การทำแห้งเหนือวิกฤตของคาร์บอนแอโรเจล

สุทัชชา รื่นรส
สุรชัย ช้อฉาวรพัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การทำแห้งเหนือวิกฤตของคาร์บอนแอโรเจล

สุทัชชา รื่นรส
สุรชัย ฮ้อถาวรพัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Supercritical Drying of Carbon Aerogel

Sutudcha Ruenros

Surachai Hoethawonphat

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การทำแห้งเหนือวิกฤตของคาร์บอนแอโรเจล
โดย	นางสาวสุทัชชา รื่นรส
	นายสุรชัย ฮ้อถาวรพัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
ปริญญานิพนธ์	สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

.....กรรมการ
(ดร.ธีรพร สุธีวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์เรื่อง	การทำแห้งเหนือวิกฤตของคาร์บอนแอโรเจล
โดย	นางสาวสุทัชชา รื่นรส
	นายสุรชัย ฮ้อถาวรพัฒน์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยกระบวนการโซลเจลตามด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายกับน้ำภายในรูพรุน กระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และนำคาร์บอนแอโรเจลเข้าสู่กระบวนการคาร์บอไนเซชันภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}$C ศึกษาผลของตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย ได้แก่ เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอลและความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตที่ความดัน 105, 125 และ 145 bar ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller (BET) จากการทดลองพบว่าตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายมีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักโดยอธิบายได้จากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤต 145 bar มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 54 - 56 μm และมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากที่สุดเท่ากับ 926 m^2/g เมื่อนำคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบการดูดซับฟีนอล พบว่าคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายมีปริมาณการดูดซับฟีนอลที่อุณหภูมิ 30 $^{\circ}$C ที่สมดุลสูงสุดมีค่า 91 mg phenol/g adsorbent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Supercritical Drying of Carbon Aerogel
by	Miss Sutudcha Ruenros
	Mr. Surachai Hoethawonphat
Degree	Bachelor of Chemical Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2013
Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat
Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Jintawat Chaichanawong

ABSTRACT

This research studied the preparation of carbon aerogel microspheres by the sol-gel process. This process is followed by solvent exchange supercritical carbon dioxide drying method and carbonization. Carbon aerogel was carbonized under nitrogen at atmospheric pressure and temperature of 1,000 $^{\circ}$C. The effect of solvent type such as ethanol, acetone and isopropanol in solvent exchange process and pressure in supercritical carbon dioxide drying of 105, 125 and 145 bar on the particle and porous properties was studied. Carbon aerogel microspheres were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and the Brunauer–Emmett–Teller (BET) method respectively. The result shows that solvent in solvent exchange process effect on surface area significantly was explained by dielectric constant. Carbon aerogel microsphere by using isopropanol as solvent in solvent exchange process and pressure in supercritical carbon dioxide drying of 145 bar has average diameter of 54 - 56 μm and highest BET surface area of 926 m^2/g. Carbon aerogel microspheres is observed for phenol adsorption. The result show that carbon aerogel microspheres by using isopropanol as solvent had adsorption capacity 91 mg phenol/g adsorbent at constant temperature 30 $^{\circ}$C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่คอยสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ พร้อมทั้งช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้ ทำให้งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ผู้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย ให้อุปกรณ์และสถานที่สนับสนุนงานวิจัย อีกทั้งคำแนะนำตลอดงานวิจัยทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความรู้และคำแนะนำตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับคำแนะนำการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลและคำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ พี่และเพื่อนทุกท่านที่ให้ความร่วมมือ ความช่วยเหลือ คำแนะนำและกำลังใจในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัว ผู้ให้อุปการคุณ ที่สนับสนุนและช่วยส่งเสริมให้ประสบความสำเร็จทางด้านการศึกษา สามารถนำความรู้จากการศึกษาไปใช้ประโยชน์

สุทัชชา รื่นรส

สุรชัย ฮ้อถาวรพัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VII
สารบัญรูป IX
สัญลักษณ์ XII

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตการวิจัย 3
1.4 ขั้นตอนการศึกษา 3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน 4
2.1.1 การแบ่งชนิดของรูพรุน 4
2.2 กระบวนการโซลเจล 5
2.2.1 การเตรียมเจล 6
2.2.2 การเกิดเจล 7
2.2.3 การทำแห้งเจล 7
2.3 รีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์คาร์บอนเจล 7
2.3.1 การเตรียมรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลหรืออาร์เอฟเจล 7
2.3.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย 8
2.3.3 กระบวนการทำแห้ง 9
2.3.4 การคาร์บอนไนเซชัน 9
2.4 ของไหลเหนือวิกฤต 10
2.4.1 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การดูดซับ 12
2.5.1 ประเภทของการดูดซับ 13
2.5.2 ประเภทของสารดูดซับ 13
2.5.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 14
2.5.4 หลักการเบื้องต้น 15
2.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 18
2.6.1 การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 18
2.7 ฟีนอล 19
2.7.1 สมบัติฟีนอล 19
2.7.2 ฟีนอลในธรรมชาติ 20
2.7.3 ความเป็นพิษของฟีนอล 20
2.7.4 การกำจัดฟีนอล 21
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 21

บทที่ 3 การทดลอง 24
3.1 วัสดุและสารเคมี 24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย 24
3.3 ขั้นตอนการวิจัย 25

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล 30
4.1 การศึกษาผลของตัวทำละลายต่อลักษณะ
สัณฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติของรูพรุน 30
4.2 การศึกษาผลของความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์
ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติของรูพรุน 37
4.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ 41

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 43
5.1 สรุปผลการทดลอง 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1 การศึกษาผลของตัวทำละลายต่อลักษณะสัณฐานวิทยา ของอนุภาคและสมบัติของรูพรุน 43

5.1.2 การศึกษาผลของความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตโดยใช้ คาร์บอนไดออกไซด์ต่อลักษณะสัณฐานวิทยา ของอนุภาคและสมบัติของรูพรุน 43

5.1.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของ คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ 43

5.2 ข้อเสนอแนะ 43

เอกสารอ้างอิง 44

ภาคผนวก 47

ภาคผนวก ก การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 48

ภาคผนวก ข การวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ ด้วยโปรแกรม ImageJ 51

ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์สมบัติของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ ด้วยเครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน 55

ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy 66

ภาคผนวก จ อุปกรณ์การทดลอง 75

ภาคผนวก ฉ การคำนวณค่าการละลาย (Solubility) ของตัวทำละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงข้อมูลคุณสมบัติที่จุดวิกฤตของสารชนิดต่างๆ 10

2.2 แสดงคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของไหล
ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเปรียบเทียบกับก๊าซและของเหลว 11

2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความมีขั้วกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวทำละลาย..... 18

2.4 สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล..... 20

3.1 รหัสของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่แลกเปลี่ยนตัวทำละลาย
ในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย..... 26

4.1 ผลของตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณของ
ตัวทำละลายที่สกัดได้ (%Wet Basis) ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C 32

4.2 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้
เมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายและผ่านกระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤต
ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C 35

4.3 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้
เมื่อใช้ความดันในการทำแห้งคือ 105, 125 และ145 bar ที่อุณหภูมิคงที่ 40°C 41

4.4 ประสิทธิภาพและปริมาณการดูดฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้
เมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายที่เวลาสมดุล..... 42

ค.1 การดูดซับและการคายซับของแก๊สในโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่
ใช้อะซิโตนเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar และ 40 °C 56

ค.2 การดูดซับและการคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้
เอทานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C..... 57

ค.3 การดูดซับและการคายซับของแก๊สในโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้
ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C 58

ค.4 การดูดซับและการคายซับของแก๊สในโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้
ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 125 bar 40 °C 59

ค.5 การดูดซับและการคายซับของแก๊สในโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียรที่ใช้
ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 145 bar 40 °C..... 60

ค.6 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ ที่ใช้อะซิโตน
เป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย และทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C..... 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค.7 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้เอทานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C 62

ค.8 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °c 63

ค.9 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 125 bar 40 °C..... 64

ค.10 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย และทำแห้งที่สภาวะ 145 bar 40 °C 65

ง.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้นต่างๆ 70

ง.2 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่เหลือ ที่เวลาต่างๆของการดูดซับโดยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย..... 71

ง.3 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่เหลือ ที่เวลาต่างๆของการดูดซับโดยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย 71

ง.4 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่เหลือ ที่เวลาต่างๆของการดูดซับโดยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย..... 72

ง.5 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายที่เวลาต่างๆ 73

ง.6 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายที่เวลาต่างๆ..... 73

ง.7 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายที่เวลาต่างๆ 74

ฉ.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้แทนในสมการสภาวะเปง-โรบินสัน 79

ฉ.2 ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ 80

ฉ.3 จำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆในเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 15 cm^3 80

ฉ.4 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาจำนวนโมลของตัวทำละลายในเครื่องปฏิกรณ์ที่สภาวะต่างๆ..... 81

ฉ.5 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการละลายของตัวทำละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ..... 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างรูพรุนของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน 4

2.2 กระบวนการโซลเจล (ก) โซล (ข) เจล....5

2.3 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการโซล-เจล 6

2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของรีซอร์ซินอลกับฟอร์มาลดีไฮด์....8

2.5 การเติบโตของรีซอร์ซินอลกับฟอร์มาลดีไฮด์มอนอเมอร์ 8

2.6 แผนงผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซดีเหนือวิกฤต 12

2.7 แสดงกลไกการดูดซับ.... 13

2.8 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ จำแนกตามระบบ IUPAC 14

2.9 แสดงการดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน.... 16

2.10 แสดงการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 19

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลไมโครสเฟียร์.... 26

3.2 แผนภาพกระบวนการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.... 28

4.1 ภาพรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลในตัวทำละลาย
ในการกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย 30

4.2 ภาพรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลในตัวทำละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการกระบวนการ
แลกเปลี่ยนตัวทำละลายเริ่มต้น, 3 วัน และ 7 วัน.... 31

4.3 ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้ง
เหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C.... 32

4.4 อิทธิพลของตัวทำละลายที่มีผลต่อไอโซเทอมของการดูดซับและการคายซับ
ของไนโตรเจนโดยการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์
ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C 33

4.5 อิทธิพลของตัวทำละลายที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุน
ของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยการทำแห้งเหนือวิกฤต
ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C 34

