.2814	0.80015	30	93.13
4	40	106.077	2.853	19.8921	22.7524	16.3433	20.6	6.3462	0.80026	30	93.09
5	50	106.1722	2.8544	19.8966	22.7216	16.3076	20.6	6.2762	0.80012	30	93.14
6	60	111.124	2.8544	19.912	22.782	16.2774	20.5	6.4639	0.79986	30	93.16
7	90	110.3061	2.8554	19.8859	22.7453	16.2392	20.5	6.3157	0.80019	30	93.15
8	120	107.8872	2.8517	19.8981	22.7603	16.2255	20.5	6.3709	0.8	30	93.18

ตารางที่ ง.5 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:8 (SG13)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกา เจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.80128	30	92.74
1	10	112.4609	2.5116	19.8786	22.4753	16.9536	21.5	5.4712	0.80063	30	92.97
2	20	108.2404	2.5127	19.9292	22.5381	16.9112	21.5	5.5095	0.80021	30	93.11
3	30	108.1652	2.5157	19.8967	22.4584	16.7684	21.4	5.5310	0.80014	30	93.13
4	40	106.0586	2.515	19.8917	22.4765	16.653	21.4	5.4970	0.80012	30	93.14
5	50	106.1624	2.5176	19.957	22.5142	16.6606	21.35	5.5509	0.80016	30	93.12
6	60	111.1189	2.5151	19.937	22.5035	16.6747	21.35	5.4426	0.80013	30	93.14
7	90	110.2883	2.5186	19.9393	22.5159	16.5883	21.3	5.4041	0.80014	30	93.13
8	120	107.8737	2.5105	19.8749	22.4859	16.5460	21.3	5.5658	0.8001	30	93.15

ตารางที่ ง.6 การดูดซับชั้นน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:9 (SG11)

ชนิดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกา เจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0								0.80108	30	92.81
1	10	112.4746	2.2227	19.9236	22.1651	17.127	21.7	5.0229	0.80059	30	92.97
2	20	108.2530	2.2234	19.9508	22.1926	17.0954	21.7	4.9908	0.80038	30	93.05
3	30	108.1838	2.2212	19.9383	22.1726	17.0721	21.7	4.9719	0.80052	30	93.05
4	40	106.0752	2.2211	19.9174	22.1405	17.0345	21.6	5.0387	0.80036	30	93.06
5	50	106.1741	2.225	19.9059	22.1529	16.9867	21.6	4.9802	0.80024	30	93.1
6	60	111.1327	2.2309	19.9176	22.1622	16.963	21.6	5.0032	0.80023	30	93.1
7	90	110.3095	2.2286	19.9057	22.1494	16.9462	21.5	4.8648	0.80021	30	93.11
8	120	107.8755	2.2267	19.8698	22.183	16.9153	21.5	4.969	0.80014	30	93.13

ตารางที่ ง.7 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากเกลบที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:10 (SG10)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกา เจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.8012	30	92.77
1	10	112.5022	2.0207	19.8823	21.9	17.5469	22	4.7462	0.80067	30	92.95
2	20	108.2653	2.0146	19.87	21.883	17.4246	21.9	4.5781	0.80039	30	93.05
3	30	108.1953	2.0153	19.8643	21.8696	17.3664	21.9	4.5985	0.80031	30	93.08
4	40	106.0887	2.0148	19.8209	21.805	17.3005	21.8	4.5315	0.80034	30	93.07
5	50	106.1920	2.0139	19.8566	21.8304	17.2718	21.8	4.5225	0.80026	30	93.09
6	60	111.1535	2.0193	19.8693	21.8801	17.1825	21.75	4.6838	0.80025	30	93.09
7	90	110.3098	2.0197	19.886	21.9	17.1588	21.7	4.7293	0.80023	30	93.1
8	120	98.8822	2.013	19.873	21.8794	17.1314	21.7	4.7482	0.80021	30	93.11

ง.2 ผลการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์ (SCG)

