

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยผลิตภัณฑ์จากแกลบ

ADSORPTION OF FREE FATTY ACID IN CRUDE PALM OIL BY RICE HULL  
PRODUCTS



T104143



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....104143  
วัน,เดือน,ปี..... 10 ๓ ค. 2552

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ADSORPTION OF FREE FATTY ACID IN CRUDE PALM OIL BY RICE  
HULL PRODUCTS**



**NAPONG TEINKARODJANAKUL  
WEERAWAT CLOWUTIMON**

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

**2008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยผลิตภัณฑ์จากเกลบ  
โดย นาย ฌพงษ์ เทียรณโรจนกุล  
นาย วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยผลิตภัณฑ์จากแกลบ		
จัดทำโดย	นาย ฌพงษ์ เทียรชโรจนกุล	รหัสประจำตัว	48010237
	นาย วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์	รหัสประจำตัว	48010857
ปริญญา	วิศวกรรมบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
พ.ศ.	2551		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ โดยการสังเคราะห์ตัวดูดซับจากแกลบ 3 ชนิด ได้แก่ แถ้าแกลบไม่ต้มกรด แถ้าแกลบต้มกรด และซิลิกาที่สกัดจากแถ้าแกลบไม่ต้มกรด เพื่อเปรียบเทียบหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทำการทดลองด้วยชุดป้อนกวนจากเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ซิลิกาที่สกัดจากแถ้าแกลบไม่ต้มกรดเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบการดูดซับ เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิกาที่สกัดจากแถ้าแกลบไม่ต้มกรดโดยการดูความเป็นผลึกด้วยวิธีการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ พบว่าซิลิกาที่สกัดจากแถ้าแกลบไม่ต้มกรดมีโครงสร้างบางส่วนเป็นผลึกของซิลิกอนคลอไรด์และบางส่วนเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน และจากการตรวจวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของซิลิกาที่สกัดจากแถ้าแกลบไม่ต้มกรด โดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ พบว่าประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ร้อยละ 92.50 และจากการตรวจวัดพื้นที่และปริมาตรของรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที พบว่าพื้นที่ผิวของซิลิกาที่สกัดจากแถ้าแกลบไม่ต้มกรดเท่ากับ 223.4 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเท่ากับ 30.98 อังสตรอม จากศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยซิลิกาจากแถ้าแกลบ พบว่าระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ 7 ชั่วโมง และผลการศึกษาสมการไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟลูคคิซได้สมการเป็น  $q_c = \frac{158.7301C_e}{6.1111 - C_e}$  และ  $q_c = 0.3310C_e^{0.4289}$  ตามลำดับ และมีค่า  $R^2$  ของการดูดซับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟลูคคิซ คือ 0.7746 และ 0.7621 ตามลำดับ

<b>Thesis Title</b>	Adsorption Free Fatty Acid in Crude Palm Oil by Rice Hull Products		
<b>Student</b>	Mr. Napong Teinkarodjanakul	Student I.D.	48010237
	Mr. Weerawat Clowutimon	Student I.D.	48010857
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering		
<b>Programme</b>	Chemical Engineering		
<b>Year</b>	2008		
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Pornsawan Assawasaengrat		

### Abstract

This thesis is about adsorption free fatty acid from crude palm oil on 3 adsorbents, namely, acidic, non-acidic treated rice husk ash, and purified silica which was extracted from non-acidic treated rice husk ash. This adsorption is to determine the most effective adsorbent by using a heated magnetic stirrer which controls the temperature at 50 degree Celsius. According to the results purified silica has the most efficiency among all the adsorbents during 1-hour period. From the properties analysis of purified silica by using X-ray diffraction to identify the crystalline of purified silica, we have found that some parts are amorphous, and some are silicon chloride. Also from amount of substance evaluation cope with silica by using x-ray fluorescence technique, we have found that there are 92.50% of silica oxide, and by measuring the surface area and volume of pores inside silica with the BET technique, the result for the surface area is 223.4 square meter per gram of an adsorbent. The pore diameter is 30.98 Angstroms. From this study, the equipment this is 7 hours, and the study of Langmuir and Freundlich isotherms give an equation:  $q_e = \frac{158.7301C_e}{6.1111 - C_e}$  and  $q_e = 0.3310C_e^{0.4289}$ , respectively. The  $R^2$  of Langmuir and Freundlich isotherms are 0.7746 and 0.7621 respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาและคำชี้แนะ  
ตลอดจนให้ความรู้และแง่คิดที่ดีในการทำงานวิจัยตลอดจนประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวณิชย์ และ รศ.ดร.ประกอบ  
กิจไชยา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่ดีตลอดมา และเป็นกำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้  
การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณงามความดี  
และประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณพงค์ เทียรฆ โจรจนกุล

วีระวัฒน์ คลอวุฒิมินทร์

18 กุมภาพันธ์ 2552

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎี.....	3
2.1.1 น้ำมันและไขมัน.....	3
2.1.2 กรดไขมัน.....	3
2.1.3 การดูดซับ.....	6
2.1.4 ประเภทของการดูดซับ.....	6
2.1.5 ตัวดูดซับ.....	8
2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	9
2.1.7 กลไกการดูดซับ.....	10
2.1.8 สมดุลของการดูดซับ.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.9 แบบจำลองสมดุลการดูดซับต่าง ๆ.....	13
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	16
3.1 การเตรียมตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ.....	16
3.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	16
3.1.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง.....	17
3.1.3 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	17
3.2 การทดลองดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบเพื่อหาตัวดูดซับที่มี ประสิทธิภาพสูงสุด.....	20
3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	20
3.2.2 วิธีการดำเนินการทดลอง.....	20
3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด.....	22
3.2.1 การตรวจความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยวิธีการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์.....	22
3.2.2 การตรวจวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยวิธีการเรืองแสง ของรังสีเอ็กซ์.....	22
3.2.3 การตรวจวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนโดยใช้วิธีบีอีที.....	22
3.4 การทดลองหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด.....	22
3.4.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	22
3.4.2 วิธีดำเนินการทดลอง.....	23
3.5 การหาเส้นสมดุลของการดูดซับ.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบเพื่อหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ	
สูงสุด.....	24
4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของซิติกาที่สกัดจากเถาเถาแบบมาต้มกรด....	26
4.2.1 ผลการตรวจความเป็นผลึกของซิติกาโดยวิธีการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์.....	26
4.2.2 ผลการตรวจวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์.....	27
4.2.3 ผลการตรวจวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรด้วยวิธีบีอีที.....	27
4.3 การหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของซิติกาที่สกัดจากเถาเถาแบบไม่ต้มกรด.....	27
4.4 การหาเส้นสมดุลของการดูดซับและสมการสมดุลของการดูดซับ.....	30
4.4.1 การหาเส้นสมดุลของการดูดซับ.....	30
4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับ โดยใช้สมการจำลองแบบต่าง ๆ.....	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	33
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	33
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	34
ภาคผนวก.....	36
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ.....	37
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	48

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของกรดไขมันที่สำคัญบางชนิด.....	5
2.2	การดูดซับในลักษณะต่างๆ ด้วยแรงทางกายภาพ.....	7
2.3	กลไกการดูดซับ.....	10
2.4	ไอโซเทอมทั้ง 6 ชนิด ตามการจำแนกของIUPAC.....	12
3.1	เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาเถ้าที่ไม่ผ่านการต้มกรด.....	17
3.2	เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาเถ้าที่ผ่านการต้มกรด.....	18
3.3	ซิลิกาที่สกัดได้จากเถ้าแกลบที่ไม่ผ่านการต้มกรด.....	19
3.4	ชุดทดลองการดูดซับ.....	21
3.5	การไทเทรตเพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระ.....	21
4.1	ผลการตรวจความเป็นผลึกของตัวดูดซับ โดยวิธีการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์.....	26
4.2	กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของซิลิกาปริมาณ 0.5 กรัม ที่เวลา ต่าง ๆ.....	27
4.3	กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของซิลิกาปริมาณ 0.75 กรัม ที่เวลา ต่าง ๆ.....	28
4.4	กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของซิลิกาปริมาณ 1 กรัม ที่เวลา ต่าง ๆ.....	28
4.5	กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของซิลิกาปริมาณ 1.5 กรัม ที่เวลา ต่าง ๆ.....	29
4.6	กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของซิลิกาปริมาณ 2 กรัม ที่เวลา ต่าง ๆ.....	29
4.7	เส้นสมมูลของการดูดซับ.....	30
4.8	การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยซิลิกาที่สกัดจาก เถ้าแกลบไม่ต้มกรดด้วยสมการแบบจำลองเลงเมียร์.....	32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยซิลิกาที่สกัดจาก เถ้าแกลบไม่ต้มกรดด้วยสมการแบบจำลองฟรุตคาลิช.....	32



## VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพของน้ำมันและไขมันบางชนิด.....	5
2.2	จำนวนคาร์บอน ชื่อสามัญ ชื่อตามระบบ IUPAC และแหล่งที่พบของกรดไขมันที่สำคัญบางชนิด.....	4
2.3	จำนวนพันธะคู่ในกรดไขมันบางชนิด.....	5
2.4	ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	7
4.1	ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับ 0.5 กรัมต่อน้ำมันปาล์มดิบ 50 กรัม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 °C.....	24
4.2	ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับ 1 กรัมต่อน้ำมันปาล์มดิบ 50 กรัม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 °C.....	25
4.3	ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับ 2 กรัมต่อน้ำมันปาล์มดิบ 50 กรัม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 °C.....	25
4.4	ปริมาณกรดไขมันที่เหลือหลังการดูดซับและความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระที่เวลาสมดุล.....	36
ก.1	ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังทำการทดลองดูดซับ ด้วยปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม ระยะเวลา 1 ชั่วโมง.....	37
ก.2	ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังทำการทดลองดูดซับ ด้วยปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ระยะเวลา 1 ชั่วโมง.....	38
ก.3	ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังทำการทดลองดูดซับ ด้วยปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม ระยะเวลา 1 ชั่วโมง.....	39

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.4 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง.....	40
ก.5 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 5 ชั่วโมง.....	40
ก.6 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 7 ชั่วโมง.....	41
ก.7 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 1 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง.....	41
ก.8 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 1 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 5 ชั่วโมง.....	42
ก.9 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 1 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 7 ชั่วโมง.....	42
ก.10 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 2 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง.....	43
ก.11 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 2 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 5 ชั่วโมง.....	43
ก.12 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 2 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 7 ชั่วโมง.....	44
ก.13 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 0.75 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลาต่างๆ.....	45
ก.14 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด ในปริมาณ 1.5 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลาต่างๆ.....	46

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.15	
ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าเคลบไม้ต้มกรด เป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 °C ที่ปริมาณต่างๆ.....	47



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันแม้ว่าปัญหาคาบน้ำมันที่พุ่งขึ้นสูงจะลดความรุนแรงลง เนื่องจากความต้องการปัจจัยการผลิตด้านพลังงานที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะเศรษฐกิจโลกที่มีการถดถอย แต่ราคาดังกล่าวไม่สะท้อนความเป็นจริงที่ว่าน้ำมันจากแหล่งฟอสซิลซึ่งเป็นแหล่งเชื้อเพลิงหลักกำลังจะหมดไป ดังนั้นงานวิจัยใหม่ ๆ ในสาขาวิศวกรรมเคมีจึงมุ่งเน้นคิดค้นพลังงานทดแทนเพื่อรองรับอนาคตอันใกล้นี้ที่จะเกิดภาวะการขาดแคลนพลังงานดังกล่าว พลังงานทางเลือกที่น่าสนใจและมีศักยภาพเป็นที่ประจักษ์แล้วคือไบโอดีเซล ซึ่งเป็นน้ำมันที่ได้จากแหล่งอินทรีย์ มีค่าความร้อนจำเพาะและค่าซีเทนใกล้เคียงน้ำมันดีเซลเป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากคุณภาพในการใช้งานกับเครื่องยนต์สันดาปภายในของน้ำมันไบโอดีเซลขึ้นกับคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความต้วงจำเพาะ ความหนืด และความเข้มข้นของสิ่งเจือปน โดยเฉพาะกรดไขมันอิสระและกรีเซอร์ไรด์ซึ่งขึ้นกับแหล่งที่มาและกระบวนการผลิต ข้อเสียอีกประการหนึ่งของน้ำมันไบโอดีเซลคือเรื่องความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในด้านต้นทุนการผลิต น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ไปกับกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปน ซึ่งในที่นี้เราจะสนใจกรดไขมันอิสระเป็นหลัก เนื่องจากกรดไขมันอิสระทำให้เกิดเขม่าและคราบแข็งที่อุณหภูมิ 300 - 400 องศาเซลเซียสที่จะทำให้เครื่องยนต์เสียหายได้เนื่องจากเกิดการแหวนสูบตาย หัวฉีดอุดตัน และไส้กรองเชื้อเพลิงอุดตัน ซึ่งปัจจุบันยังไม่แนะนำให้เติมน้ำมันไบโอดีเซลในสัดส่วนเกิน 20 % เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว กรดไขมันอิสระเป็นสิ่งเจือปนที่มีปริมาณมากในน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งในกระบวนการผลิตต้องการให้มีกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบไม่เกิน 1 % ปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้วิธีการทำปฏิกิริยาให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ หรือกลั่นแยกไบโอดีเซล ซึ่งล้วนแต่ยุ่งยาก สูญเสียสารตั้งต้น และใช้ต้นทุนสูง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่วิธีการดูดซับโดยดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับซิลิกาและถ่านกัมมันต์ เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มดิบซึ่งเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำ ถ่านกัมมันต์เป็นสารที่มีปริมาณซิลิกาสูง จัดเป็นสารดูดซับประเภทหนึ่งและเป็นสิ่งเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและหาได้ง่ายจากแหล่งแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในประเทศ รวมถึงถ่านกัมมันต์ได้จากโรงงานพลังงานชีวมวลที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิง ถ้าหากผลิตภัณฑ์จากถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับกรดไขมันอิสระได้ จะช่วยทำให้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถทำได้ง่ายและไม่ต้องใช้กระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนที่มีต้นทุนสูงดังกล่าว ส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความสามารถในการแข่งขันด้านราคาและคุณภาพมากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระ

1. ศึกษาวิธีการสกัดชิลิกาเจลจากถั่วแกลบ
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับกรดไขมันอิสระ
3. ศึกษาสมการไอโซเทอมของการดูดซับกรดไขมันอิสระด้วยถั่วแกลบและชิลิกา

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาการวิธีการสกัดชิลิกาเจลจากถั่วแกลบ
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ

#### 2.1 ชนิดของตัวดูดซับ

ทดลองตัวดูดซับทั้งหมด 3 ชนิด คือ ถั่วแกลบไม่ต้มกรด ถั่วแกลบต้มกรด และชิลิกาเจลที่สกัดจากถั่วแกลบไม่ต้มกรด

#### 2.2 ปริมาณตัวดูดซับ

ทดลองโดยเปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับ คือ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมต่อน้ำมันปาล์มดิบ 50 กรัม

#### 2.3 ระยะเวลาในการดูดซับ

ทดลองโดยเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ คือ 1 2 ชั่วโมงและเวลาที่เข้าสู่สมดุล

## 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สกัดชิลิกาจากถั่วแกลบที่ไม่ได้ผ่านการต้มกรด
3. ทดลองการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ โดยทดลองปรับเปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับ
4. ทดลองการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ โดยทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณของตัวดูดซับ
5. ทดลองการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ โดยทดลองปรับเปลี่ยนระยะเวลาของการดูดซับ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจหลักการของการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ
2. เป็นการนำสิ่งเหลือใช้จากการเกษตรมาประยุกต์ใช้อีกทางหนึ่ง
3. สามารถนำข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับกรดไขมันอิสระด้วยชิลิกาไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎี

#### 2.1.1 น้ำมันและไขมัน [1,2]

น้ำมันและไขมันจัดเป็นเอสเทอร์ประเภทหนึ่งในธรรมชาติ จัดเป็นสารอินทรีย์ประเภทเดียวกับไข (Wax) รวมเรียกว่าลิพิด (Lipid) ลิพิดเป็นสารประกอบที่สกัดได้จากเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์ ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน และคลอโรฟอร์ม และสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับสารละลายเบสได้

ความแตกต่างระหว่างน้ำมันและไขมัน คือ จุดหลอมเหลว (Melting point) น้ำมันเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง (20 °C) ในขณะที่ไขมันเป็นของแข็ง ซึ่งสมบัติทางกายภาพของน้ำมันและไขมันบางชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันและไขมันบางชนิด [2]

Properties	Rapeseed oil	Peanut oil	Cottonseed oil	Soybean oil	Sunflower oil	Coconut oil	Palm oil	Olive oil	Beef tallow	Lard
1) Density @15°C g/cm <sup>3</sup>	0.910	0.991	0.917	0.922	0.920	0.919	0.921	0.914	0.936	0.914
2) R.I. @20°C	1.472	1.460	1.472	1.470	1.474	1.448	1.453	1.467	1.454	1.458
3) Smoke Pt.°C	218	207	223	213	209	206	223	—	—	—
4) Flash Pt.°C	317	315	322	317	316	306	314	—	316	—
5) Fire Pt.°C	344	342	342	342	341	—	341	—	344	—
6) Viscosity @50°C n.n.pa.s	50	23	27	25	26	19	28	30	25	25
7) Sp. Heat J/g	—	—	2.18 @73.6°C	2.06 @80.4°C	2.50 @175°C	—	2.40 @140°C	—	—	—

#### 2.1.2 กรดไขมัน [3,4]

กรดไขมันเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมเกาะกันเป็นเส้นตรง ไม่ค่อยพบ กรดไขมันเป็นอิสระ ส่วนใหญ่มักพบเป็นส่วนประกอบของไขมันหลายชนิดเช่น ไตรกลีเซอไรด์ ฟอสฟอกลีเซอไรด์ ในธรรมชาติมักพบกรดไขมันมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นจำนวนคู่ระหว่าง 4 – 24 อะตอมที่พบมากมีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอมมีสูตรทั่วไปคือ R-COOH มี 2 ประเภทดังนี้

##### 1) กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid)

กรดไขมันที่โมเลกุลมีความอิ่มตัว มีหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) 1 หมู่ ต่ออยู่กับไฮโดรคาร์บอนที่เป็นสายยาว ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีแต่พันธะเดี่ยวอย่างเดียว เช่น กรดปาล์มมิติก (Palmitic) มีคาร์บอน 16 ตัวเป็นกรดไขมันอิ่มตัวมากที่มีมากในธรรมชาติและพบในร่างกาย

##### 2) กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid)

กรดไขมันที่มีทั้งพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ มีหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) 1 หมู่ต่ออยู่กับไฮโดรคาร์บอนที่มีพันธะคู่รวมอยู่ด้วย อาจมีตั้งแต่ 1 พันธะคู่ เรียกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว และ 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะคู่ขึ้นไป เรียกกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน ทั้งนี้พันธะคู่ในกรดไขมันต้องอยู่ห่างกัน 3 คาร์บอน  
 ดังนี้  $-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-$  เสมอ

จำนวนคาร์บอน ชื่อสามัญ ชื่อตามระบบ IUPAC และแหล่งที่พบของกรดไขมันที่สำคัญบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2 และพันธะคู่ในกรดไขมันที่สำคัญบางชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

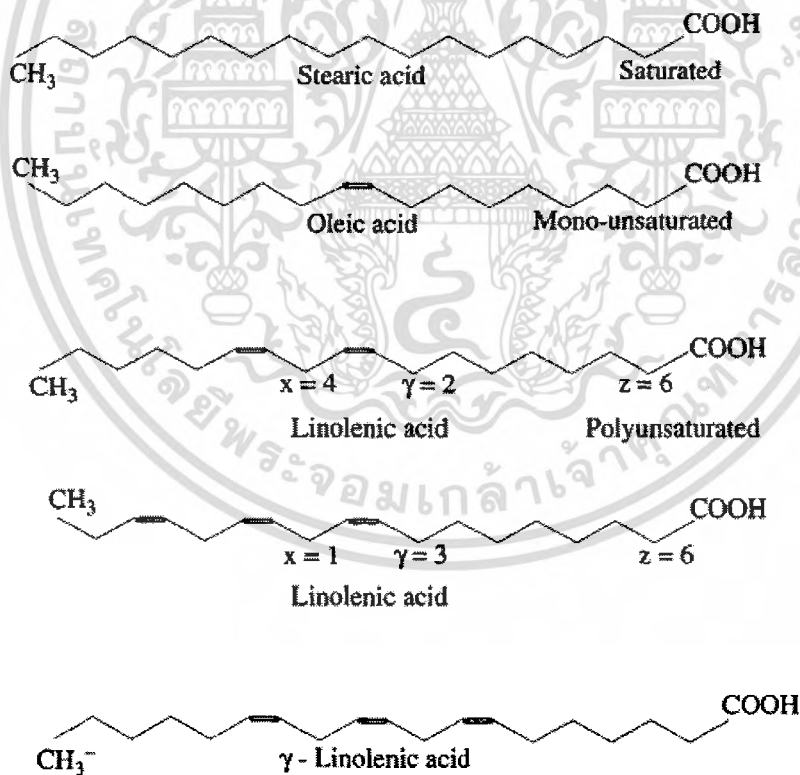
ตารางที่ 2.2 จำนวนคาร์บอน ชื่อสามัญ ชื่อตามระบบ IUPAC และแหล่งที่พบของกรดไขมันที่สำคัญบางชนิด [5]

Carbon atoms	Common name	Systematic name	Common sources
<b>Saturated fatty acids</b>			
3	Propionic	Propanoic	Bacterial fermentation
4	Butyric	Butanoic	Milk fats
5	Valeric	Pentanoic	Bacterial fermentation
5	Isovaleric	3-Methylbutanoic	Dolphin and porpoise fats
6	Caproic	Hexanoic	Milk fats, some seed oils
8	Caprylic	Octanoic	Milk fats, Palmae seed oils
10	Capric	Decanoic	Sheep and goat milk, palm seed oils, sperm head oil
12	Lauric	Dodecanoic	Coconut oil
14	Myristic	Tetradecanoic	Palm and coconut oils
16	Palmitic	Hexadecanoic	Palm oil
18	Stearic	Octadecanoic	Animal fats
19	Tuberculostearic	10-Methylstearic	Tubercle bacillus lipids
20	Arachidic	Eicosanoic	Some animal fats
22	Behenic	Docosanoic	Peanut and various other seed oils
24	Lignoceric	Tetracosanoic	Minor amounts in some seed oils
26	Cerotic	Hexacosanoic	Plant waxes
28	Montanic	Octacosanoic	Beeswax and other waxes
30	Mellisic	Triacosanoic	Beeswax and other waxes
<b>Unsaturated fatty acids</b>			
10	Caproic	9-Decenoic	Milk fats
10	Stillingic	2,4-Decadienoic	Stillingia oil
12	Lauroic	2-Dodecenoic	Butterfat
18	Linolenic	9,12,15-Octadecatrienoic	Linseed oil

ตารางที่ 2.3 จำนวนพันธะคู่ในกรดไขมันบางชนิด [5]

Source	<14:0	14:0	16:0	16:1	18:0	18:1	18:2	18:3	20:0	20:1	22:0	22:1	24:0	24:1
Almond oil	—	0.0	6.5	0.6	1.7	68.4	17.4	—	—	—	—	—	—	—
Avocado oil	—	—	11.0	3.4	0.7	71.5	12.0	1.5	—	—	—	—	—	—
Butter fat	23.8	8.2	21.3	1.8	9.6	20.4	1.8	1.2	—	—	—	—	—	—
Canola oil	—	—	4.8	0.5	1.6	53.8	22.1	11.1	1.1	1.5	0.3	0.1	0.1	—
Cocoa butter	—	0.1	25.4	0.2	22.2	32.6	2.8	0.1	—	0.0	—	—	—	—
Coconut oil	58.7	16.8	8.2	—	2.8	5.8	1.8	—	—	—	—	—	—	—
Corn oil	0.0	0.0	10.9	—	1.8	24.2	58.0	0.7	—	—	—	—	—	—
Cotton seed oil	—	0.8	22.7	0.8	2.3	17.0	51.5	0.2	—	—	—	—	—	—
Fish (manhaden) oil	—	9.6	20.5	12.8	3.2	11.0	6.7	1.6	0.3	—	—	0.8	—	—
Lard	0.5	1.3	23.8	2.7	13.5	41.2	10.2	1.0	—	1.0	—	—	—	—
Mustard seed oil	—	0.1	1.9	0.3	0.1	17.7	9.1	0.5	0.6	3.91	1.3	55.1	0.2	1.9
Olive oil	—	0.0	11.0	0.8	2.2	72.5	7.9	0.6	—	—	—	—	—	—
Palm oil	0.1	1.0	43.5	0.3	4.3	36.6	5.1	0.2	—	0.1	—	—	—	—
Palm kernel oil	54.2	16.4	8.1	—	2.8	11.4	1.6	—	—	—	—	—	—	—
Peanut oil	—	0.1	9.5	0.1	2.2	44.8	32.0	—	—	1.3	—	—	1.8	—
Rapeseed oil	—	—	1.7	—	0.9	12.3	12.7	7.6	1.2	5.8	0.9	59.4	0.5	1.6
Rice bran oil	—	0.7	16.9	0.2	1.6	39.1	32.4	1.6	—	—	—	—	—	—
Safflower oil	—	0.1	6.2	0.4	2.2	11.7	74.1	0.4	—	—	—	—	—	—
Sesame oil	—	—	8.9	0.2	4.5	33.3	41.3	0.3	—	0.2	—	—	—	—
Soybean oil	—	0.1	10.3	0.2	3.5	22.3	51.0	6.8	—	—	—	—	—	—
Sunflower oil	—	—	5.4	0.2	3.5	30.6	8.4	0.2	0.3	—	—	—	—	—
Tallow	0.9	3.7	24.9	4.2	18.5	36.0	3.1	0.6	—	0.3	—	—	—	—
Walnut oil	—	—	7.0	0.1	2.0	22.2	6.4	52.9	10.4	—	—	—	—	—

หมายเหตุ x : y หมายถึง จำนวนคาร์บอนอะตอม : จำนวนพันธะคู่



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกรดไขมันที่สำคัญบางชนิด [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 การดูดซับ (Adsorption) [6]