4.6 อิทธิพลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของ
คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน
105 bar และอุณหภูมิ 40 °C 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.7 อิทธิพลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อปริมาตรของรูพรุน ในช่วงไมโครพอร์และเมโซพอร์ของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C 36

4.8 อิทธิพลของความดันที่ใช้ในการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณของตัวทำละลายที่สกัดได้ (%Wet Basis) ที่อุณหภูมิคงที่ 40 °C 37

4.3 ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์เมื่อทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C และความดัน 105, 125 และ 145 bar 38

4.10 อิทธิผลของความดันในการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C ที่มีผลต่อไอโซเทอมของการดูดซับและการคายซับของไนโตรเจนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย 39

4.11 อิทธิผลของความดันในการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C ที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย 40

4.12 อิทธิผลของตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายที่ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับฟีนอลต่อกรัมตัวดูดซับคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ (q_t) ที่อุณหภูมิ 30 °C 42

ก.1 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด 49

ก.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดยี่ห้อ CAI ZEISS รุ่น EVO MA10 50

ก.3 ตัวอย่างภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ 50

ข.1 การเปิดภาพสัณฐานวิทยาด้วยโปรแกรม ImageJ 52

ข.2 ตัวอย่างภาพสัณฐานวิทยาที่เปิดด้วยโปรแกรม ImageJ 52

ข.3 การใช้เครื่องมือ Straight line คลิกลากทับเส้นขนาด 100 µm เพื่อ Set Scale 53

ข.4 การเซตค่าเพื่อ Set Scale 53

ข.5 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ 54

ข.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่วัดได้ 54

ง.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของสาร 68

ง.2 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer แบบลำแสงเดี่ยว ยี่ห้อ Milton Roy 68

ง.3 กราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

จ.1 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการฉีด 76

จ.2 เมทัลซินเตอร์ 76

จ.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะทนความดันสูง 76

จ.4 ปั๊มความดันสูง (ISCO Syringe Pump Model 260D/USA) 77

จ.5 เตาเผาแบบหลอด 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

ตัวอักษร

T_C	อุณหภูมิวิกฤต
T_r	อุณหภูมิลด
P_C	ความดันวิกฤต
P	ความดันที่สภาวะใดๆ
P_0	ความดันไออิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน ณ อุณหภูมิที่ศึกษา
R	ค่าคงที่ของแก๊ส
$\overline{V}$	ปริมาตรต่อโมล
a	ตัวแปรของสมการสภาวะเปง-โรบินสัน
b	ตัวแปรของสมการสภาวะเปง-โรบินสัน
α	ตัวแปรของสมการสภาวะเปง-โรบินสัน
ω	Acentric factor
q_t	ปริมาณตัวดูดซับโดยสารดูดซับที่เวลาใดๆ
q_e	ปริมาณตัวดูดซับโดยสารดูดซับที่สมดุล
C_0	ความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น
C_t	ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ
C_e	ความเข้มข้นที่สมดุล
V	ปริมาตร
m	น้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

น้ำเสียในภาคอุตสาหกรรมมักมีสารปนเปื้อนต่างๆ เช่น ฟีนอล ปรอท ตะกั่ว เป็นต้น หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะเป็นสาเหตุก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและมนุษย์ จึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ การใช้วัสดุที่มีรูพรุนเพื่อดูดซับสารอันตรายเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสีย [1]

วัสดุที่มีรูพรุน เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซีโอไลต์ (Zeolite) และคาร์บอนแอโรเจล (Carbon Aerogel) เป็นวัสดุที่นิยมนำไปใช้งานทั้งในอุตสาหกรรมและในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ คาร์บอนแอโรเจลเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนประเภทหนึ่งที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและปริมาตรรูพรุนสูง คาร์บอนแอโรเจลสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการแยกสารเคมีที่เป็นพิษ อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นวัสดุรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา และนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น โฟมล้างหน้าที่ผสมถ่านกัมมันต์ทรงกลม (Activated Carbon Spheres) เป็นต้น [2]

การสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลนั้น เริ่มจากปฏิกิริยาโซลเจลพอลิคอนเดนเซชัน (Sol-gel Polycondensation) ของรีซอร์ซินอล (Resorcinol) และฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) โดยมีสารละลายเบสโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [3,4] จากนั้นนำโซลเจลที่ได้เข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย (Solvent Exchange) จะใช้ตัวทำละลายเพื่อแลกเปลี่ยนกับน้ำภายในรูพรุน ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจล เพราะตัวทำละลายจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในรูพรุนซึ่งส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของคาร์บอนแอโรเจล [5] การเลือกตัวทำละลายที่นำมาแลกเปลี่ยนกับน้ำภายในรูพรุน ตัวทำละลายจะต้องมีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าน้ำ และช่วยลดแรงคาปิลลารี (Capillary Force) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนของการทำแห้งได้

กระบวนการทำแห้งเป็นการกำจัดตัวทำละลายซึ่งเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาที่อยู่ภายในรูพรุน กระบวนการทำแห้งมีหลายกระบวนการซึ่งมีหลักการและชื่อวัสดุที่ได้จากกระบวนการทำแห้งแตกต่างกัน ได้แก่ การทำแห้งแบบซับคริติคอล (Subcritical Drying) เป็นการทำแห้งภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตที่อาศัยการระเหยของตัวทำละลายจึงเกิดผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับแก๊สเนื่องจากมีการระเหยของสารละลาย ทำให้เกิดแรงคาปิลลารีเนื่องจากแรงตึงผิวของตัวทำละลาย ตัวอย่างการทำแห้งแบบซับคริติคอล เช่น การใช้ลมร้อน การใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น เรียกวัสดุที่ได้จากกระบวนการทำแห้งนี้ว่า ซีโรเจล (Xerogel) การทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Drying) เป็นการทำแห้งโดยอาศัยหลักการระเหิดโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวทำละลายจะกลายเป็นของแข็งและเมื่อลดความดันลงอย่างรวดเร็วจะทำให้ตัวทำละลายระเหิดกลายเป็นไอเรียกวัสดุที่ได้จากกระบวนการทำแห้งนี้ว่าไครโอเจล (Cryogel) และการทำแห้งแบบเหนือวิกฤต (Supercritical Drying) เป็นการทำแห้งที่ภาวะอุณหภูมิและความดันสูงกว่าอุณหภูมิและความดันวิกฤต นิยมใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวสกัดตัวทำละลายที่อยู่ในรูพรุน เรียกวัสดุที่ได้จากกระบวนการทำแห้งนี้ว่าแอโรเจล (Aerogel) โดยกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็งและกระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตสามารถหลีกเลี่ยงผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการพังทลาย (Collapse) ของโครงสร้างจากแรงคาปิลารีภายในรูแต่กระบวนการทำแห้งที่นิยมใช้คือกระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤต เนื่องจากของไหลเหนือวิกฤตมีแรงตึงผิวน้อยมากจึงทำให้ยังรักษาโครงสร้างของรูพรุนไว้ได้ อีกทั้งมีการหดตัวของโครงสร้างน้อย ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้นำเข้าสู่กระบวนคาร์บอไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}$C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเพื่อเปลี่ยนเจลให้เป็นคาร์บอนทำให้มีความเสถียรและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆได้ [6,7]

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลผ่านปฏิกิริยาโซลเจลพอลิคอนเดนเซชันโดยวิธีการทำให้เกิดอิมัลชันด้วยการฉีดผ่านวัสดุที่มีรูพรุนสูง ศึกษาผลของชนิดของตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย ศึกษาอิทธิพลของความดันในกระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตที่มีผลต่อสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้และนำคาร์บอนแอโรเจลไปทดลองการดูดซับฟีนอล เพื่อศึกษาหาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจล

1.2 วัตถุประสงค์

1) ศึกษาการเตรียมคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์
2) ศึกษาผลของชนิดของตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้
3) ศึกษาอิทธิพลของความดันในกระบวนการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้
4) ศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1) ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยวิธีการทำให้เกิดอิมัลชันด้วยการฉีดผ่านวัสดุที่มีรูพรุนสูง ผ่านกระบวนการโซลเจลพอลิคอนเดนเซชันของรีซอร์ซินอลกับฟอร์มาลดีไฮด์ โดยใช้อัตราส่วนของรีซอร์ซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ (R/F) และรีซอร์ซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต (R/C) เป็น 1:2 และ 50:1 mol:mol ตามลำดับ และอัตราส่วนของรีซอร์ซินอลต่อน้ำ (R/W) เท่ากับ 25:100 g/cm^3
2) ศึกษาผลของการเปลี่ยนตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายได้แก่ เอทานอล อะซิโตน, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ ไอโซโพรพานอล ที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้
3) ศึกษากระบวนการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตโดยใช้เวลาทำแห้ง 8 h หลังจากนั้นลดความดันครั้งละ 10 bar ทุก 10 min

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) ศึกษากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์
2) ออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลองตามขั้นตอนการทดลอง
3) เปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย
4) ทำแห้งแบบเหนือวิกฤตโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์
5) วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์สมบัติของรูพรุนด้วยวิธีบรุนเนอร์ เอมเมตต์ และเทเลอร์ (Brunauer, Emmett และ Teller method , BET method)
6) ทดลองการดูดซับฟีนอล และหาความสามารถในการดูดซับฟีนอล
7) สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1) สามารถพัฒนาวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ เพื่อให้ได้คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่มีขนาดของรูพรุน พื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและปริมาตรรูพรุนสูง สามารถประยุกต์ใช้งานตามความเหมาะสม
2) ทราบชนิดของตัวทำละลายที่เหมาะสมในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายของการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ เพื่อให้มีขนาดของรูพรุน พื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและปริมาตรรูพรุนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน (Porous Carbon) [8]

วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ได้มาจากวัสดุทางธรรมชาติและวัสดุสังเคราะห์ โดยคาร์บอนที่มีรูพรุนลักษณะทรงกลมสามารถนำไฟฟ้าได้ดีและมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง สามารถประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน เช่น เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) วัสดุรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Support) สารบรรจุขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ และใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น