ตารางที่ ง.8 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:4 (SGC25)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกา เจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.80096	30	92.85
1	10	112.5538	5.0166	19.8032	24.7898	10.9899	13.8	13.6857	0.80039	30	93.05
2	20	108.2788	5.0207	19.8553	24.8845	10.9845	13.8	14.1174	0.79971	30	93.28
3	30	108.2124	5.0289	19.835	24.8729	10.9298	13.7	13.8902	0.79942	30	93.38
4	40	106.1053	5.0032	19.8133	24.8261	10.9075	13.7	13.6888	0.79944	30	93.37
5	50	106.2048	5.0324	19.7911	24.8775	10.827	13.6	13.7724	0.79934	30	93.41
6	60	111.1688	5.026	19.8687	24.8958	10.8941	13.7	13.5879	0.79939	30	93.39



ตารางที่ ง.9 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:5 (SGC20)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกา เจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.80098	30	92.82
1	10	112.5339	4.0552	19.8348	23.2043	12.7578	16	10.4265	0.80054	30	92.99
2	20	108.3128	4.091	19.8462	23.8706	12.6088	15.9	11.2518	0.79994	30	93.2
3	30	108.2386	4.0382	19.865	23.9619	12.6392	15.9	11.3527	0.79966	30	93.3
4	40	106.1351	4.0382	19.8524	23.8975	12.5926	15.8	11.1049	0.7997	30	93.28
5	50	106.2307	4.0817	19.8502	23.9411	12.525	15.8	11.1506	0.79956	30	93.33
6	60	111.1982	4.0835	19.8306	23.9223	12.5024	15.7	11.162	0.79965	30	93.3

ตารางที่ ง.10 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:6 (SGC17)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกาเจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.80097	30	92.85
1	10	112.5339	3.3897	19.8302	23.2229	13.9455	17.1	9.4534	0.80059	30	92.98
2	20	108.3128	3.3936	19.8387	23.2395	13.8344	17	9.585	0.8001	30	93.15
3	30	108.2386	3.3805	19.8074	23.1917	13.8103	16.8	9.7391	0.79987	30	93.23
4	40	106.1336	3.3703	19.8464	23.2205	13.8097	16.8	9.7029	0.79983	30	93.24
5	50	106.2301	3.3635	19.8598	23.2287	13.7947	16.75	9.7504	0.79978	30	93.26
6	60	111.1942	3.38	19.8709	23.2546	13.7878	16.75	9.4589	0.7998	30	93.25

ตารางที่ ง.11 การดูดซับชั้นน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:7 (SGC14)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกาเจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.8011	30	92.8
1	10	112.5164	2.8877	19.816	22.7417	14.9237	18.9	7.7736	0.80063	30	92.97
2	20	108.2973	2.8684	19.7779	22.6698	14.8032	18.8	7.911	0.80033	30	93.07
3	30	108.2196	2.873	19.8085	22.7114	14.705	18.7	8.3453	0.8001	30	93.15
4	40	106.1175	2.8725	19.845	22.7457	14.6893	18.7	8.3117	0.80005	30	93.16
5	50	106.2183	2.8909	19.7885	22.7073	14.5815	18.6	8.4232	0.79996	30	93.19
6	60	111.1826	2.8840	19.794	22.7044	14.5833	18.6	8.2576	0.7999	30	93.22

ตารางที่ ง.12 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:8 (SGC13)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกาเจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.80084	30	92.89
1	10	112.4928	2.5312	19.8307	22.3818	15.462	19.5	6.8432	0.80043	30	93.03
2	20	108.2767	2.5278	19.8218	22.3629	15.3891	19.4	7.0092	0.80037	30	93.06
3	30	108.2014	2.5222	19.8141	22.35	15.3341	19.4	6.9079	0.80018	30	93.12
4	40	106.0968	2.5342	19.7908	22.341	15.224	19.3	6.9164	0.80016	30	93.13
5	50	106.1958	2.5224	19.8585	22.401	15.3068	19.4	7.4162	0.8001	30	93.15
6	60	111.1642	2.5261	19.7993	22.3363	15.2265	19.3	7.3486	0.80002	30	93.17