การดูดซับ คือ กระบวนการจับโมเลกุลของของเหลวหรือก๊าซด้วยของแข็งหรือของเหลวโดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ( Adsorbate ) จะอยู่บนผิวของตัวถูกดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นของแข็ง นิยมใช้สารประกอบที่มีรูพรุนเป็นตัวดูดซับ เพราะว่ามีพื้นที่ผิวภายในการดูดซับมาก เมื่อโมเลกุลของของไหลผ่านเข้าไปในตัวดูดซับจะถูกกักไว้ในรูพรุน ซึ่งกระบวนการดูดซับจะขึ้นกับลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของตัวดูดซับ คุณสมบัติของทั้งตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ( Molecular layers ) ที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ การดูดซับของโมเลกุลของสารบนผิวตัวดูดซับ อาจเกิดจากแรงทางกายภาพหรือแรงจากทางเคมีหรือจากทั้งสองอย่างรวมกัน

### 2.1.4 ประเภทของการดูดซับ [6-9]

การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) หรือ ฟิซิชอพชัน (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) หรือ เคมิซอพชัน (Chemisorption)

#### การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่อ่อนและไม่มีการเกิดพันธะเคมีเกิดขึ้น แรงดึงดูดระหว่างอะตอมของผิวหน้าตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นได้เอง โดยการดูดซับอาจเกิดซ้อนกันแบบหลายชั้น (Multilayer) องค์ประกอบหลักของการดูดซับทางกายภาพคือ ธรรมชาติของสาร แรงระหว่างผิวสัมผัส และความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวดูดซับที่ถูกดูดซับ

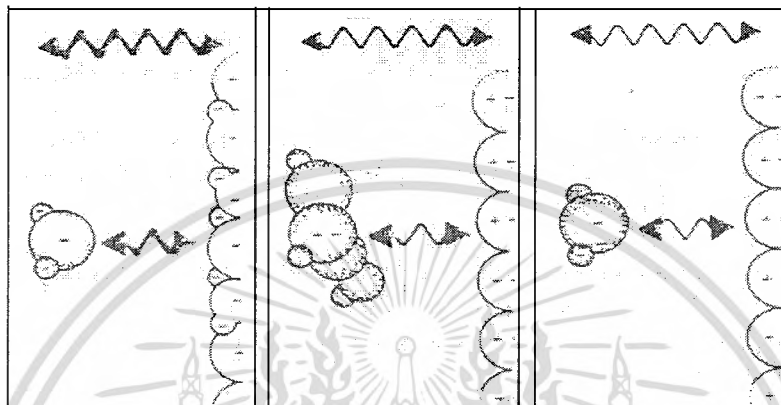
การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ และเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะถูกจำกัดโดยอัตราการแพร่ของมวลตัวถูกดูดซับมายังผิวหน้าของตัวดูดซับ

ลักษณะการจับตัวด้วยแรงทางกายภาพเกิดผล 3 อย่าง ดังรูปที่ 2.2

- 1) เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างเป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่
- 2) เกิดจากหลักการที่ว่าโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว สามารถเปลี่ยนเป็น ไดโพลโมเลกุลได้ ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มายู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะแบบเดียวกัน เข้ามาจะเกิดแรงดึงดูดกัน แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงอ่อนๆ ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับต่างเป็น โมเลกุลที่ไม่มีขั้วทั้งคู่

3) เกิดจาก โมเลกุลมีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงกันข้าม แล้วเกิดการดึงดูดกัน ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลของตัวดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว

โมเลกุลมีขั้ว-โมเลกุลมีขั้ว โมเลกุลไม่มีขั้ว-โมเลกุลไม่มีขั้ว โมเลกุลมีขั้ว-โมเลกุลไม่มีขั้ว



รูปที่ 2.2 การดูดซับในลักษณะต่างๆ ด้วยแรงทางกายภาพ

### การดูดซับทางเคมี

เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับผิวของตัวถูกดูดซับ มีพันธะเคมีเป็นแรงในการดูดซับ โดยมีค่ามากกว่าแรงในการดูดซับทางกายภาพ ส่งผลให้มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่เป็นสารประกอบใหม่ขึ้นมาโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นระหว่างการดูดซับและมีพันธะระหว่างอะตอมที่แข็งแรง โดยมักเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

การดูดซับทางเคมีสามารถเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ

- 1) การดูดซับทางเคมีที่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Activated chemisorptions) การดูดซับลักษณะนี้ อัตราเร็วในการดูดซับจะขึ้นกับอุณหภูมิตามสมการของอาร์เรเนียส ( $k = k_0 e^{-E/RT}$ )
- 2) การดูดซับทางเคมีที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Nonactivated chemisorptions) การดูดซับลักษณะนี้ อัตราเร็วในการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าพลังงานกระตุ้นต่ำ

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการเกิดการดูดซับทางเคมีในช่วงแรกต้น มักจะเป็นการดูดซับที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น หลังจากนั้นกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นกับอัตราที่ช้าลงและมีผลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีสามารถได้ด้วยตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [10]

ลักษณะ	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. แรงที่กระทำ	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี เรียกว่า แรงกระตุ้นในการดูดซับ (Activated adsorption)
2. การดูดซับแบบอิมตัว	แบบหลายชั้น	แบบชั้นเดียว
3. พลังงานกระตุ้น	ไม่มีพลังงานกระตุ้น	อาจจะมีหรือไม่มีพลังงานกระตุ้น
4. ช่วงของอุณหภูมิ	การดูดซับโดยมากจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวดูดซับ	การดูดซับสามารถทำได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับได้
5. ความร้อนในการดูดซับ	1 กิโลแคลอรีต่อโมล	50-100 กิโลแคลอรีต่อโมล

### 2.1.5 ตัวดูดซับ [11-15]

ตัวดูดซับสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

- 1) ตัวดูดซับแบบไม่มีขั้ว (Non – polar adsorbent) จะเกิดการดูดซับแบบกายภาพ ตัวดูดซับที่สำคัญของกลุ่มนี้ คือ คาร์บอนกัมมันต์
- 2) ตัวดูดซับแบบมีขั้ว (Polar adsorbent) การดูดซับที่เกิดขึ้นกับสารประเภทนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลก๊าซและผิวของตัวดูดซับ ได้แก่ พวกรอกไซด์ เช่น ออกไซด์ของซิลิกา และออกไซด์ของโลหะ วัสดุจำพวกซิลิกา ได้แก่ ซิลิกาเจล ฟูลเลอร์เอิร์ธ (Fuller's earth)
- 3) ตัวดูดซับประเภทที่อาศัยปฏิกิริยาเคมี ตัวดูดซับนี้จะมีผิวหน้าที่สามารถดูดซับทางเคมีได้ โดยทั่วไปตัวดูดซับที่ใช้ ได้แก่ โคลโลไมด์ ตัวดูดซับ อัลคาไลน์อะลูมินา ซิลิกาเจลกัมมันต์ และแมงกานีสออกไซด์กัมมันต์

ตัวดูดซับที่นิยมใช้ คือ คาร์บอนกัมมันต์ ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ และพอลิเมอร์สังเคราะห์หรือเรซิน

1. คาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon) คือวัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) และกระบวนการกระตุ้น (Activation) คาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นที่รู้จักกันมานานในแง่ของการใช้เป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับสูง ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนมาก นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนเหล่านี้ยังมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุ และยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างๆ ได้อย่างดี

คาร์บอนกัมมันต์เป็นรูปอสัณฐานของถ่าน คือ มีรูปร่างไม่แน่นอน ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงในเนื้อคาร์บอนมากที่สุด พื้นที่ผิวจะอยู่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่าง 500 – 2000 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนตั้งแต่ 20 - 2000 อังสตรอม ใช้สำหรับ ดูดสี กลิ่น หรือสารปนเปื้อนอื่นๆ ความพรุนของคาร์บอนกัมมันต์เป็นผลเนื่องมาจากการกระตุ้นทางกายภาพหรือเคมี ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึก (Element crystallites) เพิ่มขึ้น มีพื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้น สามารถดูดสีและกลิ่น ได้มากกว่าถ่านธรรมดา

2. ซิลิกาเจล (Silica gel) เป็นตัวดูดซับที่ได้จากการผสมกรดลงในสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) แล้วนำไปอบแห้ง โดยพื้นที่ผิวเฉลี่ยอยู่ 600-800 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเฉลี่ยอยู่ที่ 20-50 อังสตรอม ซึ่งซิลิกาเจลส่วนใหญ่ถูกใช้เพื่อลดความชื้นในแก๊ส หรือของเหลว

3. อลูมินาออกไซด์ (Alumina Oxide) เตรียมขึ้นจากอลูมินา หรือ ออกไซด์ ที่ได้รับการกระตุ้น โดยการทำให้ร้อนขึ้นในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เพื่อให้เกิดเป็นเม็ดอลูมินัมออกไซด์พรุน โดยปกติแล้วจะไม่ใช้อลูมินัมออกไซด์ในงานด้านการควบคุมมลพิษทางอากาศ แต่จะใช้เพื่อทำให้ก๊าซแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้ความดันสูง และจะใช้เป็นสารรองรับในปฏิกิริยาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ยกตัวอย่าง เช่น การให้อลูมินาดูดซึมแพลททินัม หรือ แพลเลเดียมเพื่อใช้ในการเผาไหม้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

4. พอลิเมอร์สังเคราะห์หรือเรซิน (Synthetic polymers or resins) ผลิตจากการรวมมอนอเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน แล้วผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยถ้าใช้พอลิเมอร์จำนวนพวกละอโรมาติก คือ สไตรีน (styrene) และไดไวนิลเบนซีน (divinylbenzene) ส่วนใหญ่จะใช้จะดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่ขั้วออกจากสารละลาย ส่วนถ้าใช้อะคริลิกเอสเตอร์จะสามารถใช้ดูดซับสารที่มีขั้วออกจากสารละลายได้

### 2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [10 , 16-17]

#### 1. ลักษณะของตัวดูดซับ

คุณสมบัติของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ ประกอบด้วย พื้นที่ผิวสัมผัสและโครงสร้างของรูพรุน โดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นถ้าพื้นที่ผิวสัมผัสการดูดซับมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการคำนึงถึงพื้นที่ผิวสัมผัสอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพ โครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับก็มีส่วนช่วยในการดูดซับ เพราะถ้าหากขนาดของโมเลกุลไม่สามารถถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้ ประสิทธิภาพของการดูดซับก็จะต่ำลง ดังนั้นความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และสำหรับตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นถ้ามีขนาดเล็กลง อัตราการดูดซับจึงแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ แต่สำหรับตัวดูดซับที่มีรูพรุนมากๆ การดูดซับจะขึ้นกับรูพรุนมากกว่าขนาด

#### 2. ลักษณะของตัวถูกดูดซับ

คุณสมบัติของตัวถูกดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ คือ ความสามารถในการละลาย ความมีขั้วของโมเลกุล น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทำรายงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ความสามารถในการละลาย เมื่อความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับจำเป็นต้องให้ตัวถูกละลายแยกตัวออกจากตัวทำละลายแล้วไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น หากใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย สารที่ละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นการยากต่อการดูดซับ แต่หากเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย จะสามารถเกาะติดบนผิวตัวดูดซับได้ดี

2.2 ความมีขั้วของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพขั้วเป็นการเพิ่มความสามารถในการละลาย

2.3 น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล เกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลาย เพราะเมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายจะลดลง

### 3. อุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มอัตราเร็วของการดูดซับ แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการลดการดูดซับ

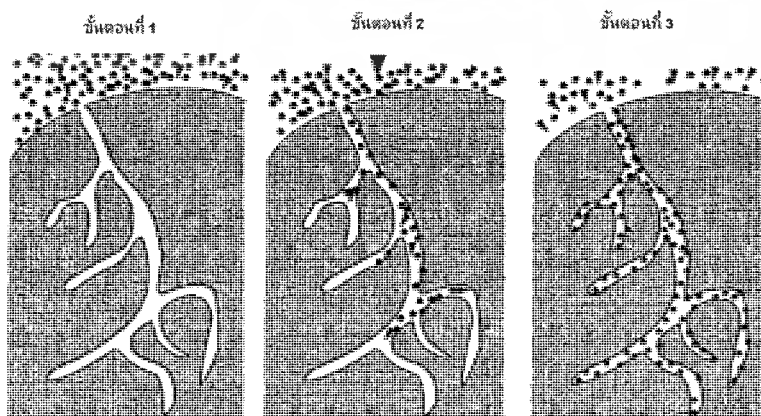
### 4. เวลา

เวลาเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะต้องนานเพียงพอที่จะทำให้ตัวดูดซับทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ และตัวถูกละลาย ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องมีการทำการศึกษาก่อนในระดับปฏิบัติการจริง

#### 2.1.7 กลไกการดูดซับ [18]

กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 3 ระยะดังแสดงในรูปที่ 2.3

- 1) โมเลกุลของตัวดูดซับจะไปเกาะที่ผิวรอบนอก
- 2) โมเลกุลของตัวดูดซับจะถูกดูดซับและแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ
- 3) เกิดการดูดซับในรูพรุน ระหว่างตัวดูดซับและพื้นที่ผิวเกิดทั้งแรงทางกายภาพและทางเคมี



รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.8 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

สมดุลของการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ที่สถานะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของของไหลและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในอนุภาคของตัวดูดซับ ณ อุณหภูมิหนึ่ง สำหรับก๊าซความเข้มข้นในวัฏภาคของของไหลจะแสดงในรูปร้อยละโดยมวลหรือความดันย่อย สำหรับของเหลวความเข้มข้นจะแสดงในรูปหน่วยมวล เช่น มิลลิกรัมต่อลิตรหรือไมโครกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนของแข็งมักแสดงในรูปมวลที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ [19]

การศึกษาสมดุลและจลนศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption) และการคายซับ (Desorption) เป็นสิ่งที่จะช่วยให้เข้าใจกระบวนการแยกได้ดียิ่งขึ้น และสามารถแยกสารได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกนำมาอธิบายสมดุลในการดูดซับในงานวิจัยต่าง ๆ

การทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับนั้นมีประโยชน์สำหรับการหาค่าความจุของการดูดซับเพื่อความสะดวกในการประเมินค่าการดำเนินงานของกระบวนการสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม และการกำหนดปริมาณตัวดูดซับที่ต้องการในเบื้องต้น นอกจากนี้ไอโซเทอมการดูดซับยังมีบทบาทในการทำนายกระบวนการจำลองสำหรับวิเคราะห์และออกแบบระบบดูดซับ และไอโซเทอมการดูดซับยังใช้สำหรับการประเมินทางทฤษฎีและการอธิบายปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น ค่าความร้อนของการดูดซับ ซึ่งแบบจำลองสมดุลต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการอธิบายไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพมีความหลายหลาย ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ในปี ค.ศ. 1945 Brunauer ได้จำแนกชนิดของไอโซเทอมออกเป็น 6 ชนิด ดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งมีชื่อที่เรียกเป็นไปตามระบบ IUPAC [7]

ชนิดที่ 1 เรียกว่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) สำหรับการดูดซับที่ถือว่าเป็นชั้นเดียว ตามสมการของแลงเมียร์ (Langmuir Equation) ที่มีพื้นที่ผิวของการดูดซับมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่มีอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับ ไอโซเทอมแบบนี้มักจะพบในวัสดุที่มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ภายนอกต่ำ เช่น ซีโอไลต์ หรือ ถ่านกัมมันต์บางชนิด ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่ กรณีเช่นนี้ปริมาตรของรูพรุนจะมีค่ามากกว่าปริมาตรที่ทำให้เกิดการดูดซับชั้นเดียวมาก การดูดซับแบบนี้จะพบในการดูดซับที่ย้อนกลับได้

ชนิดที่ 2 บางครั้งจะเรียกว่า Sigmoid หรือไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-Shaped Isotherm) มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มี ความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่หรือมาโครพอร์ส (Macroporous) ตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวแล้ว หลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น ดังนั้นปริมาณการดูดซับที่จุด B จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ การดูดซับแบบนี้ย้อนกลับได้

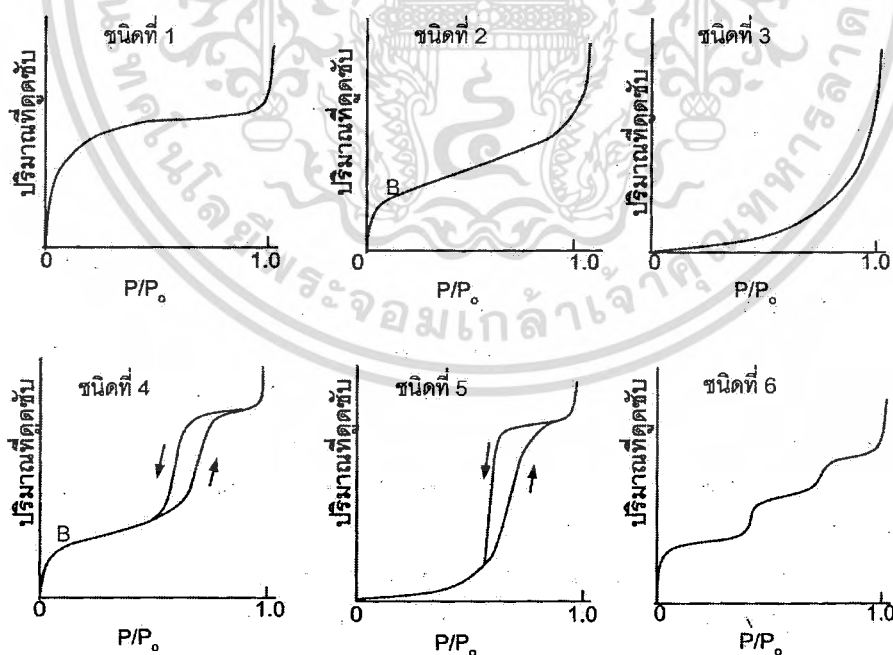
ชนิดที่ 3 มีรูปร่างเหมือนกระจกเว้า ไอโซเทอมแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อย จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อน เกิดเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ เช่นการดูดซับของสารที่มีขั้วบนเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไมออนูภาคเหนือไปซึ่งประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่ไม่มีขั้ว หลังจากที่มีพหุหน้าถูกคลุมหมดแล้ว การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงแรงดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวเองมีสูง ตัวอย่างการดูดซับแบบนี้ได้แก่การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์

ชนิดที่ 4 มักจะพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบมีโซพอร์ส (Mesopore) คือมีขนาดของรูพรุนขนาดเล็ก ระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร การดูดซับในช่วงแรกซึ่งมีค่า  $P/P_0$  ต่ำจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า  $P/P_0$  มาก ซึ่งเกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบคาปิลารี ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส ซึ่งเกิดจากเส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายซับไม่ทับกัน เพราะการคายซับเกิดได้ยากกว่าเพราะต้องเอาชนะแรงคาปิลารี ขนาดของการควบแน่นในรูขนาดเล็กสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายของขนาดของรูพรุน (Pore-size distribution) ได้

ชนิดที่ 5 เหมือนกับชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุนในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า  $P/P_0$  สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ ส่วนฮิสเทอรีซิสจากการดูดซับและการคายซับ ก็เกิดจากการเอาชนะแรงคาปิลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ไอโซเทอมชนิดนี้พบไม่บ่อยนัก

ชนิดที่ 6 เรียกว่าเป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ซึ่งพบได้ไม่บ่อยนัก เกิดจากการดูดซับทีละชั้นบนผิวหน้าที่มีหลายชั้นและความเป็นระเบียบสูง ความชันของเส้นกราฟ จะขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมทั้ง 6 ชนิด ตามการจำแนกของ IUPAC

### 2.1.9 แบบจำลองสมดุลการดูดซับต่าง ๆ

สมการไอโซเทอม 2 สมการที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับ คือ Langmuir และ Freundlich ไอโซเทอม

#### แบบจำลองของ Langmuir

แบบจำลองนี้เริ่มต้นได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการดูดซับของก๊าซบนวัสดุของแข็ง โดยตั้งสมมติฐานว่า พลังงานการดูดซับมีค่าคงที่ และไม่ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุม นั่นคือการดูดซับเกิดขึ้นบนบริเวณจำเพาะ โดยไม่มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ และปริมาณการดูดซับที่สูงที่สุดเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับได้ถูกปกคลุมโดยตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ความสัมพันธ์จะได้อมาจากการพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการควบแน่น และการระเหยของโมเลกุลของแก๊สที่ผิวของของแข็ง ถ้า  $\theta$  คือเศษส่วนของพื้นที่ผิวตัวดูดซับที่ถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียว ดังนั้นอัตราการการระเหยจากพื้นผิวคือ  $\theta$  ซึ่งคล้ายกัน อัตราของการควบแน่นของโมเลกุลของแก๊สบนพื้นผิวเป็นอัตราส่วนของบริเวณที่ว่างที่เหลืออยู่ หรือ  $(1-\theta)$  และความดันสัมบูรณ์ของแก๊ส  $P$  ซึ่งหาได้จากอัตราที่โมเลกุลสัมผัสกับผิว สมการอัตราการระเหย 2 อัตราที่สภาวะสมดุลแสดงดังสมการที่ ...

$$k_d\theta = k_a P(1-\theta) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $k_d$  และ  $k_a$  คือ ค่าคงที่ของการระเหยและการควบแน่นตามลำดับ และ  $\theta$  คือสัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุม

$$\theta = \frac{k_a P}{k_d + k_a P} = \frac{bP}{1 + bP} \quad (2.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับ  $b = k_a / k_d$  ซึ่งสัมพันธ์กับเอนทัลปีของการดูดซับ ( $\Delta H$ ) โดย

$$b = b_0 e^{-\Delta H / RT} \quad (2.3)$$

ในที่นี้  $b_0$  คือ ค่าคงที่อัตราของเอนโทรปี จากสมการที่ 3 สำหรับระบบที่เป็นของแข็ง-ของเหลว สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 4

$$q_e = \frac{Q^0 b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ  $Q$  คือ ความเข้มข้นที่เกิดจากการปกคลุมอย่างสมบูรณ์บนบริเวณที่สามารถเกิดการดูดซับสารได้บนวัสดุของแข็ง หรือขอบเขตจำกัดความจุการดูดซับ และ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในวัสดุของเหลวที่สภาวะสมดุล สมการที่ 4 สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้หลากหลายดังสมการที่ 5, 6 และ 7

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{Q^0 b} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q^0} + \frac{1}{b Q^0 C_e} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ 
$$q_e = Q^0 - \frac{q_e}{bC_e} \quad (2.7)$$

#### แบบจำลองของ Freundlich

Freundlich (1962) ข้อมูลสมดุลของการดูดซับนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.8)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $K_F$  และ  $1/n$  คือ ค่าคงที่ สมการที่ (8) สามารถเขียนในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.9)$$



## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. Jame และ R.S. Rao[20] ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบแลกเปลี่ยน พบว่าแลกเปลี่ยนประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน คือ เถ้าแลกเปลี่ยน 20 % เซลลูโลส (Cellulose) 38 % ลิกนิน (Lignin) 22 % เพนโทส (Pentose) 18% และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ 2 %

F. Adam[21] ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของเถ้าแลกเปลี่ยนที่ได้จากการเผาแลกเปลี่ยน พบว่าเถ้าแลกเปลี่ยนมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกาออกไซด์ (Silica oxide,  $\text{SiO}_2$ ) มากกว่า 94 %

Proctor และ Shultz[22] ได้ศึกษากระบวนการสกัดซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าแลกเปลี่ยน ได้สามารถสกัดซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์ถึง 93 % และความชื้น 2.6 %

Proctor และ Palaniappan[23] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเถ้าแลกเปลี่ยน (Rice Hull Ash, RHA) จนพบว่าเถ้าแลกเปลี่ยนมีประสิทธิภาพในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันถั่วเหลืองได้ และนอกจากนี้ Brown และ Snyder[24] ค้นพบว่าเถ้าแลกเปลี่ยนยังสามารถดูดซับสารจำพวกฟอสโฟไลปิด แลโรทีนอยด์ และสารเปอร็อกไซด์ได้ด้วย

Kim และคณะ[25] ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระระหว่างเถ้าแลกเปลี่ยนและซิลิกาเจลที่สกัดจากเถ้าแลกเปลี่ยน โดยการทดลองเผาแลกเปลี่ยนที่อุณหภูมิ 300 500 700 และ 900 องศาเซลเซียส (RHA 300, RHA 500, RHA 700 และ RHA 900 ตามลำดับ) เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำไปดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันถั่วเหลือง พบว่า RHA 500 สามารถดูดซับปริมาณกรดไขมันอิสระได้มากที่สุด การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่สามารถที่จะลดปริมาณของกรดไขมันอิสระในน้ำมันถั่วเหลืองได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถของเถ้าแลกเปลี่ยน RHA 500 กับซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแลกเปลี่ยน RHA 500 (RHS 500) แล้วพบว่า ซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแลกเปลี่ยนสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันถั่วเหลืองได้ใกล้เคียงกับเถ้าแลกเปลี่ยน RHA 500 ซึ่งหมายความว่าประสิทธิภาพของซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแลกเปลี่ยนใกล้เคียงกับการนำเถ้าแลกเปลี่ยนไปดูดซับโดยตรง

Sevil Ozgul และ Selma Turkyay[26] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ให้เฟตตีแอซิดเมทิลเอสเทอร์ (Fatty acid Methyl Ester, FAME) โดยดูดซับกรดไขมันอิสระซึ่งเป็นสิ่งเจือปนออกจาก FAME โดยใช้ตัวดูดซับสองตัว คือ เถ้าแลกเปลี่ยน และซิลิกาเจล ซึ่งจากการทดลองพบว่า เถ้าแลกเปลี่ยนและซิลิกาเจลสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้ แต่ประสิทธิภาพของซิลิกาเจลมีค่ามากกว่าเถ้าแลกเปลี่ยน และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับพบว่าสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับของ Kim และคณะ

สันติ รัตนวิรัตน์[27] ได้ทำการทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมกับการเตรียมซิลิกาจากเถ้าแลกเปลี่ยน พบว่าเถ้าแลกเปลี่ยนที่เผาที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และยังพบอีกว่าการแช่กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 นอโมล เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมซิลิกาบริสุทธิ์ เนื่องจากสามารถทำให้สารไฮโดรคาร์บอนละลายตัวได้หมดเมื่อนำไปเผา

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 การเตรียมตัวดูฉบับชนิดต่าง ๆ

ตัวดูฉบับในการทดลอง ได้แก่ ฝ้าแถบไม้ตีมกรด ฝ้าแถบตีมกรด และชิลิกาที่สกัดจากฝ้าแถบไม้ตีมกรด