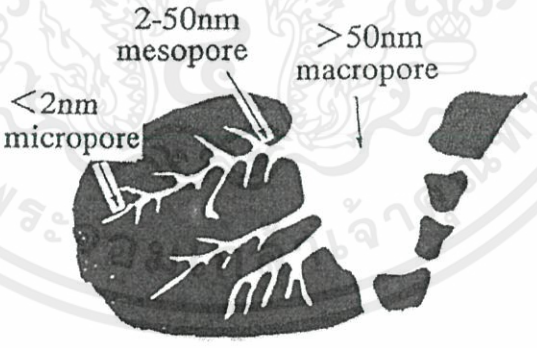
2.1.1 การแบ่งชนิดของรูพรุน

วัสดุที่มีรูพรุนจะมีขนาดของรูพรุนต่างกัน เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต่างกันออกไป ระบบ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) จำแนกลักษณะทางกายภาพของขนาดรูพรุนไว้ 3 ประเภท ดังรูปที่ 2.1 คือ

1) รูพรุนแบบมาโครพอร์ (Macropores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมากกว่า 50 nm

2) รูพรุนแบบเมโซพอร์ (Mesopores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนตั้งแต่ 2-50 nm

3) รูพรุนแบบไมโครพอร์ (Micropores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนน้อยกว่า 2 nm

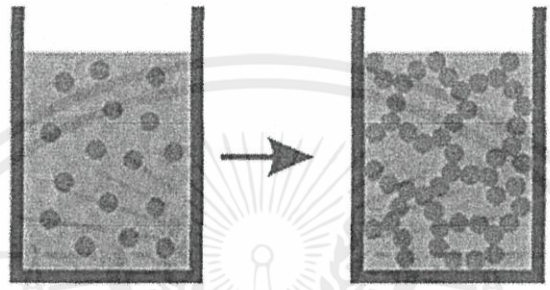


รูปที่ 2.1 โครงสร้างรูพรุนของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โซลเจลเทคโนโลยี (Sol-Gel Technology)

กระบวนการผลิตโดยวิธีโซลเจลเป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโนที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซลเจลเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่าโซล (Sol) ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 μm เป็นของแข็งที่เรียกว่าเจล (Gel) โดยการนำสารละลายต่างๆมาทำปฏิกิริยากัน สารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจลดังรูปที่ 2.2

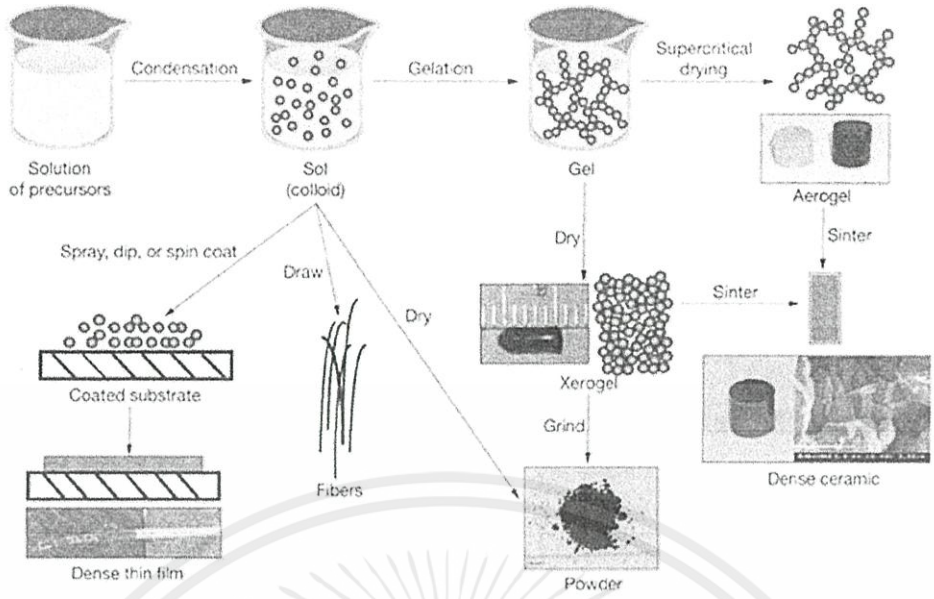


(ก) (ข)

รูปที่ 2.2 กระบวนการโซลเจล (ก) โซล (ข) เจล

เมื่อนำโซลหรือเจล หรือทั้งโซลและเจล เข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งหรือการบ่ม (Aging) จะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น สามารถขึ้นรูปด้วยการรีดให้เป็นเส้นใย (Fiber) ใช้สภาวะการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตได้เป็นแอโรเจล ทำแห้งในสภาวะบรรยากาศได้เป็นซีโรเจล สามารถทำให้เป็นอนุภาคผง และใช้ในงานเคลือบฟิล์ม (Coating Film) สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆต่อไป ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการโซล-เจล [9]

โดยกระบวนการโซลเจลประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมเจล (Preparation of Gel) การทำให้เกิดเจล (Gelation) และการทำเจลให้แห้ง (Drying of The Wet Gel) ตามลำดับ

2.2.1 การเตรียมเจล [10]

ขั้นตอนการเตรียมเจล เริ่มจากผสมสารตั้งต้น (Precursor) กับสารตัวทำละลาย โดยสมบัติและโครงสร้างของเจลขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นและตัวทำละลาย โดยสามารถแบ่งประเภทของเจลได้ดังนี้

1) เจลอนินทรีย์ (Inorganic Gel) เตรียมได้จากสารพวกเมทัลอัลคอกไซด์ (Metal Alkoxide) ที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกไซด์ของโลหะและวัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น เตตระเมทอกซีไซเลน (Tetramethoxysilane) เตตระเอทอกซีไซเลน (Tetraethoxysilane) อะลูมีเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide) โครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide) ทินออกไซด์ (Tin Oxide) เป็นต้น

2) เจลอินทรีย์ (Organic Gel) เตรียมได้จากสารพวกไฮดรอกซิเลทเบนซีน (Hydroxylated Benzenes) และอัลดีไฮด์ (Aldehydes) ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เกิดเป็นของแข็งที่ประกอบด้วยรูพรุนที่มีขนาดระดับนาโนและอนุภาคปฐมภูมิที่เชื่อมโยงกัน โดยตัวอย่างของสารประกอบของไฮดรอกซิเลทเบนซีน เช่น ฟีนอล (Phenol) เคทชอล (Catechol) รีซอร์ซินอล (Resorcinol) ฟลอโรกลูซินอล (Phloroglucinol) เป็นต้น ส่วนสารประกอบของอัลดีไฮด์ เช่น ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) เฟอร์ฟูรอล (Furfural) เป็นต้น

3) ไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นเจลที่ได้จากการผสมสารตั้งต้นกับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ไลโอเจล (Lyogel) เป็นเจลที่ได้จากการผสมสารตั้งต้นกับสารละลายอินทรีย์ เช่น อะซิโตน (Acetone) เมทานอล (Metanol) เอทานอล (Ethanol) นอมัลโพรพานอล (n-Propanol) ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) เป็นต้น

2.2.2 การเกิดเจล

เมื่อผ่านกระบวนการผสมสารตั้งต้นกับตัวทำละลายสารละลายจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน สารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล (Sol) ซึ่งเป็นอนุภาคคอลลอยด์ (Colloid) เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นเจล (Gel)

2.2.3 การทำแห้งเจล

การทำแห้งเป็นกระบวนการกำจัดน้ำที่มีอยู่ในไฮโดรเจลผลของการทำแห้งนั้นอาจทำให้โครงสร้างของรูพรุนเกิดการยุบตัวลง เนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำทำให้เกิดแรงแคปิลลารี ภายในรูพรุน จึงมีการควบคุมขั้นตอนนี้เพื่อรักษาโครงสร้างของรุพรุนปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้งเช่นวิธีการทำแห้ง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศบนผิวหน้า ขนาดของตะกอน เป็นต้น ซึ่งวิธีการทำแห้งได้แก่ การทำแห้งแบบซับคริติคอล, การทำแห้งแบบแช่แข็ง และ การทำแห้งแบบเหนือวิกฤต

2.3 รีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮคาร์บอนเจล (Resorcinol-Formaldehyde Carbon Gel)

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุคาร์บอนประกอบด้วยการเตรียมรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลหรืออาร์เอฟเจล (RF Gel) กระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย การกระบวนการทำแห้ง และการคาร์บอนไนเซชัน

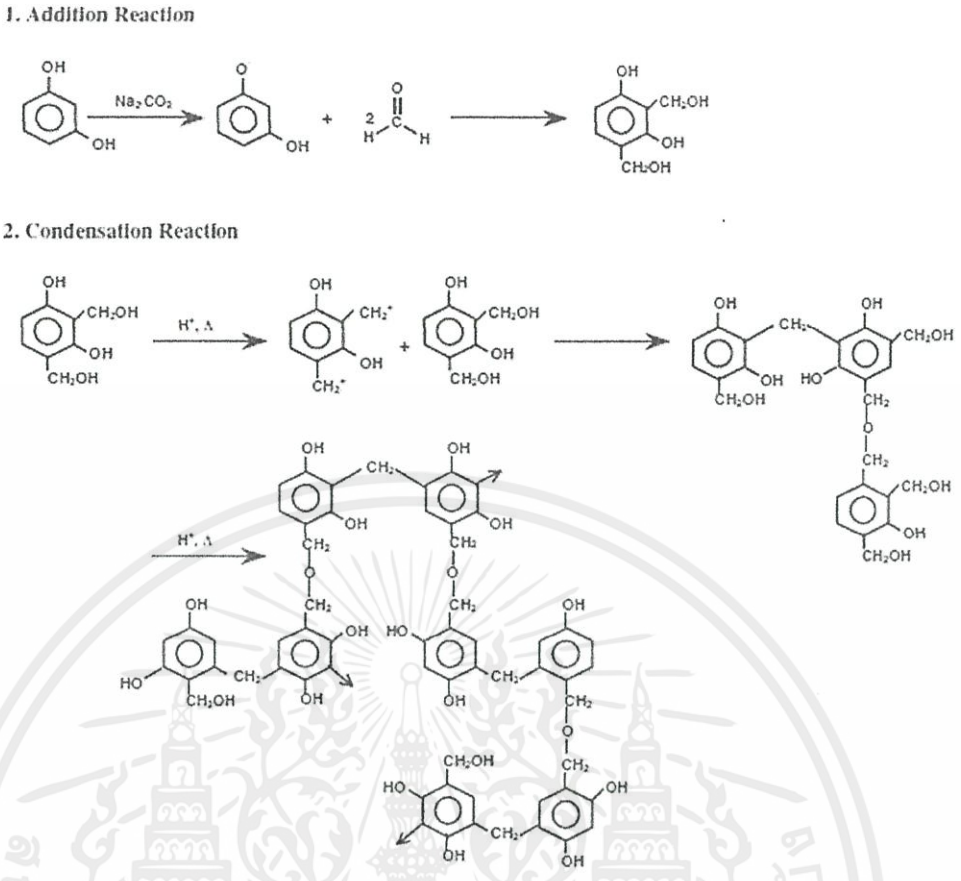
2.3.1 การเตรียมรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลหรืออาร์เอฟเจล [2]

การเตรียมรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างรีซอร์ซินอล (1,3-dihydroxybenzene, $C_6H_4(OH)_2$) กับฟอร์มาลดีไฮด์ (HCHO) ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

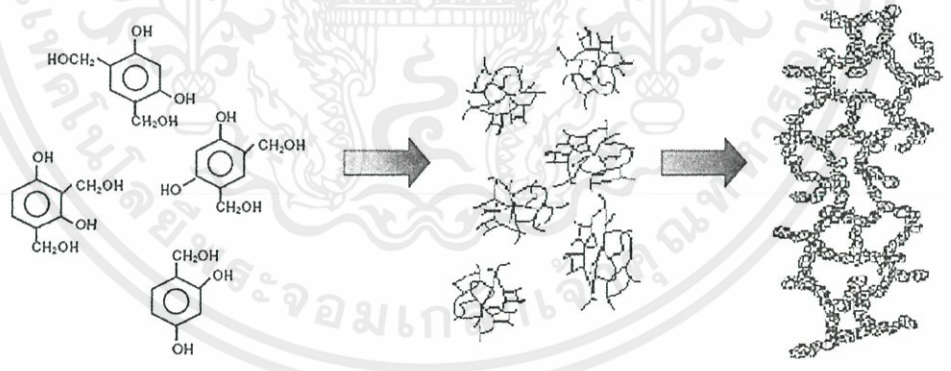
1) ปฏิกิริยาการเติม (Addition Reaction) คือปฏิกิริยาที่รีซอร์ซินอลถูกเติมด้วยโมเลกุลของฟอร์มาลดีไฮด์ เกิดเป็นรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์มอนอเมอร์ (Resorcinol-Formaldehyde Monomer)

2) ปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (Condensation Reaction) คือปฏิกิริยาการรวมตัวกันของรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์มอนอเมอร์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาการเติมด้วยพันธะของเมททิลลีนบริดจ์ (MethyleneBridges, $-CH_2-$) และเมททิลลีนอีเทอร์บริดจ์ (MethyleneEtherBridges, $-CH_2OCH_2-$) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นร่างแหของพอลิเมอร์ และกลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่เรียกว่าโซลในของเหลวจากนั้นคอลลอยด์จะรวมตัวกันกลายเป็นเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของรีซอร์ซินอลกับฟอร์มาลดีไฮด์



รูปที่ 2.5 การเติบโตของรีซอร์ซินอลกับฟอร์มาลดีไฮด์มอนอเมอร์

2.3.2 กระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจล เนื่องจากในระหว่างการทำแห้งจะมีแรงคาปิลลารีระหว่างสารละลายภายในรูพรุนกับรูพรุนของเจล ซึ่งแรงคาปิลลารีนี้ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างรูพรุน ดังนั้นเพื่อลดโอกาสเกิดความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโครงสร้างคาร์บอนเจล จึงต้องมีกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายโดยเลือกตัวทำละลายอื่นที่มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าตัวทำละลายที่อยู่ภายในรูพรุนของเจล

2.3.3 กระบวนการทำแห้ง

เมื่อเกิดเจลที่สมบูรณ์แล้วต้องกำจัดตัวทำละลายที่อยู่ภายในรูพรุนของเจล โดยการทำแห้ง ซึ่งวิธีการทำแห้งที่นิยมใช้ได้แก่ การทำแห้งแบบซับคริติคอล การทำแห้งแบบแช่แข็ง และการทำแห้งแบบเหนือวิกฤต แต่ละกระบวนการมีหลักการดังนี้

1) การทำแห้งแบบซับคริติคอล

การทำแห้งแบบซับคริติคอล เป็นการทำแห้งภายใต้สภาวะต่ำกว่าจุดวิกฤตที่อาศัยการระเหยของตัวทำละลาย จึงเกิดผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับแก๊สเป็นผลจากการระเหยของสารละลาย ทำให้เกิดแรงคาปิลลารีจากแรงตึงผิวของตัวทำละลาย ส่งผลทำให้เกิดการยุบตัวของโครงสร้างรูพรุน เรียกเจลที่ทำแห้งด้วยวิธีนี้ว่าซีโรเจล

2) การทำแห้งแบบแช่แข็ง

การทำแห้งแบบแช่แข็ง เป็นการใช้ความเย็นทำให้ตัวทำละลายกลายเป็นของแข็ง และเมื่อลดความดันอย่างรวดเร็วตัวทำละลายที่แข็งตัวจะระเหิดกลายเป็นไอออกจากเจล ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สามารถหลีกเลี่ยงแรงคาปิลลารีที่เกิดจากแก๊สและของเหลวได้ แต่ถ้าตัวทำละลายที่ใช้มีการขยายตัวสูงเมื่อเป็นของแข็งจะทำให้โครงสร้างของรูพรุนยุบตัว และเกิดช่องว่างซึ่งเป็นผลจากการเกิดผลึกภายในโครงสร้างของเจลซึ่งอาจทำให้โครงสร้างระดับนาโนของพอลิเมอร์เสียไป จึงต้องมีการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายก่อนการทำแห้ง ตัวทำละลายที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เทอร์เทียรีบิวทานอล (t-Butanol) เพราะเมื่อเกิดการแข็งตัวจะขยายตัวได้น้อย และมีความดันไอสูงกว่าน้ำช่วยลดเวลาในการทำแห้ง เรียกเจลที่ทำแห้งด้วยวิธีนี้ว่าไครโอเจล

3) การทำแห้งแบบเหนือวิกฤต

การทำแห้งแบบเหนือวิกฤต เป็นการทำแห้งที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงกว่าอุณหภูมิและความดันวิกฤต จึงเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถหลีกเลี่ยงแรงคาปิลลารีที่เกิดจากแก๊สและของเหลวได้ นับเป็นวิธีที่เหมาะสมในการรักษาโครงสร้างรูพรุนและสมบัติของโครงสร้างก่อนการทำแห้ง ส่วนมากนิยมใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารสกัดตัวทำละลายที่สภาวะเหนือวิกฤต (T_c=31°C, P_c=7.4 MPa) เรียกเจลที่ทำแห้งด้วยวิธีนี้ว่าแอโรเจล

2.3.4 การคาร์บอไนเซชัน

การคาร์บอไนเซชัน คือกระบวนการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อนในภาวะอับอากาศ เป็นขั้นตอนกำจัดธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอน ได้แก่ กลุ่มของออกไซด์ (Oxide Group) และกลุ่มของไฮโดรเจน (Hydrogen Group) ที่อุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนเจลให้เป็นคาร์บอนทำให้มีความเสถียรและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆได้ เจลที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันจะถูกเรียกว่าคาร์บอนเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการคาร์บอไนเซชันทำในเตาเผา (Tube Furnace) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน อาร์กอน หรือฮีเลียม ใช้ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 600-2100 °C

2.4 ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical Fluids, SCF)

ของไหลที่สภาวะเหนือวิกฤต หมายถึงสารใดๆที่มีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) และความดันมากกว่าความดันวิกฤต (P_c) สารจะอยู่ในสภาวะที่ไม่สามารถจำแนกได้ว่าอยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลว ถ้าเพิ่มอุณหภูมิหรือความดันให้สูงกว่าจุดวิกฤตนี้ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของของไหลซึ่งตัวอย่างของอุณหภูมิและความดันวิกฤตของสารต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลคุณสมบัติที่จุดวิกฤตของสารชนิดต่างๆ [11]

สาร	อุณหภูมิวิกฤต (K)	ความดันวิกฤต (MPa)	ความหนาแน่นวิกฤต (g/cm^3)
คาร์บอนไดออกไซด์	304.2	7.38	0.468
อะซิโตน	508.1	4.70	0.278
เมทานอล	512.6	8.09	0.272
น้ำ	647.3	22.00	0.322

ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ (Physiochemical Properties) อยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลวดังแสดงในตารางที่ 2.1 ความหนาแน่นของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับของเหลวเมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลายโมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กัน ลดพลังงานเอนทาลปี (Enthalpy) เกิดการละลายได้ดีและขณะเดียวกันของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตก็มีความหนืด (Viscosity) ใกล้เคียงกับแก๊สและการแพร่กระจาย (Diffusivity) ดีกว่าของเหลวทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของตัวถูกละลาย (Solute Matrix) ได้ดีด้วย คุณสมบัติเหล่านี้จึงนำของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลายซึ่งมีข้อดีกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวคือมีอัตราการถ่ายเทมวล (Mass Transfer) เร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลาย (Solvating Power) ที่ดีกว่า เช่นมีการทดลองเปรียบเทียบการสกัดระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหลว (Liquid Carbon Dioxide) และคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide, $scCO_2$) พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตให้อัตราการสกัดที่ดีกว่าอย่างน้อย 2-5 เท่า จึงมีบางครั้งที่เรียกของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตว่า Super Solvent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอุตสาหกรรมบางชนิดคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีเป็นที่ต้องการ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์เป็นตัวทำละลายที่ดีของมอนอเมอร์ (Monomer) แต่ไม่เป็นตัวทำละลายของที่ดีพอลิเมอร์ (Polymer) และคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถหาได้ง่ายและสามารถแยกออกจากกระบวนการได้ง่าย [12]

2.4.1 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [12]

จากสภาวะของไหลเหนือวิกฤตที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น ของไหลเหนือวิกฤตที่ได้รับความนิยม คือ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีอุณหภูมิวิกฤตที่ 31 °C และมีความดันวิกฤตที่ 7.2 MPa ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีการนำไปประยุกต์ใช้งานหลากหลายด้านเช่น การสกัดคาเฟอีนออกจากชาและกาแฟ หรือการใช้ในกระบวนการโครมาโตกราฟี (Chromatography) จะเป็นการแยกสารประกอบที่มีขั้ว โครงสร้างของของไหลเหนือวิกฤตจะคล้ายกับสารในสถานะของเหลวแต่ก็จะมีความหนาแน่นต่ำและมีความไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลคล้ายกับสารในสถานะแก๊สดังตารางที่ 2.2