ตารางที่ ง.13 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:9 (SGC11)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกาเจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.80097	30	92.85
1	10	112.4879	2.2268	19.8569	22.1009	16.0038	20.1	6.1568	0.80046	30	93.02
2	20	108.2664	2.2212	19.8388	22.0774	15.9573	20	6.0732	0.80038	30	93.05
3	30	108.1943	2.2218	19.8312	22.0567	15.8392	19.8	6.0621	0.80023	30	93.1
4	40	106.0949	2.2232	19.8327	22.0699	15.7903	19.8	6.2983	0.8002	30	93.11
5	50	106.1982	2.2229	19.8123	22.0467	15.7638	19.8	6.021	0.80012	30	93.13
6	60	111.1672	2.2181	19.8199	22.0402	15.7806	19.8	6.0066	0.8001	30	93.15

ตารางที่ ง.14 การดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์ที่อัตราส่วนตัวดูดซับ 1:10 (SGC10)

ขวดที่	เวลา (min)	นน.ขวด (g)	ก่อน			หลัง			ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)
			ผงซิลิกาเจล (g)	เอทานอล (g)	รวม (g)	เอทานอล (g)	เอทานอล (cm <sup>3</sup> )	ผงซิลิกาเจล (g)			
Base	0	-	-	-	-	-	-	-	0.8009	30	92.83
1	10	112.4988	2.0099	19.8286	21.7385	16.2394	20.7	5.4777	0.80054	30	93
2	20	108.2792	2.002	19.8293	21.8352	16.2194	20.7	5.4073	0.80039	30	93.05
3	30	108.209	2.0006	19.8372	21.8642	16.2038	20.6	5.4615	0.8002	30	93.11
4	40	106.1098	2.0011	19.7925	21.8213	16.1248	20.6	5.6292	0.80024	30	93.1
5	50	106.1221	2.0107	19.7866	21.8267	16.0838	20.6	5.8537	0.80018	30	93.12
6	60	111.179	2.0017	19.8168	21.8075	16.1300	20.6	5.594	0.80016	30	93.13

ภาคผนวก จ. การคำนวณสมดุลดูดซับและปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุล

จ.1 การคำนวณความเข้มข้นที่สมดุล

สมการแบบจำลองความเข้มข้นสมดุล

$$\frac{c_o - c}{c_o - c_e} = \frac{bt}{1 + bt} \quad (จ.1)$$

และสามารถเขียนสมการเชิงเส้นเพื่อหาความเข้มข้นที่สมดุลได้ดังนี้

$$\frac{1}{c - c_o} = \left( \frac{1}{b(c_e - c_o)} \right) \left( \frac{1}{t} \right) + \left( \frac{1}{c_e - c_o} \right) \quad (จ.2)$$

โดย  $C_o$  คือ ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ เริ่มต้น  
(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

$C$  คือ ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ หลังการดูดซับ  
(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ ที่สมดุล (เปอร์เซ็นต์  
โดยน้ำหนัก)

$b$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับ

$t$  คือ เวลา (นาที)

ตารางที่ จ.1 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุลของการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

อัตราส่วน	สมการ	$r^2$	$c_e$	b
SG20	$y=14.185x+1.694$	0.9365	93.33	0.119
SG17	$y=17.207x+2.018$	0.954	93.27	0.117
SG14	$y=12.834x+2.009$	0.9731	93.22	0.157
SG13	$y=32.619x+1.960$	0.9017	93.21	0.06
SC11	$y=28.759x+2.310$	0.868	93.17	0.08
SG10	$y=32.363x+2.923$	0.9611	93.15	0.09
SG09	$y=32.923x+2.678$	0.9375	93.14	0.081

ตารางที่ จ.2 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ ในการคำนวณหาความเข้มข้นที่สมดุลของการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์