#### 3.1.1 สารเคมีและอุปกรณ์

##### - สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลิน

##### - อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ปิ๊มสุญญากาศ
3. เครื่องกรองสุญญากาศ
4. ตู้อบ
5. เต้าเผา
6. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารด้วยแม่เหล็ก
7. กระดาษกรอง
8. แท่งแก้วคนสาร
9. ชามระเหย
10. ตะแกรงขนาดรู 125 ไมโครเมตร
11. กระจกนาฬิกา
12. นาฬิกาจับเวลา
13. หลอดหยด
14. บีกเกอร์ขนาด 250 500 และ 1000 มิลลิลิตร
15. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร

### 3.1.2 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง

#### - สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3.0 โมลาร์

ปีเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 % โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาณ 257 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกปริมาตร

#### - สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

ปีเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลาร์ ปริมาณ 33.3 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกปริมาตร

#### - สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมลาร์

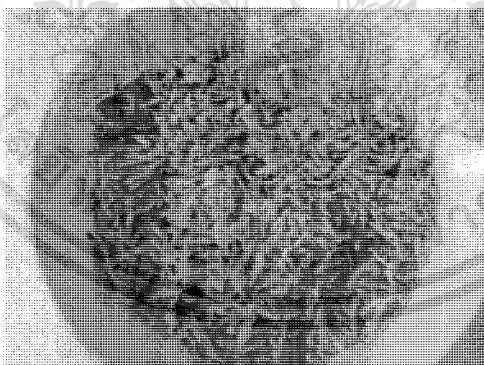
ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40.00 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### 3.1.3 วิธีดำเนินการทดลอง

การทดลองตอนนี้แบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยแต่ละช่วงจะอธิบายถึงการเตรียมตัวดูดซับแต่ละชนิด

#### ช่วงที่ 1 การเตรียมถ้ำเกลบไม่ผ่านการต้มกรด

1. ชั่งเกลบประมาณ 22 กรัม ใส่ขามระเหยแล้วนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำถ้ำที่มาบดแล้วไปผ่านการร่อนตะแกรงขนาดรู 125 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.1 ถ้ำเกลบที่ได้จากการเผาเกลบที่ไม่ผ่านการต้มกรด

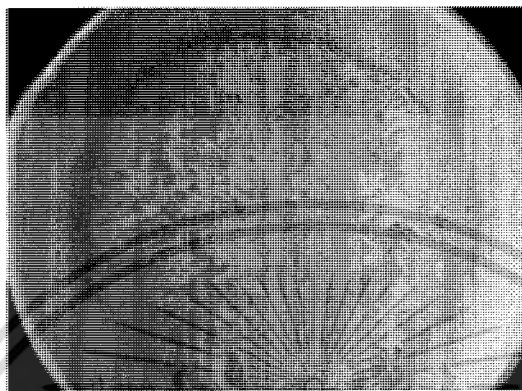
#### ช่วงที่ 2 การเตรียมถ้ำเกลบที่ผ่านการต้มกรด

1. ชั่งเกลบประมาณ 100 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. เทกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร 750 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ที่มีเกลบ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. ล้างเกลบที่ผ่านการต้มกรดแล้วด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH = 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

104143

4. นำเกลบที่ผ่านการล้างกรดแล้ว ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ชั่งเกลบที่ผ่านการอบแล้วประมาณ 22 กรัมใส่ชามระเหยแล้วนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง
6. นำเถ้าที่มอด แล้วไปผ่านการร่อนตะแกรงขนาดรู 125 ไมโครเมตร

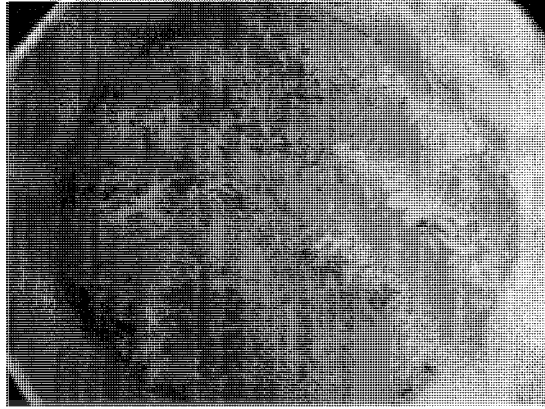


รูปที่ 3.2 เถ้าเกลบที่ได้จากการเผาเกลบที่ผ่านการต้มกรด

### ช่วงที่ 3 การเตรียมซิติกาที่สกัดจากเถ้าเกลบไม่ผ่านการต้มกรด

1. นำเกลบเถ้าเกลบ 10 กรัมมาละลายในน้ำ 60 มิลลิลิตร
2. ปรับ pH ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้มีค่าประมาณ 7 โดยวัดค่า pH ด้วย Universal indicator
3. นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. กรองด้วยชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
5. นำตะกอนที่กรองได้ไปละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณ 60 มิลลิลิตร
6. ให้ความร้อนจนเดือดพร้อมปั่นกวน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
7. กรองเอาตะกอนออก พร้อมล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน 100 มิลลิลิตร
8. นำสารละลายที่ได้จากการกรองทั้งหมด ทิ้งไว้ให้เย็น
9. ปรับ pH ของสารละลายดังกล่าวให้มีค่าเป็น 7 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ และใช้ฟีนอล์ฟทาลินเป็นอินดิเคเตอร์
10. ปล่อยให้เกิดเจลเป็นเวลา 18 ชั่วโมง
11. เติมน้ำลงไป 100 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนบดเจลให้แตกตัว
12. นำไปเหวี่ยงแยกเจลออกที่ 2500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที
13. นำของเหลวที่ได้จากการเหวี่ยงแยกทิ้งไป ผสมน้ำลงไปใหม่แล้วเหวี่ยงแยกอีก ทำซ้ำ 2-3 ครั้ง
14. นำเจลที่ผ่านการล้างแล้ว ไปอบในเครื่องอบแห้ง ที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
15. นำซิติกาที่ผ่านการอบ มาบดและร่อนตะแกรงขนาดรู 125 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ซิลิกาที่สกัดได้จากเถ้าแกลบที่ไม่ผ่านการต้มกรด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

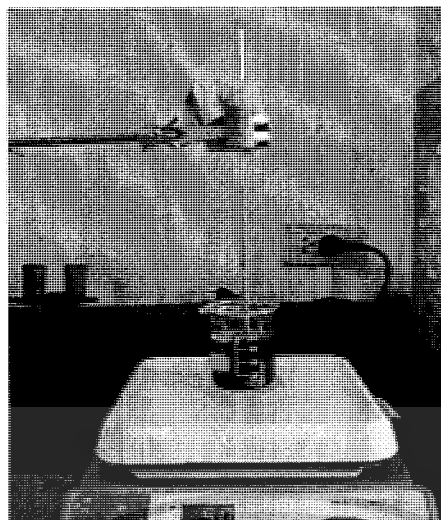
### 3.2 การทดลองการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบเพื่อหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

#### 3.2.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- สารเคมี
  1. น้ำมันปาล์มดิบ
  2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์
  3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน
- อุปกรณ์
  1. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
  2. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารด้วยแม่เหล็ก
  3. เครื่องเหวี่ยงแยก
  4. เทอร์โมมิเตอร์
  5. นาฬิกาจับเวลา
  6. ซ้อนตักสาร
  7. บิวเรตขนาด 25 มิลลิลิตร
  8. บีกเกอร์ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
  9. หลอดหยด
  10. ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
  11. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

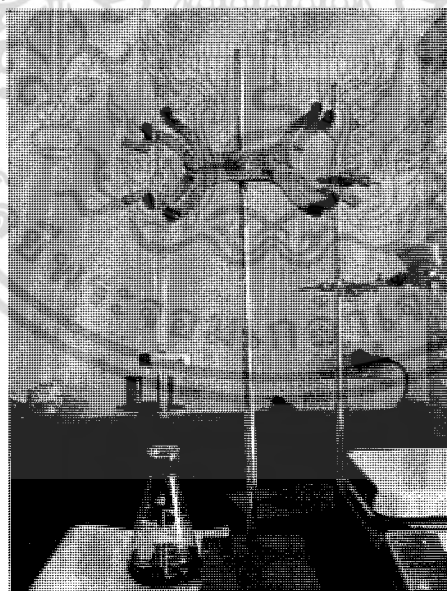
#### 3.2.2 วิธีดำเนินการทดลอง

1. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาณ 250 มิลลิลิตร แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกปริมาตร
2. ชั่งน้ำมันปาล์มดิบประมาณ 10 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร 3 ใบ นำไปให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิ 50 °C
3. นำน้ำมันที่ได้ไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์จนถึงจุดยุติ บันทึกปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้
4. ชั่งน้ำมันปาล์มดิบประมาณ 50 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนพร้อมทั้งปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวน จนกระทั่งอุณหภูมิ 50 °C และให้ความร้อนต่อเนื่องเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง



รูปที่ 3.4 ชุดทดลองการดูดซับ

5. ชั่งถ้ำเกลือที่ไม่ผ่านการแช่กรดประมาณ 1 กรัม เทถ้ำเกลือที่ชั่งได้ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำมันปาล์มดิบ และเริ่มจับเวลาของการดูดซับ
6. เมื่อครบ 1 ชั่วโมง นำน้ำมันปาล์มดิบไปแห้งแยกเพื่อแยกตัวดูดซับออก ด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก
7. ชั่งน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการเหวี่ยงแยกเพื่อเอาตัวดูดซับออกแล้วประมาณ 10 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร 3 ใบ
8. นำน้ำมันที่ชั่งได้ไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์จนถึงจุดยุติ



รูปที่ 3.5 การไทเทรตเพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระ

9. นำปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่บันทึกไปคำนวณเพื่อหาค่าของกรดไขมันอิสระที่เหลือ
10. ทำการทดลองข้อที่ 4 ถึงข้อที่ 9 ซ้ำ โดยเปลี่ยนตัวดูดซับจากถ้ำเกลือที่ไม่ผ่านการต้มกรดเป็นถ้ำเกลือที่ผ่านการต้มกรด และซิลิกาที่สกัดจากถ้ำเกลือไม่ผ่านการต้มกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ทำการทดลองข้อที่ 4 ถึงข้อที่ 10 ซ้ำ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของตัวดูดซับทุกชนิดเป็น 0.5 และ 2 กรัม

**หมายเหตุ** ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไม่แน่นอน ดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องมีการไทเทรตเพื่อปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนทดลอง

### 3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะและคุณสมบัติของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

#### 3.2.1 การตรวจความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยวิธีการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction หรือ XRD)

การวิเคราะห์ลักษณะผลึกของตัวดูดซับ โดยใช้หลักการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ความละเอียดสแกนที่ 2 $\theta$  และลำดับชั้นการสแกนอยู่ระหว่าง 0 – 90 องศา

#### 3.2.2 การตรวจวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence หรือ XRFs)

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง

#### 3.2.3 การตรวจวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนโดยใช้วิธีบีอีที (BET, Brunauer-Emmett-Teller Method)

การตรวจวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (BET, Brunauer-Emmett-Teller Method) โดยอาศัยการดูดซับของไนโตรเจนบนตัวดูดซับ

### 3.4 การทดลองหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

#### 3.4.1 สารเคมีและอุปกรณ์

- สารเคมี
  1. น้ำมันปาล์มดิบ
  2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์
  3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลิน
- อุปกรณ์
  1. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
  2. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารด้วยแม่เหล็ก
  3. เครื่องเหวี่ยงแยก
  4. เทอร์โมมิเตอร์
  5. นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ซ็อนตักสาร
7. บิวเรตขนาด 25 มิลลิลิตร
8. บีกเกอร์ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
9. หลอดหยด
10. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

### 3.4.2 วิธีดำเนินการทดลอง

1. ชั่งน้ำมันปาล์มดิบประมาณ 10 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร 3 ใบ นำไปให้ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$
2. นำน้ำมันที่ได้ไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์จนถึงจุดยุติ บันทึกปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้
3. ชั่งน้ำมันปาล์มดิบประมาณ 50 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนพร้อมทั้งปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวน จนกระทั่งอุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  และให้ความร้อนต่อเนื่องเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง
4. ชั่งตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีที่ประมาณ 1 กรัม เทเข้าเกลบที่ซึ่งได้ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำมันปาล์มดิบ และเริ่มจับเวลาของการดูดซับ
5. เมื่อครบ 1 ชั่วโมง นำน้ำมันปาล์มดิบไปแห้งแยกเพื่อแยกตัวดูดซับออก ด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก
6. ชั่งน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการเหวี่ยงแยกเพื่อเอาตัวดูดซับออกแล้วประมาณ 10 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร 3 ใบ
7. นำน้ำมันที่ซึ่งได้ไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์จนถึงจุดยุติ
8. นำปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่บันทึกไปคำนวณเพื่อหาค่าของกรดไขมันอิสระที่เหลือ
9. ทำการทดลองข้อที่ 3 ถึงข้อที่ 8 ซ้ำ โดยระยะเวลาในการดูดซับเป็น 3.5 และ 7 ชั่วโมง
10. ทำการทดลองข้อที่ 3 ถึงข้อที่ 9 ซ้ำ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของตัวดูดซับเป็น 0.5 0.75 1.5 และ 2 กรัม