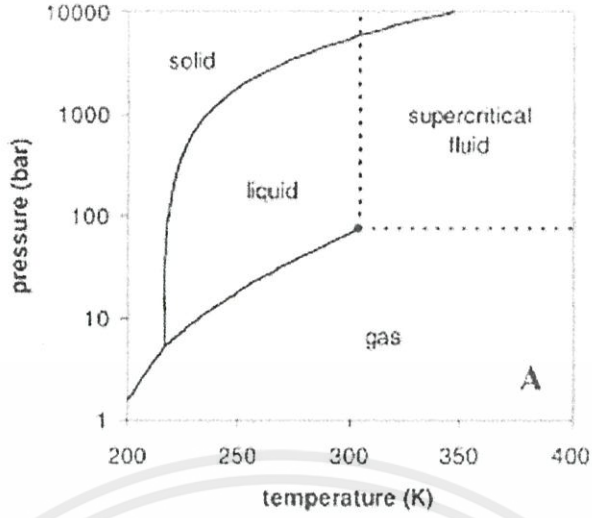
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊สและของเหลว

สมบัติ	แก๊ส	ของไหลเหนือวิกฤต	ของเหลว
ความหนาแน่น (kg/m^3)	1	100-800	1000
ความหนืด (μPa.s)	0.001	0.005-0.01	0.05-0.1
การแพร่ (mm^2/s)	$1x10^{-5}$	$1x10^{-7}$	$1x10^{-9}$

จากตารางที่ 2.2 สมบัติของของไหลเหนือวิกฤติจะมีสมบัติที่อยู่ระหว่างสถานะแก๊สและของเหลวและยังเป็นตัวทำละลายแบบไฮบริดจ์ (Hybrid Solvent) นั่นคือจะมีสมบัติคล้ายสถานะของเหลวและแก๊ส โดยจะไม่มีเส้นแบ่งระหว่างเฟส สมบัติที่สำคัญอีกประการของของไหลเหนือวิกฤต คือ ค่าการละลายของของไหลเหนือวิกฤตจะมีแนวโน้นเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของของไหลเหนือวิกฤตเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิคงที่ และเมื่อเพิ่มความดันของของไหลจะมีผลทำให้ความหนาแน่นของของไหลเหนือวิกฤตเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าการละลายเพิ่มขึ้น

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจึงได้รับความนิยมในด้านอุตสาหกรรมเนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีที่น่าสนใจ รวมไปถึงมีจุดวิกฤตที่ต่ำ มีความหนืดต่ำและมีการปรับสมบัติของสารได้ง่ายรวมถึงสามารถแยกออกจากกระบวนการได้ง่าย เช่น ขั้นตอนในการกำจัดตัวทำละลายจะมีการลดความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเปลี่ยนสถานะมาเป็นแก๊สหรือกลายเป็นไอ ดังแผนวัฏภาค (Phase Diagram) รูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็น ... นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต [12]

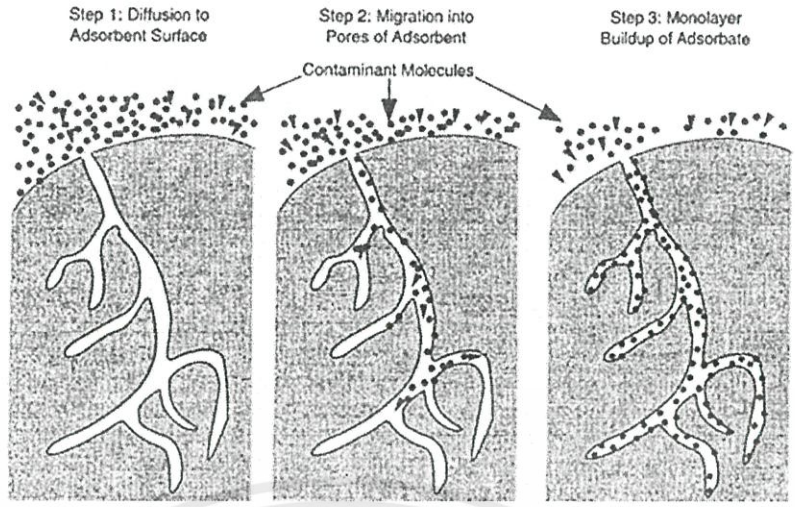
2.5 การดูดซับ (Adsorption) [13]

การดูดซับ เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนดเล็กนี้เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Absorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกติดเรียกว่าตัวดูดซับ (Absorbent) ในการดูดซับผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยจะเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งโมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยที่เกาะบริเวณผิวภายนอกโดยการเกาะติดของโมเลกุลบนผิวของสารดูดซับสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ความสามารถในการดูดซับ (Adsorbability) เนื่องจากตัวดูดซับจะมีลักษณะเป็นรูพรุน (Capillary Tube) จึงเกิดสภาวะที่ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะติดอยู่ได้

2) ประจุบนพื้นผิวของสารดูดซับ (Surface Charge) ทำให้สามารถดูดซับกับวัตถุอื่นๆที่มีประจุตรงข้าม ทำให้เกิดการเกาะติดกันได้ ซึ่งสภาพดังกล่าวนี้คล้ายปรากฏการณ์ของการแลกเปลี่ยนไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการดูดซับ

2.5.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดอ่อนๆและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น ที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลล์ (Van Der Waals) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 kJ/mol และสามารถผันกลับได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถกำจัดตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ง่าย

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เป็นการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับพันธะเคมี คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงตัวเป็นสารประกอบใหม่ โดยมีพันธะเคมีเกิดขึ้นซึ่งมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้การดูดซับความร้อนมีค่าสูงประมาณ 50-400 kJ/mol ทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับเป็นไปได้ยาก

2.5.2 ประเภทของสารดูดซับ

1) สารประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียว ออกไซด์ของโลหะต่างๆ ซึ่งเป็นสารประกอบธรรมชาติ มีพื้นที่ผิวประมาณ 50 ถึง 200 m^2/g แต่สารประเภทนี้มีข้อเสียคือ สามารถดูดจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้ไม่กี่ชนิด

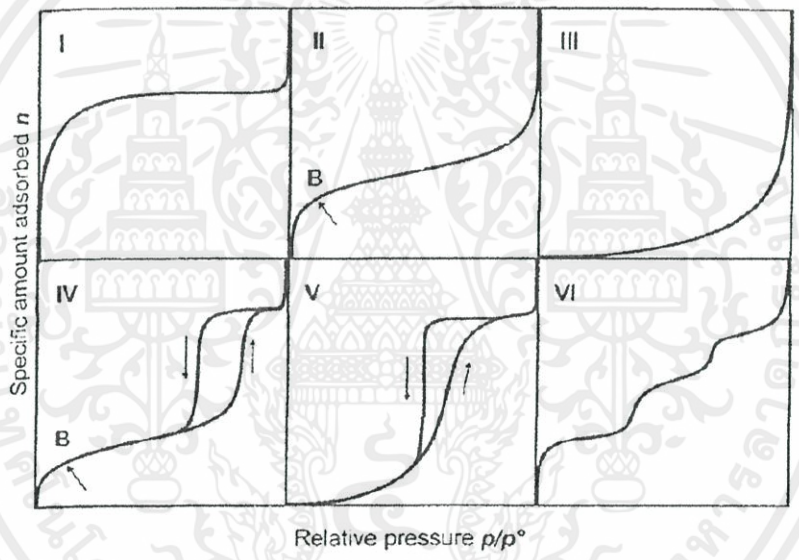
2) ถ่านกัมมันต์ เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นโดยผ่านกระบวนการทางเคมีหรือกายภาพ เพื่อให้เกิดรูพรุนในโครงสร้าง มีพื้นที่ผิวประมาณ 600 ถึง 1000 m^2/g ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สารประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น ไอออนเอ็กซ์เชนเจอร์เรซิน (Ion Exchanger Resin) มีพื้นที่ผิวประมาณ 300 ถึง 5000 m^2/g เป็นสารที่สามารถนำกลับมาใช้ได้ง่าย

2.5.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

โดยทั่วไปการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ มักจะควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับคงที่ เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังนั้นในการดูดซับจะต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า ไอโซเทอร์ม การจำแนกไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC สามารถจำแนกได้ 6 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดย 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) เป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน ได้แก่ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E. Teller



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ จำแนกตามระบบ IUPAC [17]

ชนิดที่ 1 (Type I) เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากหรือไม่มีความพรุน เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่ารวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบนี้จะมีเส้นกราฟของการดูดซับและการคายซับซ้อนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดที่ 2 (Type II) ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-Shaped Isotherm) มักเกิดกับวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macro-Porous) หรือไม่มีความพรุน ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Infection Point or Knee of Isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น การดูดซับแบบนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer Adsorption) ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบนี้จะมีเส้นกราฟของการดูดซับและการคายซับซ้อนกัน

ชนิดที่ 3 (Type III) เป็นไอโซเทอร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเว้า ไอโซเทอร์มแบบนี้พบไม่มากนัก จะเกิดกับตัวดูดซับที่ไม่แข็งแรง เป็นการเกิดขึ้นกับของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่และของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous Solid) เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับไม่แข็งแรง ทำให้ดูดซับได้น้อย เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์สูง

ชนิดที่ 4 (Type IV) เป็นไอโซเทอร์มที่พบมากในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 nm) ในช่วงแรกมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำเส้นไอโซเทอร์มจะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 จากนั้นการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นเนื่องจากเกิดการควบแน่นคาปิลลารี (Capillary Condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิดฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ในช่วงการคายซับ (Desorption) เส้นกราฟของการดูดซับและการคายซับไม่ทับกันเพราะการคายซับเกิดได้ยากกว่าเพราะต้องเอาชนะแรงคาปิลลารี ข้อมูลของการเกิดการควบแน่นคาปิลลารีสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้

ชนิดที่ 5 (Type V) เหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงเกิดการควบแน่นในรูพรุน ในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า P/P_0 สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับและการดูดซับมีค่าต่ำ เกิดฮิสเทอรีซิส ไอโซเทอร์มชนิดนี้พบไม่บ่อยนัก