อัตราส่วน	สมการ	$r^2$	$c_e$	b
SGC20	$y=38.820x+0.877$	0.9353	93.99	0.023
SGC17	$y=55.515x+0.882$	0.932	93.95	0.016
SGC14	$y=63.979x+0.914$	0.9411	93.94	0.014
SGC13	$y=41.880x+1.651$	0.9939	93.41	0.039
SGC11	$y=43.082x+3.067$	0.9413	93.22	0.071
SGC10	$y=30.147x+3.041$	0.9393	93.18	0.101
SGC09	$y=30.935x+2.818$	0.9744	93.18	0.091



## จ.2 การคำนวณปริมาณดูดจำเพาะของเอทานอลและน้ำ

คำนวณปริมาณการดูดซับของเอทานอลในของผสมเอทานอล-น้ำ ในถ่านดูดซับได้ดังนี้

$$q_{EOH} = \frac{M_1 C_1 - M_2 C_2}{100M} \quad (จ.3)$$

คำนวณปริมาณการดูดซับของน้ำในของผสมเอทานอล-น้ำในถ่านดูดซับได้ดังนี้

$$q_{H_2O} = \frac{M_1(100 - C_1) - M_2(100 - C_2)}{100M} \quad (จ.4)$$

โดย  $q_{EOH}$  คือ มวลเอทานอลที่ถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)

$q_{H_2O}$  คือ มวลน้ำที่ถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)

$C_1$  คือ ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ ก่อนการดูดซับ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

$C_2$  คือ ความเข้มข้นของของผสมเอทานอล-น้ำ หลังการดูดซับ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

$M_1$  คือ มวลของของผสมเอทานอล-น้ำ ก่อนการดูดซับ (กรัม)

$M_2$  คือ มวลของของผสมเอทานอล-น้ำ หลังการดูดซับ (กรัม)

$M$  คือ มวลตัวดูดซับ (กรัม)

การคำนวณหาปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำจากผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จาก  
 แกลบ

ตารางที่ ๑.3 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG25)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	93.05	6.95	1.0126	0.0888
20	93.2	6.8	1.034	0.0949
30	93.21	6.79	1.0505	0.0965
40	93.24	6.76	1.0729	0.099
50	93.23	6.77	1.0945	0.1003
60	93.26	6.74	1.0978	0.1014
90	93.25	6.75	1.1074	0.1018
120	93.28	6.72	1.105	0.1025

ตารางที่ ๑.4 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG20)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	93.03	6.97	1.1092	0.0969
20	93.15	6.85	1.1113	0.1019
30	93.16	6.84	1.1177	0.1028
40	93.17	6.83	1.122	0.1035
50	93.19	6.81	1.1248	0.1045
60	93.21	6.79	1.1279	0.1055
90	93.2	6.8	1.1302	0.1053
120	93.23	6.77	1.1301	0.1065

ตารางที่ ๑.5 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG17)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	93.02	6.98	1.0992	0.1017
20	93.11	6.89	1.1224	0.108
30	93.14	6.86	1.1316	0.1102
40	93.15	6.85	1.1317	0.1107
50	93.15	6.85	1.1331	0.1107
60	93.16	6.84	1.1426	0.112
90	93.17	6.83	1.1505	0.113
120	93.21	6.79	1.1513	0.1153

ตารางที่ ๑.6 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG14)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.94	7.06	1.0923	0.1009
20	93.1	6.9	1.1023	0.1115
30	93.13	6.87	1.1105	0.1141
40	93.09	6.91	1.1307	0.1131
50	93.14	6.86	1.1404	0.1169
60	93.16	6.84	1.1541	0.1192
90	93.15	6.85	1.1583	0.1188
120	93.18	6.82	1.1665	0.1213

ตารางที่ ๑.7 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG13)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.97	7.03	1.0645	0.1001
20	93.11	6.89	1.089	0.1121
30	93.13	6.87	1.1272	0.1163
40	93.14	6.86	1.1678	0.12
50	93.12	6.88	1.1891	0.1202
60	93.14	6.86	1.1764	0.1207
90	93.13	6.87	1.2082	0.1223
120	93.15	6.85	1.2027	0.1233