### 3.5 การหาเส้นสมมูลของการดูดซับ

1. ทำการทดลองหาปริมาณกรดไขมันอิสระที่เวลาสมมูลเพิ่มเติมจากการทดลองตอนที่ 3.4 โดยเฉพาะที่เวลาสมมูลเท่านั้น โดยใช้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุดทำการทดลองในปริมาณ 0.4 0.85 3.4 และ 5 กรัม
2. นำข้อมูลระหว่างความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่เหลือที่เวลาสมมูลและความสามารถในการดูดซับไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่เหลือที่เวลาสมมูลเป็นแกน x และความสามารถในการดูดซับที่เวลาสมมูลเป็นแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปราย

#### 4.1 การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบเพื่อหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ผลการศึกษาการทดลองการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.1 ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับ 0.5 กรัมต่อน้ำมันปาล์มดิบ 50 กรัม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 °C

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณกรดไขมันอิสระ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมของกรดไขมันอิสระต่อกรัมของตัวดูดซับ)
ก่อนการดูดซับ	2.8755	-
ผ่านการดูดซับด้วยถ้ำ เกลบไม้ต้มกรด	2.8406	35.71
ผ่านการดูดซับด้วยถ้ำ เกลบต้มกรด	2.8259	49.55
ผ่านการดูดซับด้วยชิตี กาที่สกัดจากถ้ำเกลบ ไม้ต้มกรด	2.7917	83.76

ตารางที่ 4.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับ 1 กรัมต่อน้ำมันปาล์มดิบ 50 กรัม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 °C

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณกรดไขมันอิสระ (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมของกรดไขมันอิสระต่อกรัมของตัวดูดซับ)
ก่อนการดูดซับ	2.8839	-
ผ่านการดูดซับด้วยถ้ำ แกลบไม่ต้มกรด	2.8295	27.27
ผ่านการดูดซับด้วยถ้ำ แกลบต้มกรด	2.8125	37.08
ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกา กาที่สกัดจากถ้ำแกลบ ไม่ต้มกรด	2.7293	74.03

ตารางที่ 4.3 ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับ 2 กรัมต่อน้ำมันปาล์มดิบ 50 กรัม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 °C

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณกรดไขมันอิสระ (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมของกรดไขมันอิสระต่อกรัมของตัวดูดซับ)
ก่อนการดูดซับ	2.8694	-
ผ่านการดูดซับด้วยถ้ำ แกลบไม่ต้มกรด	2.7604	28.35
ผ่านการดูดซับด้วยถ้ำ แกลบต้มกรด	2.7391	33.04
ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกา กาที่สกัดจากถ้ำแกลบ ไม่ต้มกรด	2.5547	79.25

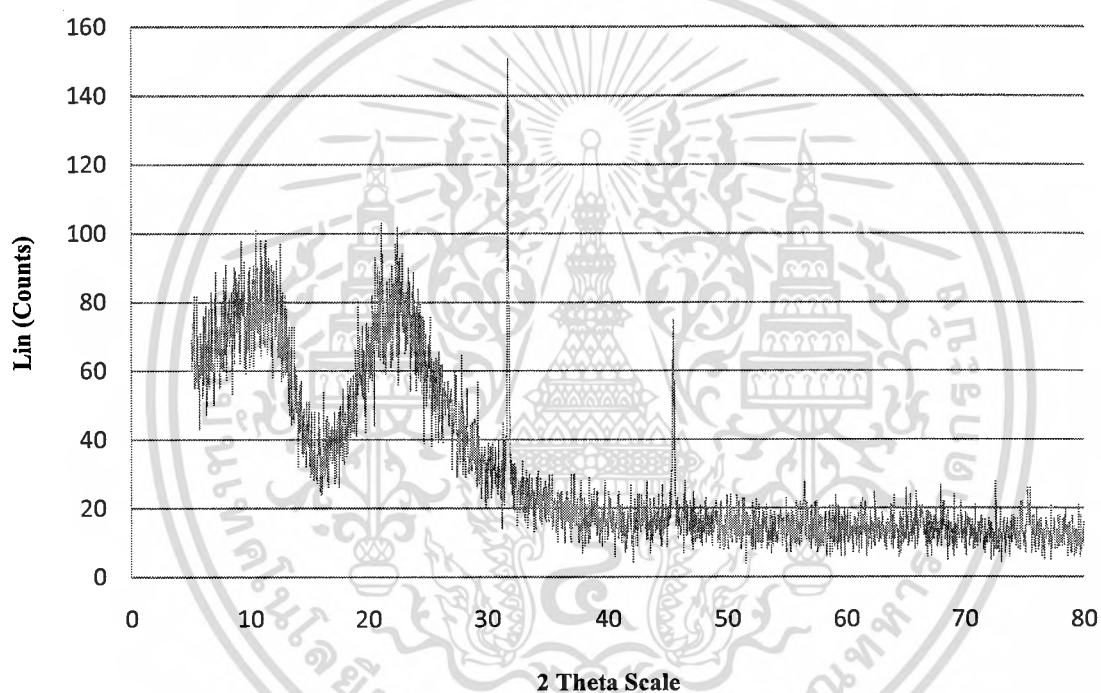
จากการทดลองดูดซับกรดไขมันอิสระที่เวลา 1 ชั่วโมง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณตัวดูดซับเป็น 0.5 1 และ 2 กรัม พบว่าการในทุก ๆ การทดลองซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าถ้ำแกลบต้มกรด และถ้ำแกลบไม่ต้มกรด เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าซิลิกาที่สกัดจากถ้ำแกลบไม่ต้มกรดเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและคุณสมบัติของซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบไม่คัมกรด

### 4.2.1 ผลการตรวจความเป็นผลึกของซิลิกาโดยวิธีการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction หรือ XRD)

ศึกษาลักษณะผลึกของตัวดูดซับโดยใช้หลักการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ ใช้ความละเอียดสแกนที่  $2\theta$  และลำดับขั้นการสแกนอยู่ระหว่าง  $0 - 90$  องศา จากรูปที่ 4.1 พบว่าปรากฏพีคที่สามารถเห็นได้ชัดเจน ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $31.6$  และ  $45.4$  องศา และเมื่อเทียบมาตรฐานแล้วพบว่าเป็นพีคของซิลิคอนคลอไรด์ (Silicon chloride,  $\text{SiCl}_4$ ) เพราะฉะนั้นตัวดูดซับนี้จะมีบางส่วนเป็นผลึก (Crystallize) และบางส่วนไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐาน (Amorphous)



รูปที่ 4.1 ผลการตรวจความเป็นผลึกของตัวดูดซับโดยวิธีการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์

#### 4.2.2 ผลการตรวจวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence หรือ XRFs)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของซิลิกาโดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ ในรูปของธาตุและในรูปออกไซด์ มีดังต่อไปนี้

SiO <sub>2</sub>	92.50 %
Na <sub>2</sub> O	5.50 %
MgO	0.08 %
SO <sub>3</sub>	0.04 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47 %
K <sub>2</sub> O	0.21 %
Cl	0.99 %

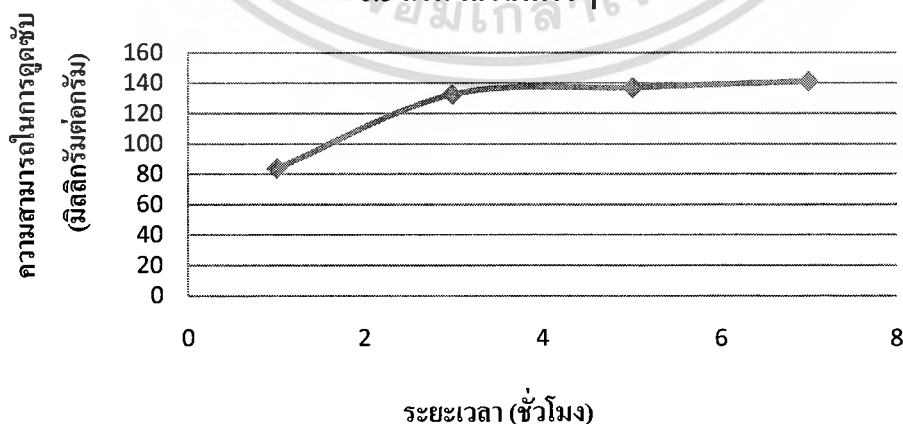
#### 4.2.3 ผลการตรวจวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรด้วยวิธีบีอีที (BET, Brunauer-Emmett-Teller Method)

พื้นที่ของตัวดูดซับ (Surface Area) เท่ากับ 223.4 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ และ ขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Average Pore Diameter) เท่ากับ 30.98 อังสตรอม

#### 4.3 การหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด

การหาระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของ ซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรด สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 4.2 – 4.6

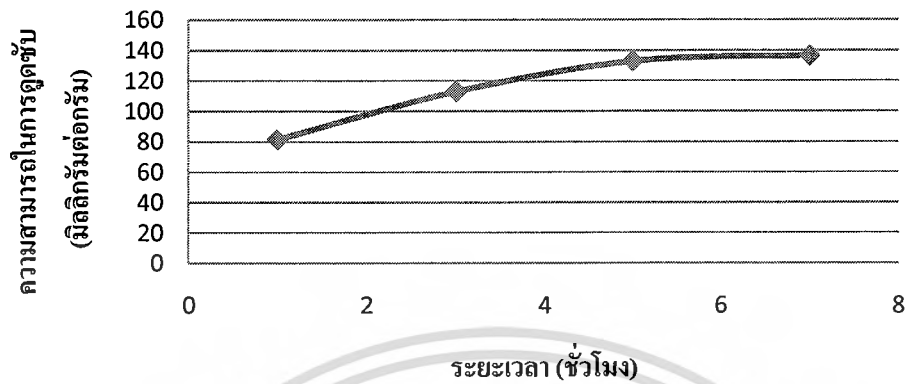
ความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของซิลิกาปริมาณ 0.5 กรัม ที่เวลาต่าง ๆ



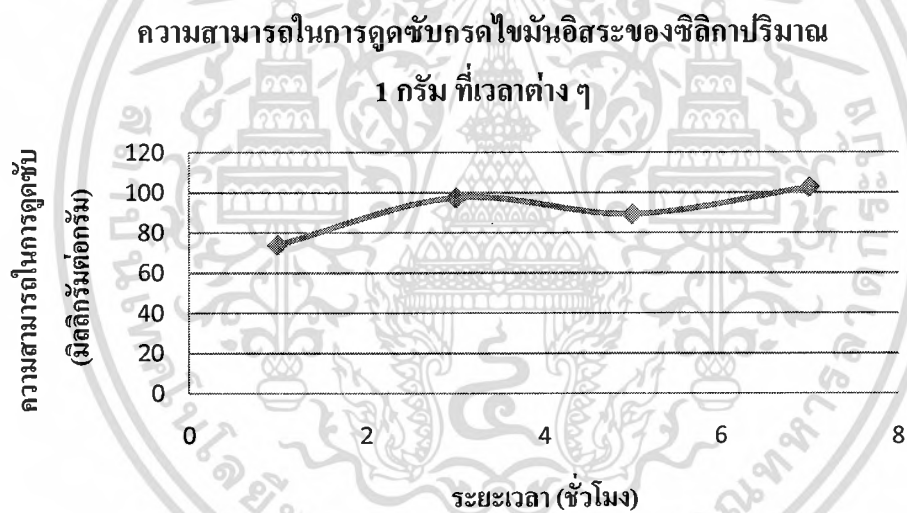
รูปที่ 4.2 กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของซิลิกาปริมาณ 0.5 กรัม ที่เวลาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของชิลิกาปริมาณ  
0.75 กรัม ที่เวลาต่าง ๆ

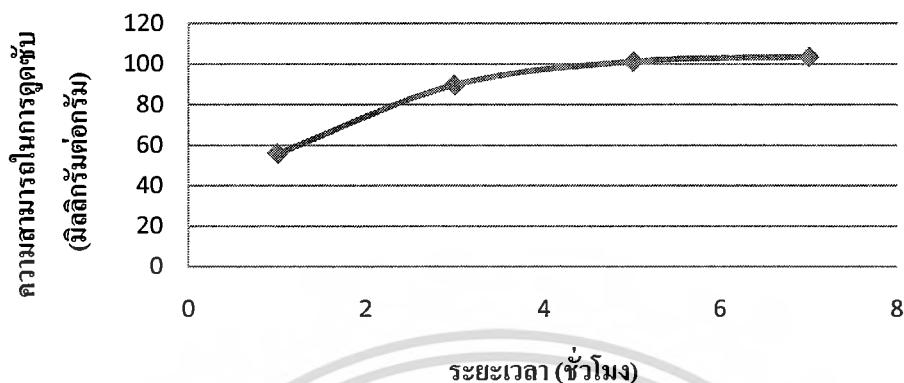


รูปที่ 4.3 กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของชิลิกาปริมาณ 0.75 กรัม ที่เวลาต่าง ๆ