ชนิดที่ 6 (Type VI) เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบชั้นต่อชั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอร์มจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิในการดูดซับ

2.5.4 หลักการเบื้องต้น [14]

Brunauer Emmett และTeller ได้ศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุพบว่าแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อนจากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้นดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ (W) กับความดันสัมพัทธ์ (P/P_o) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเป็นสมการที่เรียกว่า “สมการของ BET” ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{W[(\frac{P_0}{P})-1]} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C-1}{W_m C}(\frac{P}{P_0}) \quad (2.1)$$

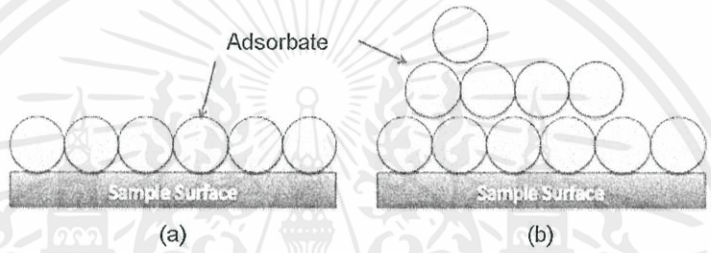
โดย W คือ ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P_0

W_m คือ ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว

P คือ ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ใช้ในขณะทำการทดลอง (mmHg)

P_0 คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (mmHg)

C คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ



รูปที่ 2.9 แสดงการดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน

จากความสัมพันธ์สมการ BET เมื่อพล็อฟกราฟระหว่าง $1/W[(P/P_0)-1]$ กับ P/P_0จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน (Slope, s) ดังสมการ

$$s = \frac{C-1}{W_m C} \quad (2.2)$$

และจุดตัดแกน y ดังสมการ

$$i = \frac{1}{W_m C} \quad (2.3)$$

ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (W_m) คำนวณโดยนำค่า s และ i มาแทนค่าในสมการ

$$W_m = \frac{1}{s+i} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุคำนวณโดยนำ W_m แทนค่าในสมหการ

$$S_t = \frac{W_m N A_{cs}}{M} \tag{2.5}$$

โดย S_t คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)

N คือ เลขอโวกาโดร (6.023×10^{23} molecule/mol)

M คือ น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (28 g/mol)

A_{cs} คือ พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (16.2×10^{-23} m^2)

ค่า S_t ที่ได้เมื่อหารด้วยปริมาณของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (W) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ หน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม

$$S = \frac{S_t}{W} \tag{2.6}$$

ปริมาตรรูพรุนรวม (V_p) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ($\overline{r_p}$) ของวัสดุ คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$V_p = \frac{W_s}{\rho} \tag{2.7}$$

$$\overline{r_p} = \frac{2V_p}{S_t} \tag{2.8}$$

โดย W_s คือ ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพันธ์ $(P/P_0) \approx 1$

ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊สไนโตเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพันธ์ $(P/P_0) \approx 1$

S_t คือ พื้นที่ผิวของวัสดุที่ทดสอบได้

ในการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน ต้องใช้เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่าง (Sample Cell) จำนวน 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่วัสดุตัวอย่างแต่ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง ก่อนการทดสอบต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากผิววัสดุตัวอย่าง จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศ เพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลแก๊สชนิดอื่นก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อให้อยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำ จากนั้นผ่าน

เอกสารนี้เป็น... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สไนโตรเจนเข้ามาในเซลล์ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์จะถูกดูดซับบนผิววัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างลดลงจนกระทั่งคงที่ (P) ในขณะที่เซลล์ที่ไม่มีวัสดุตัวอย่างความดันแก๊สคงที่ (P_0) เครื่องบันทึกผลค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (W) โดยวัสดุตัวอย่าง จากนั้นเครื่องจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีกเช่นเดียวกับครั้งแรก และแก๊สไนโตรเจนถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกเป็นเช่นนี้จนกระทั่งความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง ($P/P_0 \approx 1$) แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนอีกแล้ว จากข้อมูลความดันสัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ เครื่องทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการ BET แสดงผลเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน

2.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) [15]

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant, ε) เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties) ของวัสดุที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุลของตัวทำละลายที่อุณหภูมิใดๆ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และความมีขั้วได้แสดงในตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าสารที่มีขั้วสูงจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ความสามารถในการละลายของของสารละลายจะขึ้นกับผลต่างของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย คือถ้าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกันสารจะสามารถละลายซึ่งกันและกันได้

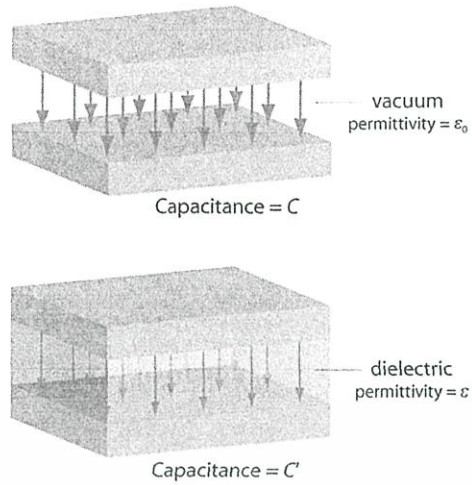
ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความมีขั้วกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลาย

ความมีขั้ว	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ε)
ไม่มีขั้ว	1-20
มีขั้วเล็กน้อย	20-50
มีขั้ว	>50

2.6.1 การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก [16]

ทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ ทำโดยนำวัสดุนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ วัสดุใดมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงจะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ของวัสดุต่อค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ (ไม่มีหน่วย) การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุแสดงในรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

2.7 ฟีนอล (Phenol)

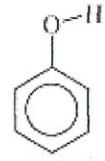
ฟีนอลหรือกรดคาร์บอลิก (Carbolic Acid) เป็นสารที่ได้มาจากน้ำมันถ่านหิน ซึ่งนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกบางชนิด สีย้อม ยาฆ่าเชื้อโรค สารกันหืน ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี จำพวกเม็ดพลาสติกที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เวชภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ขี้ผึ้ง ยาอมแก้เจ็บคอ น้ำยาบ้วนปาก รวมไปถึงกลุ่มสารเคลือบผิว (Synthetic Coating) เพื่อการเคลือบผิววัสดุให้แข็งแรง คงทน และสวยงาม เป็นต้น

2.7.1 สมบัติของฟีนอล

สารประกอบฟีนอลเป็นสารประกอบอะโรมาติกมีสูตรทางเคมี คือ C_6H_5OH ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศจะมีลักษณะเป็นรูปผลึก หรือของเหลว ไม่มีสี หากผลึกสัมผัสอากาศจะกลายเป็นสีชมพู กลิ่นมีลักษณะเฉพาะเหมือนกรดหรือเป็นกลิ่นหอมหวาน ผลึกฟีนอลบริสุทธิ์จะมีสีขาว แต่ส่วนมากจะมีสีเนื่องจากมีสิ่งเจือปน โดยสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟีนอลได้แสดงในตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล

สมบัติ	
สูตรเคมี	C_6H_5OH
สูตรโครงสร้าง	
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	94.11
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง (g/cm^3)	1.071
จุดหลอมเหลว (^oC)	40.9
จุดเดือด (^oC)	181.75
ค่าความดันไอ (mmHg)	0.36
ค่าการละลาย	9.3 g_{phenol}/100 ml_{H2O}
ค่าความเป็นกรด (pK_a)	9.89
ขีดจำกัดการติดไฟในอากาศ (%vol)	1.7 (ต่ำสุด)
	8.6 (สูงสุด)
จุดวาบไฟ (^oC)	79 (ระบบปิด)

2.7.2 ฟีนอลในธรรมชาติ

ฟีนอลไม่สามารถพบได้ตามธรรมชาติ แต่จะพบได้ในอุตสาหกรรม ส่วนมากถูกนำมาใช้เป็นสารเคมีขั้นกลาง (Intermediates Chemical) สำหรับการผลิตพลาสติกชนิด Phenolic Resins และ Epoxy Resin และใช้ในการผลิตสารเคมีและยาต่างๆ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นสารทำความสะอาดหรือสารฆ่าเชื้อ (Disinfectants) สารประกอบในกลุ่มฟีนอลตัวอื่นๆ ถูกนำมาใช้ในงานต่างๆ อีกหลายอย่าง เช่น ครีซอล (Cresol) ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อ เคทชอล (Catechol) ใช้ในงานภาพถ่าย ย้อมขนสัตว์และฟอกหนัง รีซอร์ซินอล (Resorcinol) ใช้เป็นตัวกลางในการผลิตกาว สีย้อม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับยา ไฮโดรควีโนน (Hydroquinone) ใช้ในงานภาพถ่าย ใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และเป็นสารยับยั้งกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน

2.7.3 ความเป็นพิษของฟีนอล

ฟีนอลส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ คือเมื่อสูดดมไอระเหยของฟีนอลจะทำให้เกิดอาการปวดหัว คลื่นไส้ เวียนศีรษะ และระคายเคืองทางเดินหายใจมาก แต่ถ้าสัมผัสผิวหนังจะเกิดรอยแผลไหม้จากสารเคมี มีลักษณะเป็นรอยเนื้อตาย (Necrosis) สีน้ำตาล ซึ่งมักไม่มีอาการปวด การสัมผัสฟีนอลที่มีความเข้มข้น 1 % เป็นเวลานานทำให้เกิดรอยแผลไหม้จากสารเคมีได้ แต่ถ้ามีความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงถึง 5 % จะเกิดอาการรุนแรงได้ หากเข้าตาจะเกิดอาการปวดตารุนแรง ตาสู้แสงไม่ได้ ถ้าตาสัมผัสกับฟีนอลที่มีความเข้มข้นมาก สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงต่อดวงตาได้ เกิดรอยแผลที่เยื่อบุตา (Epithelial Ulceration) ทำให้กระจกตาและเลนส์มัว (Stromal Opacity) อาจถึงกับสูญเสียการมองเห็นบางส่วนหรือตาบอดสนิทเลยก็เป็นได้ (Partial or Total Loss of Vision) หากกินเข้าไปจะเกิดการระคายเคืองเยื่อบุทางเดินอาหาร กระเพาะ ลำไส้ หรือกินในปริมาณมากสามารถทำให้ริมฝีปากเกิดแผลไหม้พุพอง กลายเป็นรอยเนื้อตายสีขาวหรือน้ำตาล ทั้งในปากและในหลอดอาหารได้ มีอาการปวดท้อง และอาเจียน