ตารางที่ ๑.8 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG11)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.97	7.03	1.1554	0.1028
20	93.05	6.95	1.1735	0.1108
30	93.05	6.95	1.1792	0.1112
40	93.06	6.94	1.1855	0.1125
50	93.1	6.9	1.1955	0.1165
60	93.1	6.9	1.2071	0.1173
90	93.11	6.89	1.2097	0.1183
120	93.13	6.87	1.2071	0.1197

ตารางที่ ๑.9 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SG10)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.95	7.05	1.0565	0.0992
20	93.05	6.95	1.1019	0.112
30	93.08	6.92	1.1231	0.1163
40	93.07	6.93	1.1347	0.1162
50	93.09	6.91	1.1632	0.1202
60	93.09	6.91	1.2071	0.1234
90	93.1	6.9	1.2246	0.1257
120	93.11	6.89	1.2345	0.1274

การคำนวณหาปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำจากผงซิลิกาเจลพาณิชย์

ตารางที่ จ.10 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC25)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.85	7.15	1.6268	0.13
20	93.05	6.95	1.6311	0.1357
30	93.28	6.72	1.6327	0.1381
40	93.38	6.62	1.6414	0.1386
50	93.37	6.63	1.6419	0.1394
60	93.41	6.59	1.6463	0.1394

ตารางที่ จ.11 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC20)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.82	7.18	1.6145	0.1307
20	92.99	7.01	1.6304	0.1387
30	93.2	6.8	1.6459	0.1435
40	93.3	6.7	1.6544	0.1434
50	93.28	6.72	1.6501	0.1445
60	93.33	6.67	1.651	0.1435

ตารางที่ จ.12 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC17)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.85	7.15	1.6066	0.1295
20	92.98	7.02	1.6306	0.1387
30	93.15	6.85	1.6317	0.1424
40	93.23	6.77	1.6471	0.144
50	93.24	6.76	1.6575	0.1457
60	93.26	6.74	1.6547	0.145

ตารางที่ จ.13 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC14)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.8	7.2	1.5634	0.1308
20	92.97	7.03	1.5955	0.1388
30	93.07	6.93	1.6306	0.1458
40	93.15	6.85	1.6472	0.1476
50	93.16	6.84	1.6518	0.1494
60	93.19	6.81	1.6554	0.1513

ตารางที่ จ.14 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC13)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.89	7.11	1.5915	0.1344
20	93.03	6.97	1.6154	0.1382
30	93.06	6.94	1.6328	0.1434
40	93.12	6.88	1.6564	0.1457
50	93.13	6.87	1.6573	0.1472
60	93.15	6.85	1.6615	0.1487

ตารางที่ จ.15 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC11)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.85	7.15	1.5944	0.1359
20	93.02	6.98	1.6082	0.1393
30	93.05	6.95	1.6505	0.1463
40	93.1	6.9	1.6698	0.1485
50	93.11	6.89	1.6712	0.1501
60	93.13	6.87	1.6695	0.1515



ตารางที่ จ.16 ปริมาณดูดซับจำเพาะของเอทานอลและน้ำ (SGC10)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น เอทานอล (%)	ความเข้มข้น น้ำ (%)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ เอทานอล (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)	ปริมาณดูดซับ จำเพาะ น้ำ (กรัม/กรัมตัวดูดซับ)
10	92.83	7.17	1.644	0.1418
20	93	7	1.656	0.1471
30	93.05	6.95	1.6632	0.1529
40	93.11	6.89	1.6797	0.1532
50	93.1	6.9	1.6863	0.1552
60	93.12	6.88	1.6856	0.1562

### จ.3 การคำนวณปริมาณดูดจำเพาะของเอทานอลและน้ำที่สมดุลจากแบบจำลอง

สามารถคำนวณปริมาณสมดุลดูดซับน้ำ ( $q_e$ ) ที่สมดุลได้จากความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$q_t = \frac{q_e k_1 t}{1 + k_1 t} \quad (จ.5)$$

จัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{k_1}{q_e} \frac{1}{t} + \frac{1}{q_e} \quad (จ.6)$$

ปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุล ( $q_e$ ) คำนวณจากจุดตัดแกนตั้งของความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างส่วนกลับของปริมาณสมดุลดูดซับน้ำจำเพาะ ( $1/q$ ) กับส่วนกลับของเวลา ( $1/t$ )

โดย  $q_t$  คือ ปริมาณการดูดซับที่ได้จากการทดลอง (กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

$q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

$k_1$  คือ ค่าคงที่ของจลพลศาสตร์อันดับ 1

$t$  คือ เวลา (นาที)

ตารางที่ จ.17 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ  
1 ของการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลสังเคราะห์จากแกลบ

อัตราส่วน	ดูดซับ	สมการ	$r^2$	$q_e$	$k_1$
SG25	เอทานอล	$y=0.9754x+0.9017$	0.8601	1.109	1.082
	น้ำ	$y=16.5450x+9.6618$	0.9789	0.104	1.712
SG20	เอทานอล	$y=0.1950x+0.8852$	0.8051	1.13	0.22
	น้ำ	$y=9.5655x+9.3665$	0.9788	0.107	1.021
SG17	เอทานอล	$y=0.4260x+0.8632$	0.9335	1.151	0.49
	น้ำ	$y=11.293x+8.2135$	0.9648	0.122	1.375
SG14	เอทานอล	$y=0.6284x+0.8632$	0.7603	1.158	0.728
	น้ำ	$y=17.135x+8.1942$	0.9632	0.122	2.091
SG13	เอทานอล	$y=1.2829x+0.8265$	0.8633	1.21	1.552
	น้ำ	$y=20.523x+7.9127$	0.9954	0.126	2.594
SG11	เอทานอล	$y=0.4245x+0.8271$	0.8662	1.209	0.513
	น้ำ	$y=14.3500x+8.3456$	0.9378	0.12	1.719
SG10	เอทานอล	$y=1.4364x+0.8201$	0.8187	1.219	1.751
	น้ำ	$y=23.448x+7.7798$	0.9741	0.129	3.014

ตารางที่ จ.18 แสดงค่าคงที่จากการคำนวณต่างๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับ  
1 ของการดูดซับน้ำที่ปนในเอทานอลด้วยผงซิลิกาเจลพาณิชย์

อัตราส่วน	ดูดซับ	สมการ	$r^2$	$q_e$	$k_1$
SGC25	เอทานอล	$y=0.0775x+0.6078$	0.7428	1.6453	0.1275
	น้ำ	$y=6.3798x+7.0498$	0.9953	0.1418	0.905
SGC20	เอทานอล	$y=0.1791x+0.6021$	0.9355	1.6609	0.2975
	น้ำ	$y=8.9111x+6.7510$	0.9723	0.1481	1.32
SGC17	เอทานอล	$y=0.2172x+0.6017$	0.9015	1.662	0.361
	น้ำ	$y=10.353x+6.6865$	0.9952	0.1496	1.5483
SGC14	เอทานอล	$y=0.4413x+0.598$	0.9426	1.6722	0.738
	น้ำ	$y=12.349x+6.4602$	0.9714	0.1548	1.9116
SGC13	เอทานอล	$y=0.3323x+0.5983$	0.911	1.6714	0.5554
	น้ำ	$y=8.469x+6.6595$	0.9061	0.1502	1.2717
SGC11	เอทานอล	$y=0.3751x+0.5932$	0.8424	1.6858	0.6323
	น้ำ	$y=9.1372x+6.5214$	0.884	0.1533	1.4011
SGC10	เอทานอล	$y=0.1829x+0.5917$	0.8353	1.6900	0.3091
	น้ำ	$y=7.8023x+6.3083$	0.954	0.1585	1.2368

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุชานนท์ ตีรพัฒน์กบิล เกิดเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2531 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554