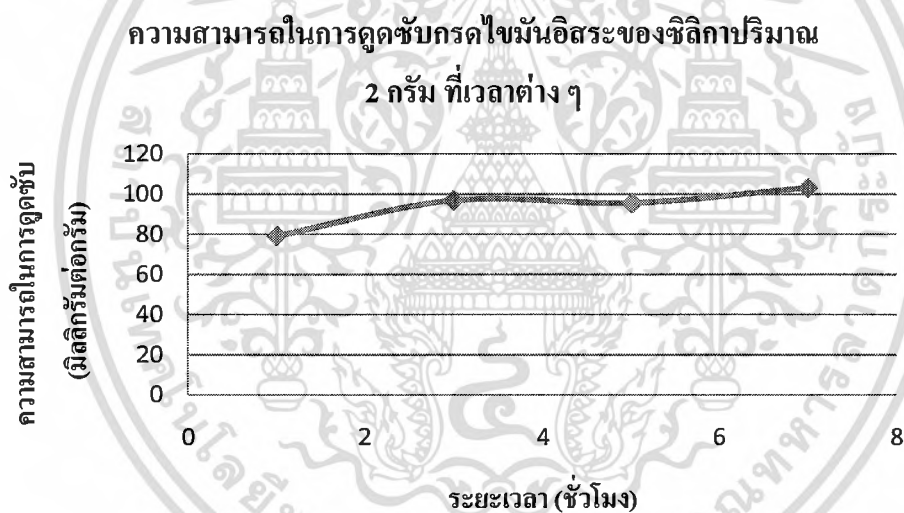


รูปที่ 4.4 กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของชิลิกาปริมาณ 1 กรัม ที่เวลาต่าง ๆ

ความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของชิลิกาปริมาณ  
1.5 กรัม ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของชิลิกาปริมาณ 1.5 กรัม ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.6 กราฟความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระของชิลิกาปริมาณ 2 กรัม ที่เวลาต่าง ๆ

จากกราฟรูปที่ 4.2 – 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการดูดซับกับระยะเวลาการดูดซับ เมื่อใช้ชิลิกาที่สกัดจากถั่วเหลืองที่ไม่ดัดแปรในปริมาณ 0.5 0.75 1.5 และ 2 กรัมตามลำดับพบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นมากในช่วง 1 – 3 ชั่วโมงแรกของการทดลอง และเพิ่มขึ้นอย่างช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป และมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมากในช่วง 5 – 7 ชั่วโมง ดังนั้นจึงสรุปได้ระยะเวลาที่เข้าสมดุลของการดูดซับ คือ ประมาณ 7 ชั่วโมง

#### 4.4 การหาเส้นสมมูลของการดูดซับและสมการสมมูลของการดูดซับ

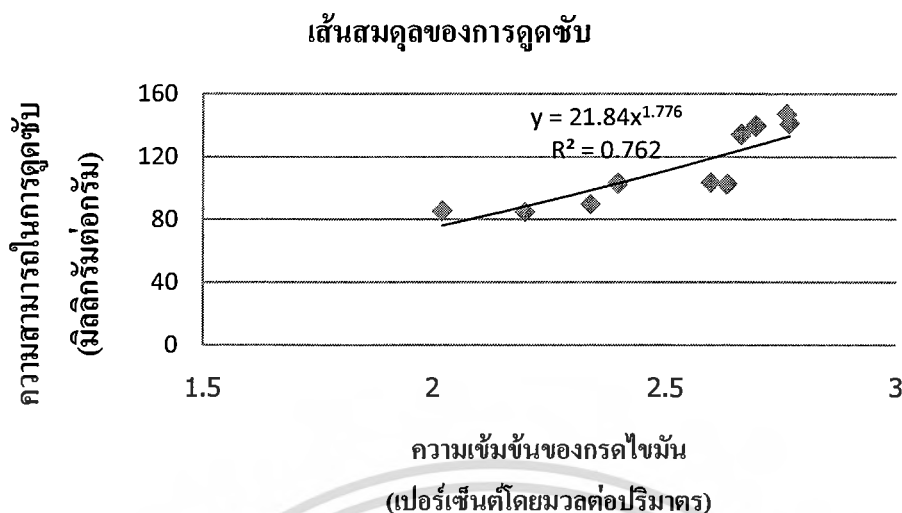
##### 4.4.1 การหาเส้นสมมูลของการดูดซับ

เมื่อทำการทดลองหาความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านการดูดซับด้วย ซิลิกาที่สกัดจากถั่วเหลืองไม่ต้มกรดที่ระยะเวลาสมมูลของการดูดซับ สามารถสร้างตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับและความสามารถในการดูดซับที่เวลาสมมูลของปริมาณซิลิกาที่ใช้ในแต่ละการทดลองได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ปริมาณกรดไขมันที่เหลือหลังการดูดซับและความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระที่เวลาสมมูล

ปริมาณซิลิกาที่ใช้ (กรัม)	ความเข้มข้นของกรดไขมันหลังการดูดซับ (เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0.40	2.7629	147.2625
0.50	2.7689	141.1541
0.75	2.6954	139.6679
0.85	2.6635	134.3116
1.00	2.6334	102.6569
1.50	2.5969	103.5891
2.00	2.3953	103.1734
3.00	2.3365	89.92935
4.00	2.1969	85.05514
5.00	2.0202	85.63969

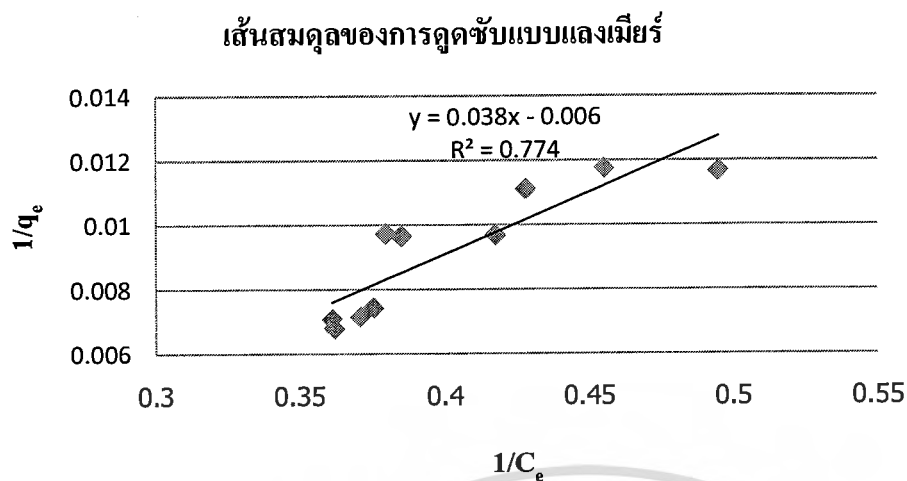
จากตารางที่ 4.4 เมื่อนำปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือหลังการดูดซับและความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระที่เวลาสมมูล มาสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 4.7



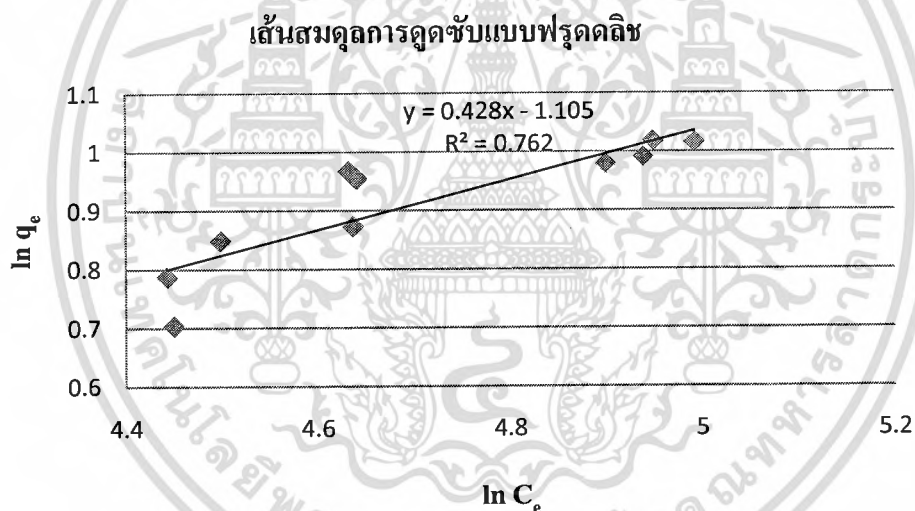
**รูปที่ 4.7 เส้นสมมูลของการดูดซับ**

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้สมการแบบจำลองต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยซิลิกาจากถ้ำ แกลบไม่ต้มกรด สามารถอธิบายผลการทดลองได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ 2 สมการ คือ ไอโซเทอม การดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรูดลิช ซึ่งจากการวิเคราะห์สมการแบบแลงเมียร์ และแบบฟรูดลิช ให้เป็นสมการเชิงเส้นตามสมการที่ 2.6 และ 2.9 ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ โดยสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ คือ  $\frac{1}{q_c} = 0.0385 \frac{1}{C_c} - 0.0063$  หรือ  $q_c = \frac{158.7301 C_c}{6.1111 - C_c}$  และสมการไอโซเทอมแบบฟรูดลิช คือ  $\ln q_c = 0.4289 \ln C_c - 1.1055$  หรือ  $q_c = 0.3310 C_c^{0.4289}$  และค่า  $R^2$  ของการดูดซับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และแบบฟรูดลิช คือ 0.7746 และ 0.7621 ตามลำดับ ซึ่งค่า  $R^2$  ของสมการไอโซเทอมทั้งสองยังมีค่าต่ำ เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วย ซิลิกาไม่สามารถอธิบายด้วยสมการแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรูดลิช



**รูปที่ 4.8** การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถา  
กล้วยไม้ต้มกรดด้วยสมการแบบจำลองแลงเมียร์



**รูปที่ 4.9** การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถา  
กล้วยไม้ต้มกรดด้วยสมการแบบจำลองฟรูดลิช

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับที่เป็นผลิตภัณฑ์จากแกลบ เพื่อนำมาดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ พบว่าตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ ซิลิกาที่สกัดจากแกลบไม่ต้มกรด

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิกาที่สกัดจากแกลบไม่ต้มกรดด้วยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ ซิลิกา ร้อยละ 92.5 และเมื่อตรวจสอบพื้นที่ผิวด้วยบีอีที พบว่าได้พื้นที่ผิวการดูดซับเท่ากับ 223.4 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ

จากการศึกษาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับพบว่า ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 – 3 ชั่วโมงแรก และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วง 5 – 7 ชั่วโมง จึงสรุปว่าสมดุลของการดูดซับอยู่ที่ระยะเวลา 7 ชั่วโมง

จากการศึกษาสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ได้ความสัมพันธ์ คือ  $q_e = \frac{158.7301C_e}{6.1111 - C_e}$  และสมการไอโซเทอมแบบฟรูดลิช ได้ความสัมพันธ์ คือ  $q_e = 0.3310C_e^{0.4289}$  ค่า  $R^2$  ของการดูดซับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และแบบฟรูดลิช คือ 0.7746 และ 0.7621 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวยังมีค่าต่ำ แสดงว่าการทดลองนี้ยังไม่สามารถอธิบายด้วยสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรูดลิช

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากค่า  $R^2$  ในสมการไอโซเทอมทั้งแลงเมียร์และฟรูดลิช ยังมีค่าต่ำ แสดงว่าการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบครั้งนี้อาจจะต้องหาสมการการดูดซับที่มีความเหมาะสมมากกว่านี้ในการอธิบายกลไกการดูดซับ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ไพศาล นาคพิพัฒน์. กระบวนการอุตสาหกรรมสำหรับวิศวกรรมเคมี, กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [2] Mohammad F. Ali, Bassam M. El Ali, James G. Speight., **Handbook of Industry Chemistry Organic Chemicals.**, McGraw Hill, 2005
- [3] รศ.ดร.ดาวลัย ฉิมภู , ชีวเคมี เล่ม 1 โมเลกุลชีวภาพ , พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ประกายพริก. 2538.
- [4] อุษณีย์ วินิจเขตคำนวน , คู่มือเรียนชีวเคมี โดย E-learning , เชียงใหม่. : โรงพิมพ์ดาวคอม กราฟฟิค. 2548.
- [5] Kent, J. A., **Riegel's Handbook of Industrial Chemistry**, 9<sup>th</sup> ed., Chapman & Hall, New York, 1992
- [6] Frank L. Slejko, **Adsorption Technology: A Step-by-Step Approach to process Evaluation and Applications**, New York: Marcel Dekker, 1985.
- [7] จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์, กรุงเทพฯ , โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
- [8] รศ.ดร. วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, **ปฏิกิริยาเร่ง เคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี**, กรุงเทพฯ , สำนักพิมพ์ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [9] Charles, N., Satterfield, 1991, **Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice**. 2<sup>nd</sup> ed., New York: McGraw Hill Book Company, pp. 31-50.
- [10] Vasanth Kumer., Subanandam , Ramamurthi. And Sivanesan .2004. **Solid Liquid Adsorption for Wastewater Treatment (Online)**. : <http://www.eco-web.com/cgi-local/index.html>
- [11] กรมวิทยาศาสตร์บริการ, การศึกษาเรื่องการทำคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ, รายงานกิจกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ฉบับที่ 38, 2523: 65-73.
- [12] มานัด แก้วถาวร, ผลของโซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, 2537.
- [13] ศักดิ์จิตรา ต้นสมบุร์ ลัดดา ยาวีร์ชน และ ชลธา ไกรวัตนุสรณ์, การผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากขานอ้อย, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538: 15-18.