2.7.4 การกำจัดฟีนอล

การกำจัดน้ำเสียที่มีฟีนอลเป็นองค์ประกอบมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำเสีย สำหรับน้ำเสียมีความเข้มข้นของฟีนอลอยู่สูงมาก (มากกว่า 2,000 mg/l) เหมาะสมต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recovery) หรือกำจัดโดยการเผา ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของฟีนอลปานกลางถึงต่ำ อาจใช้วิธีการบำบัดทางชีววิทยา การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ หรือการออกซิเดชันทางเคมี ซึ่งกระบวนการดูดซับ (Adsorptive Processes) ส่วนมากใช้ตัวดูดซับคือถ่านกัมมันต์ ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับที่ใช้ เช่น โครงสร้างรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน วัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้น และกระบวนการสังเคราะห์ เป็นต้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T. Horikawa และคณะ [17] ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคอาร์เอฟแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยกระบวนการอิมัลชันพอลิคอนเดนเซชันจากรีซอร์ซินอลและฟอร์มาลดีไฮด์ในสารละลายเบสอ่อน จากนั้นทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต อนุภาคคาร์บอนแอโรเจลเตรียมได้จากกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิสูงบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่ความดันบรรยากาศ งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความหนืดของสารละลายอาร์เอฟจากการเติมไซโคลเฮกเซนที่ประกอบด้วย Surface-active Agent ในขั้นตอนของการเตรียมอาร์เอฟแอโรเจล ซึ่งพบว่าความหนืดมีผลต่อขนาดของอนุภาค ซึ่งสามารถสังเคราะห์อนุภาคอาร์เอฟคาร์บอนแอโรเจลที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดระหว่าง 10-500 μm และอนุภาคอาร์เอฟคาร์บอนแอโรเจลที่มีรูปร่างทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 20 μm พื้นที่ผิว 800 m^2/g และรัศมีรูพรุนแบบเมโซพอร์ 1.78 nm

J. Chaichanawong และคณะ [18] ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ โดยวิธีการทำให้เกิดอิมัลชันด้วยการฉีดผ่านวัสดุที่มีรูพรุนสูง ผ่านกระบวนการโซลเจลพอลิคอนเดนเซชันของรีซอร์ซินอลกับฟอร์มาลดีไฮด์ในสารละลายเบสอ่อน จากนั้นนำอาร์เอฟแอโรเจลผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายโดยใช้อะซิโตน ตามด้วยการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และการทำคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่ความดันบรรยากาศ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการปั่นกวนก่อนฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายอาร์เอฟ อัตราการฉีดสารละลายอาร์เอฟ และอัตราการปั่นกวนของ Continuous Phase ต่อขนาดของอนุภาคและคุณสมบัติของรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้และหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้ดูดซับฟีนอล คาร์บอนแอโรเจลมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 20–55 μm โดยการเปลี่ยนอัตราการฉีดและอัตราการปั่นกวน พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการฉีดและอัตราการปั่นกวน พื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการปั่นกวน ในทางกลับกันพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์จะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการฉีดและอัตราการปั่นกวน อนุภาคคาร์บอนแอโรเจลมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยคือ 45 μm และมีพื้นที่ผิว ปริมาตรทั้งหมดของรูพรุน ปริมาตรของเมโซพอร์ ปริมาตรของไมโครพอร์ คือ 903 m^2/g, 0.60 cm^3/g, 0.31 cm^3/g และ 0.27 cm^3/g ตามลำดับ ค่าการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์คือ 29.3 mg Phenol/g Adsorbent

Szczureka และคณะ [19] สารอินทรีย์และคาร์บอนแอโรเจลถูกเตรียมขึ้นจากรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีการเจือจางด้วยน้ำในปริมาณต่างๆ น้ำภายในรูพรุนถูกแลกเปลี่ยนด้วยตัวทำละลาย คือ อะซิโตน หรือเอทานอล และหลังจากนั้นเจลถูกทำแห้งด้วยการวิธีการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยอะซิโตนหรือการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยเอทานอล Szczureka และคณะแสดงให้เห็นว่าธรรมชาติของตัวทำละลายที่นำไปแลกเปลี่ยนกับน้ำภายในรูพรุนมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อรูพรุนของแอโรเจล ในทางตรงกันข้ามตัวทำละลายที่นำมาใช้ในกระบวนการการทำแห้งแบบการทำแห้งเหนือวิกฤตนำไปสู่ความแตกต่างที่สำคัญในกรณีของเจลที่ถูกเจือจางในระดับต่ำ ผลที่ได้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันทั้งตัวทำละลายอะซิโตนและเอทานอล ตัวทำละลายเอทานอลทำให้มีการหดตัวและความหนาแน่นเชิงปริมาตรมากกว่าตัวละลายอะซิโตน และกระบวนการการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยเอทานอลมีการสลายตัวทางเคมีมากกว่าการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยอะซิโตน

Z.S. Hu และคณะ [20] เทคโนโลยีการทำแห้งแบบการทำแห้งเหนือวิกฤตถูกพัฒนาในการเตรียมวัสดุระดับนาโนเมตร เทคโนโลยีประกอบไปด้วยการเตรียมเจลที่ประกอบไปด้วยน้ำ การกรอง การล้าง การแทนที่ของน้ำภายในรูพรุนของเจลด้วยตัวทำละลายผสมของบิวทานอลและปิโตรเลียมอีเทอร์และกระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ถูกวัดด้วยเครื่อง TEM, XRD และ X-ray small-angle scattering ซึ่งผลของการวิเคราะห์ลักษณะอสัณฐานเจลของ Beryllium Borate ถูกวัดด้วยวิธีดังกล่าว พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุผลิตภัณฑ์มีขนาด 7 nm กระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยไอโซโพรพานอลที่ใช้ในการเตรียม Beryllium Borate แอโรเจลนั้นพบว่าผลิตภัณฑ์ไม่เป็นผลึกเนื่องจากอุณหภูมิวิกฤตของไอโซโพรพานอลมีอุณหภูมิที่สูง

Nathalie และคณะ [21] วัสดุคาร์บอนที่ปรับปรุงพื้นผิวสามารถได้จากกระบวนการทำแห้งและการไพโรไลซิสของรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล ซึ่งองค์ประกอบรูพรุนของวัสดุจากการทำแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และวัสดุจากการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับกระบวนการทำแห้งหลากหลายวิธีที่มีราคาแตกต่างกัน (การทำแห้งเหนือวิกฤต การทำแห้งแบบแช่แข็งและการทำแห้งแบบซับคริติคอล) จึงมีทดสอบเพื่อที่จะกำหนดว่ากระบวนการใดที่เหมาะสมมากที่สุดสำหรับการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน กระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤตเป็นวิธีการที่ทำให้มีปริมาตรของรูพรุนและช่วงของพื้นที่ผิวมากที่สุด แต่แรงตึงผิวและการหดตัวไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากรูพรุนที่มีขนาดเล็กหรือวัสดุมีความหนาแน่นต่ำซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดขวางปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนการทำแห้งแบบการแช่แข็งเป็นวิธีการที่ยากในการทำแห้งและวิธีการนี้ยังทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ในระหว่างการเกิดผลึกน้ำแข็งซึ่งเป็นอุปสรรคในการผลิตวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้เจลที่มีรูขนาดเล็กเป็นสิ่งที่นำไปสู่แรงตึงผิวและการหดตัว แม้จะมีหลายเทคโนโลยีที่ซับซ้อนมาแทนที่การทำแห้งแบบระเหยเป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อคาร์บอนที่ต้องการหรือมีมาตรฐานในการเลือกเพียงอย่างเดียวคือขนาดของรูพรุน ขนาดรูพรุนทั้งหมดจะสามารถเข้าถึงได้ แต่พารามิเตอร์นี้เป็นในกรณีนี้ความสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาตรของรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

1) รีซอร์ซินอล ($C_6H_4(OH)_2$ จากบริษัท Fluka)
2) ฟอร์มาลดีไฮด์ (HCHO จากบริษัท RCI Labscan)
3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3 จากบริษัท Ajax Finechem)
4) Sorbitan Monooleate ชื่อทางการค้า Span80 ($C_{24}H_{44}O_6$ จากบริษัท SIGMA)
5) ไซโคลเฮกเซน (C_6H_{12} จากบริษัท RCI Labscan)
6) อะซิโตน (CH_3COCH_3 จากบริษัท RCI Labscan)
7) เอทานอล (C_3H_2OH จากบริษัท RCI Labscan)
8) ไอโซโพรพานอล (C_3H_2COH จากบริษัท RCI Labscan)
7) น้ำกลั่น
8) ฟีนอล (C_6H_5OH)
9) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99.95%
10) แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.999%

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

1) ช้อนตักสาร
2) บีกเกอร์
3) กระบอกตวง
4) ขวดปรับปริมาตร
5) แท่งกวนแม่เหล็ก
6) เมทัลซินเตอร์ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 10 μm)
7) กระบอกฉีดยา
8) เครื่องควบคุมการให้สารละลายด้วยกระบอกฉีดยา (Microsyringe Pump ยี่ห้อ KD Scientific)
9) เครื่องปั่นกวน
10) ปั๊มความดันสูง (ISCO Syringe Pump Model 260D/USA)
11) ภาชนะทนความดันสูง (รุ่น Taiatsu Techno/Japan SUS316 ปริมาตร 15 ml)
12) อุปกรณ์ให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14) เตาเผา

15) เซรามิคโบ๊ต

16) เครื่องเขย่าชนิดควบคุมอุณหภูมิ

17) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer ยี่ห้อ HEXIOS)

18) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (ยี่ห้อ CAI ZEISS รุ่น EVO MA10)

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การเตรียมไฮโดรเจลไมโครสเฟียร์

1) กำหนดอัตราส่วนของสารตั้งต้น รีซอร์ซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ (R/F) 1:2 mol:mol รีซอร์ซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต (R/C) 50:1 mol:mol และอัตราส่วนของรีซอร์ซินอลต่อน้ำ (R/W) เท่ากับ 25:100 g/cm^3