- [14] Christie J. Geankoplis., **Transport Process and Separation Process Principles 4<sup>th</sup>**. Prentice Hall, 2003
- [15] <http://www2.diw.go.th/KM/pdf/%5Cknow%5Cgas.pdf>
- [16] Oscik, J., **Adsorption**. New York, John Wiley & Sons, pp. 157-193.
- [17] Noll, K.E., Gounaroius, V. and Hou, W., 1992, **Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control**. Michigan, Lewis, pp. 199-216
- [18] จีรพา วงศ์สิงหรา และ ภัทรภรณ์ หลักทอง, การศึกษาการดูดซับสิ่งเจือปนในน้ำมันไบโอดีเซล, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550: 16
- [19] McCabe, Warren L., Smith, Julain C. and Harriott, Peter. 2005. Unit Operation of Chemical Engineering. 7<sup>th</sup> Ed. Singapore: McGraw-Hill.
- [20] J. James, M.S. Rao, Am. Ceram. Soc. Bull. 65 (1986) 1177.
- [21] Kalapathy, U., Proctor, A., & Shultz, J., **A simple method for production of pure silica from rice hull ash**. Bioresource Technology 73 (2000) 257-262
- [22] F. Adam, **The preparation and Adsorption Studies on Silica from Rice Husk Ash**, MS thesis, Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia, 1991.
- [23] Proctor, A., and S. Palaniappan, **Adsorption of Soy Oil Free Fatty Acids by Rice Hull Ash from Soy Oil**, Ibid. 67:15-17 (1990)
- [24] Brown, H. G., & Snyder, H. E. (1985). **Adsorption of soy oil phospholipids on silica**. Journal of the American Oil Chemists' Society 62, 753 – 756
- [25] Moonjung Kim, Suk Hoo Yoon, Eunsoo Choi, Bogim Gil., **Comparison of the adsorbent performance between rice hull ash and rice hull silica gel according to their structural differences**. LWT 41 (2008) 701 – 706
- [26] Sevil Ozgul & Selma Turkey., **Purification of FAME by Rice Hull Ash Adsorption**. J10342 , JAOCS 80, 373 – 376
- [27] สันติ รัตนวีรนนท์, **เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบ**, วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2547



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ก.1 ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังทำการทดสอบด้วยปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการไทเทรต (g)	ปริมาตร NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.17	11.1	2.9409	2.8754	-
		11.64	12.1	2.8009		
		12.05	12.9	2.8845		
เม็ดกลมไม่ตมกรด	51.12	10.02	10.6	2.8504	2.8405	35.7150
		10.05	10.6	2.8419		
		10	10.5	2.8292		
เม็ดกลมตมกรด	49.95	10.01	10.5	2.8263	2.8258	49.5495
		10.1	10.7	2.8545		
		10.02	10.4	2.7966		
ซึติกาที่สกัดจากถั่วเหลืองไม่ตมกรด	50.01	10.01	10.3	2.7725	2.7917	83.7590
		10.06	10.4	2.7855		
		10.33	10.8	2.8170		

หมายเหตุ ปริมาณของกรดไขมันอิสระและความสามารถในการดูดซับของทุกตารางสามารถคำนวณได้ตามภาคผนวก ข

ตารางที่ ก.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังทำการทดลองดูดซับ ด้วยปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.44	11.3	2.9164	2.8838	-
		10.81	11.5	2.8664		
		10.52	11.2	2.8686		
เส้นใยที่ไม่ได้มีการดูดซับ	50.19	10.42	10.8	2.7927	2.8295	27.2733
		11.06	11.8	2.8747		
		10.22	10.7	2.8210		
เส้นใยที่ได้จากการดูดซับ	51.99	10.66	11.1	2.8057	2.8125	37.0807
		10.15	10.8	2.8670		
		10.72	11	2.7648		
ชนิดที่สกัดจากถั่วเหลืองที่ไม่ได้มีการดูดซับ	51.73	11.22	11.3	2.7137	2.7393	74.0355
		10.59	10.8	2.7479		
		10.46	10.7	2.7563		

ตารางที่ ก.3 ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนและหลังทำการทดลองดูดซับ ด้วยปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

ชนิดของตัวดูดซับ	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการทดลอง (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ผ่านทางการดูดซับ	-	12.22	12.9	2.844439	2.8694	-
		12.29	12.7	2.78439		
		10.31	11.4	2.97937		
เถ้าแกลบไม่ต้มกรด	52.02	10.2	10.6	2.800167	2.7604	28.3545
		10.21	10.4	2.744643		
		11.09	11	2.672633		
เถ้าแกลบต้มกรด	50.74	10.5	10.7	2.745824	2.7391	33.0450
		10.34	10.5	2.736194		
		10.3	10.7	2.799141		
ชิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบไม่ต้มกรด	50.37	11.06	10.4	2.533707	2.5547	79.2451
		10.18	9.8	2.593919		
		10.41	9.8	2.536609		

ตารางที่ ก.4 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิติลิกที่สกัดจากถั่วเหลืองไม่ต้มกรดในปริมาณ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการไทเทรต (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.36	11.1	2.886964	2.8951	-
		10.35	11.1	2.889754		
		10.19	11	2.908685		
3	50.98	11.21	11.4	2.740169	2.7652	132.4422
		10.23	10.6	2.791955		
		10.53	10.8	2.76359		

ตารางที่ ก.5 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิติลิกที่สกัดจากถั่วเหลืองไม่ต้มกรดในปริมาณ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 5 ชั่วโมง

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการไทเทรต (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.02	10.85	2.917697	2.8955	-
		12.14	12.95	2.874281		
		10.1	10.85	2.894587		
5	50.07	10.01	10.35	2.786021	2.7585	137.1285
		10.33	10.45	2.725801		
		10.09	10.35	2.763932		

ตารางที่ ก.6 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากถั่วแกลบไม่ต้มกรดในปริมาณ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 7 ชั่วโมง

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการทดลอง (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10	10.8	2.91006	2.9063	-
		10.15	10.9	2.893601		
		10.12	10.95	2.915492		
7	51.35	10.04	10.45	2.804534	2.7689	141.1541
		10.08	10.45	2.793405		
		11.24	11.3	2.708883		

ตารางที่ ก.7 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากถั่วแกลบไม่ต้มกรดในปริมาณ 1 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการทดลอง (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.61	11.1	2.81894	2.8823	-
		10.37	11.1	2.88418		
		13.18	14.4	2.943915		
3	50.27	10.23	10.2	2.686598	2.6883	97.5338
		10.6	10.4	2.64366		
		10.05	10.2	2.734716		

ตารางที่ ก.8 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากถั่วเหลืองไม่ต้มกรดในปริมาณ 1 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 5 ชั่วโมง

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการไทเทรต (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	11.45	12.2	2.870996	2.8952	-
		10.1	10.95	2.921265		
		10.29	11.05	2.893511		
5	50.27	10.16	10.2	2.705108	2.7175	89.3257
		10.08	10.25	2.739943		
		10.25	10.3	2.707644		

ตารางที่ ก.9 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากถั่วเหลืองไม่ต้มกรดในปริมาณ 1 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 7 ชั่วโมง

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการไทเทรต (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.56	10.9	2.781255	2.8002	-
		10.2	10.7	2.826583		
		12.88	13.35	2.792824		
7	50.23	10.14	9.95	2.644011	2.5958	102.6596
		10.54	10.05	2.569234		
		10.31	9.85	2.57428		

ตารางที่ ก.10 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรดในปริมาณ 2 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการไทเทรต (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	12.22	12.9	2.844439	2.8694	-
		12.29	12.7	2.78439		
		10.31	11.4	2.97937		
3	50.37	11.06	10.4	2.533707	2.5547	79.2457
		10.18	9.8	2.593919		
		10.41	9.8	2.536609		

ตารางที่ ก.11 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาเคลือบไม้ต้มกรดในปริมาณ 2 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 5 ชั่วโมง

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการไทเทรต (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.49	10.95	2.812657	2.7999	-
		10.62	11.05	2.803599		
		10.6	10.95	2.783469		
5	50.27	10.25	9.2	2.418478	2.4192	95.6678
		10.41	9.2	2.381306		
		10.03	9.15	2.458093		

ตารางที่ ก.12 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถาแก่กลับไม่ต้มกรดในปริมาณ 2 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลา 7 ชั่วโมง

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการไทเทรต (g)	ปริมาตร NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	11.03	11.3	2.760458	2.8070	-
		10.64	11.05	2.798329		
		11.72	12.45	2.862331		
7	50.12	10.79	9.4	2.347386	2.3953	103.1734
		10.31	9.25	2.417471		
		10.35	9.3	2.421145		

ตารางที่ ก.13 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเส้นแกลบไม่ต้มกรดในปริมาณ 0.75 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลาต่าง ๆ

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการทดลอง (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.03	10.95	2.941653	2.9002	-
		10.63	11.05	2.800962		
		10.02	11	2.958034		
1	50.37	10.5	10.7	2.745824	2.7790	81.3853
		10.21	10.65	2.810619		
		10.32	10.65	2.780661		
3	50.09	10.05	10.3	2.761527	2.7311	113.9382
		10.07	10.15	2.715906		
		10.07	10.15	2.715906		
5	50.01	10.04	10.1	2.710603	2.7007	132.9785
		10.1	10.15	2.707839		
		10.19	10.15	2.683923		
7	50.06	10.05	10.1	2.707905	2.6954	136.6794
		10.15	10.15	2.6945		
		10.19	10.15	2.683923		

ตารางที่ ก.14 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเส้นแสบที่ไม่ตกครูดในปริมาณ 1.5 กรัม อุณหภูมิ 50 °C ที่เวลาต่างๆ

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการไทเทรต (g)	ปริมาตร NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.1	10.9	2.907926	2.9054	-
		10.02	10.85	2.917697		
		10.16	10.9	2.890753		
1	50.02	10.3	10.4	2.72066	2.7378	55.8847
		10.31	10.4	2.718021		
		10.05	10.35	2.774933		
3	50.02	10.17	10	2.649459	2.6365	89.6957
		10.33	10	2.608422		
		10.06	9.9	2.651645		
5	50.06	10.11	9.8	2.611879	2.6021	101.2164
		10.16	9.75	2.585765		
		10.07	9.75	2.608875		
7	50.35	10.08	9.65	2.579556	2.5969	103.5614
		10	9.65	2.600193		
		10.01	9.7	2.611054		

ตารางที่ ก.15 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากถั่วเหลืองเป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 °C ที่ปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง (hr)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ในการทดลอง (ml)	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ	เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระโดยเฉลี่ย	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
ไม่ผ่านการดูดซับ	-	10.09	10.9	2.910808	2.8191	-
		12.01	12.85	2.882958		
		10.24	10.95	2.881326		
0.4	50.41	10.96	11	2.704334	2.7626	147.2625
		10.04	10.45	2.804534		
		10.18	10.5	2.779199		
0.85	50.02	10.2	10.05	2.654875	2.6635	134.3116
		10.15	10.05	2.667953		
		10.1	10	2.667822		
3	50.01	10.32	8.85	2.31069	2.3365	89.9473
		10.04	8.7	2.334875		
		10.03	8.8	2.364068		
4	50.03	10.21	8.15	2.15085	2.1969	85.8187
		10.2	8.35	2.205792		
		10.01	8.3	2.234201		
5	50.10	10.11	7.55	2.012213	2.0202	85.6390
		10.09	7.55	2.016202		
		10.01	7.55	2.032315		

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณ

## ข.1 การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ

วิธีการคำนวณหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ สามารถหาได้จากสมการ

$$\%FFA = \frac{C_{NaOH} \times V_{NaOH} \times 26.945}{W_{oil}}$$

เมื่อ	% FFA	คือ	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ	(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณ)
	$C_{NaOH}$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต	ซึ่งในการทดลองใช้ 0.1 M
	$V_{NaOH}$	คือ	ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต	(มิลลิลิตร)
	$W_{oil}$	คือ	น้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ไทเทรต	(กรัม)

## ตัวอย่างที่ 1

จากตาราง ก.1 ในการทดลองครั้งที่ 1 ของชุดการทดลองที่ไม่ผ่านการดูดซับกรดไขมัน ใช้ปริมาณน้ำมันในการทดลองไทเทรตเท่ากับ 10.17 มิลลิลิตร และปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เท่ากับ 11.1 มิลลิลิตร เพราะฉะนั้นความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระเท่ากับ

$$\%FFA = \frac{0.1 \times 11.1 \times 26.945}{10.17} = 2.9409 \%$$

## ข.2 การคำนวณความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ในแต่ละการทดลอง

วิธีการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ในแต่ละการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C = \frac{(\%FFA_i - \%FFA_f) \times V_{oil} \times 1000}{W_{abs} \times 100}$$

เมื่อ	C	คือ	ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ	(มิลลิกรัมตัวถูกดูดซับต่อกรัมตัวดูดซับ)
	%FFA <sub>i</sub>	คือ	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบก่อนการดูดซับ	
	%FFA <sub>f</sub>	คือ	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบหลังการดูดซับ	
	$V_{oil}$	คือ	น้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการทดลอง	(กรัม)
	$W_{abs}$	คือ	น้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง	(กรัม)

## ตัวอย่างที่ 2

จากตาราง ก.1 ในชุดการทดลองดูดซับด้วยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบไม่ต้มกรดด้วยปริมาณ 0.5 กรัม เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง น้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 50.01 กรัม ปริมาณกรดไขมันอิสระก่อนการทดลองเท่ากับ 2.9409 % และปริมาณกรดไขมันอิสระหลังการทดลองเท่ากับ 2.7917 % เพราะฉะนั้นความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่สภาวะนี้เท่ากับ

$$C = \frac{(2.9409 - 2.7917) \times 50.01 \times 1000}{0.5 \times 100} = 83.7590$$