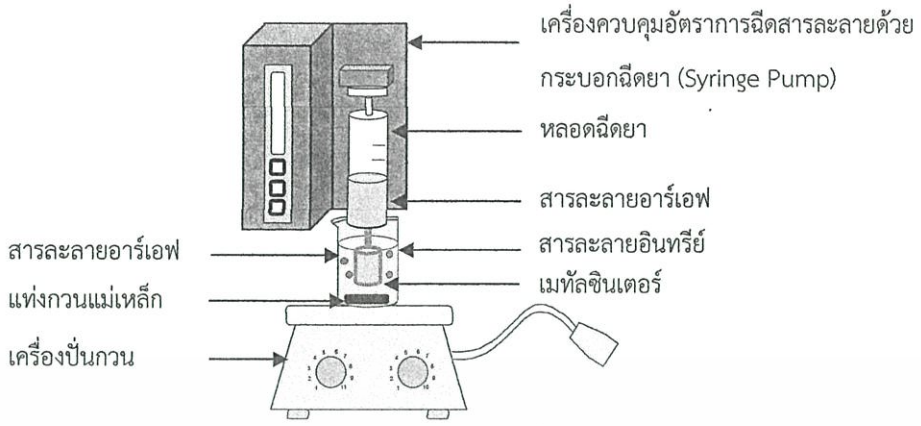
2) ทำการผสมรีซอร์ซินอลกับโซเดียมคาร์บอเนตในน้ำกลั่น และเติมฟอร์มาลดีไฮด์ ผสมให้เข้ากันตามอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นปั่นกวนสารละลายที่เตรียมได้ (สารละลายอาร์เอฟ) ที่ 25°C เป็นเวลา 1 h

3) ฉีดสารละลายอาร์เอฟผ่านเมทัลซินเตอร์ลงไปในสารละลายอินทรีย์ (ไซโคลเฮกเซนที่ประกอบด้วย Span 80 ประมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก) โดยใช้เครื่องควบคุมอัตราการฉีดสารละลายด้วยกระบอกฉีดยา ด้วยอัตราการฉีด 0.50 ml/h ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งสารละลายอินทรีย์จะถูกปั่นกวนด้วยอัตราเร็ว 180 rpm และควบคุมอุณหภูมิของสารละลายอาร์เอฟในระหว่างการฉีดไว้ที่ 25 $^{\circ}$C

4) หลังการฉีด นำอิมัลชัน (Emulsion) ที่ได้ไปปั่นกวนด้วยอัตราเร็ว 180 rpm เป็นเวลา 24 h ที่ 25 $^{\circ}$C เพื่อให้เกิดเป็นเจลอย่างสมบูรณ์

5) ปั่นกวน (Stir) เพื่อแยกเจลออกจากสารละลายอินทรีย์ จากนั้นนำเจลไปแช่ในอะซิโตนเป็นเวลา 24 h เพื่อแลกเปลี่ยนตัวทำละลายกับน้ำภายในรูพรุน ทำซ้ำขั้นตอนนี้ 3 ครั้งพร้อมทั้งเปลี่ยนอะซิโตนทุกครั้งของการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลไมโครสเฟียร์

6) จากนั้นนำอาร์เอฟเจลที่มีการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายของน้ำกับอะซิโตนภายในรูพรุนเรียบร้อยแล้ว นำมาแลกเปลี่ยนตัวทำละลายอื่นเพื่อศึกษาตัวทำละลายที่ส่งผลกับลักษณะอนุภาคสัณฐานของไฮโดรเจล โดยมีขั้นตอนดังนี้

6.1) นำอาร์เอฟเจลมีอะซิโตนอยู่ภายในรูพรุนมาแลกเปลี่ยนตัวทำละลายเอทานอลเพื่อแลกเปลี่ยนตัวทำละลายกับอะซิโตนภายในรูพรุนเป็นเวลา 24 h ทำซ้ำขั้นตอนนี้ 3 ครั้งพร้อมทั้งเปลี่ยนเอทานอลทุกครั้งของการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

6.2) นำอาร์เอฟเจลที่มีอะซิโตนอยู่ภายในรูพรุนมาแลกเปลี่ยนตัวทำละลายไอโซโพรพานอลเพื่อแลกเปลี่ยนตัวทำละลายกับอะซิโตนภายในรูพรุนเป็นเวลา 24 h ทำซ้ำขั้นตอนนี้ 3 ครั้งพร้อมทั้งเปลี่ยนไอโซโพรพานอลทุกครั้งของการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

ตารางที่ 3.1 รหัสของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่แลกเปลี่ยนตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

ตัวทำละลาย	รหัส
เอทานอล	CA-EtOH
อะซิโตน	CA-Act
ไอโซโพรพานอล	CA-IPA

3.3.2 การทำแห้งเจลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

นำอาร์เอฟเจลที่ผ่านขั้นตอนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายเรียบร้อยแล้วไปทำแห้งแบบเหนือวิกฤตโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ดังแผนผังกระบวนการทำแห้งในรูปที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทำดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

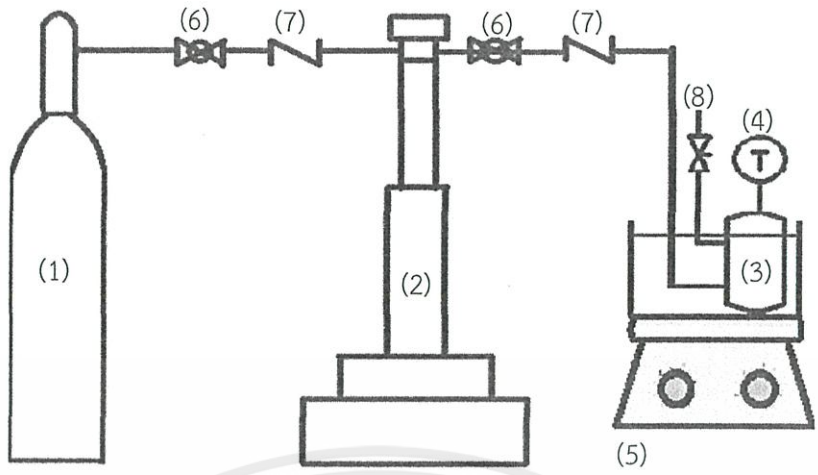
1) ชั่งน้ำหนักอาร์เอฟเจลโดยประมาณ 0.1 g พร้อมกับบันทึกน้ำหนักจำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย
2) นำอาร์เอฟเจลใส่ลงไปในภาชนะทนความดันสูง จากนั้นปั๊มคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 25 °C จนกระทั่งความดันมีค่าเกินจุดวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ (31 °C และ 74 bar) คือ 105 bar
3) ไล่อากาศโดยการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าภาชนะทนความดันสูง จากนั้นลดความดันภายในภาชนะทนความดันเพื่อไล่อากาศ ทำซ้ำ 3 ครั้ง
4) เพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ไปเป็น 40 °C ทิ้งไว้เป็นเวลา 8 h
5) ค่อยๆ ลดความดันภายในภาชนะทนความดันอย่างช้าๆ สู่ความดันบรรยากาศ จากนั้นปล่อยให้เครื่องปฏิกรณ์เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง
6) ชั่งน้ำหนักอาร์เอฟเจลหลังการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ พร้อมบันทึกน้ำหนักจำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและคำนวณหาปริมาณของตัวทำละลายที่สกัดได้ (%Wet Basis) ดังสมการที่ 3.1

$$\%WetBasis = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\% \qquad (3.1)$$

โดยที่ W_1 คือ น้ำหนักอาร์เอฟเจลก่อนทำแห้งเหนือวิกฤต
W_2 คือ น้ำหนักอาร์เอฟเจลหลังทำแห้งเหนือวิกฤต

7) ทำการทดลองซ้ำโดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิความดันการทำแห้งเป็น 125 bar และ 145 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (1) ถังแก๊ส CO_2 (2) ปั๊มความดันสูง (Syringe Pump) (3) ถังทนแรงดันสูง (High Pressure Vessel) (4) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) (5) อุปกรณ์ให้ความร้อนและปั่นกวน (Stirrer) (6) วาล์ว (Ball Valve) (7) เช็ควาล์ว (Check Valve) (8) วาล์วเข็ม (Needle Valve)

3.3.3 การเตรียมคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

นำอาร์เอฟแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เตรียมได้ไปผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันโดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทำดังนี้

1) ใส่อาร์เอฟแอโรเจลไมโครสเฟียร์ลงในเซรามิคโบ๊ต จากนั้นนำไปใส่ในเตาเผา
2) เตรียมสภาวะบรรยากาศเฉื่อยเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดนชันด้วยการปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนไหลผ่านเตาเผาด้วยอัตราการไหล 900 ml/min เป็นเวลา 10 min
3) เริ่มทำการเผาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนโดยเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาจากอุณหภูมิห้องไปเป็น 50 $^{\circ}$C โดยใช้เวลา 10 min
4) เพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาจาก 50 $^{\circ}$C ไปเป็น 250 $^{\circ}$C โดยใช้เวลา 48 min คงอุณหภูมิไว้ที่ 250 $^{\circ}$C เป็นเวลา 2 h
5) เพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาจาก 250 $^{\circ}$C ไปเป็น 1000 $^{\circ}$C โดยใช้เวลา 3 h คงอุณหภูมิไว้ที่ 1000 $^{\circ}$C เป็นเวลา 4 h
6) เมื่อครบกำหนดเวลาปล่อยให้อุณหภูมิของเตาเผาเย็นลง จะได้อาร์เอฟคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

1) วิเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยใช้ SEM วัดขนาดของอนุภาคจากภาพสัณฐานวิทยาโดยใช้โปรแกรม Image J โดยมีรายละเอียดการวัดขนาดสามารถอธิบายได้จากภาคผนวก ข

2) ปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวและการกระจายตัวของขนาดรูพรุน สามารถวิเคราะห์โดยใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ - 196°C โดยใช้เครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน โดยหาพื้นที่ผิวจำเพาะจากสมการ BET โดยอาศัยข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับของไนโตรเจนหาการกระจายตัวของขนาดรูพรุนเมโซพอร์ และปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ (V_{mes}) จากข้อมูลของไอโซเทอร์มการคายซับของไนโตรเจน แล้วคำนวณด้วยสมการของบีเจเอช (Barret-Joyner-Halenda, BJH) และหาปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ (V_{mic}) ด้วยวิธีทีพล็อตในไอโซเทอร์มการดูดซับของไนโตรเจน

3.3.5 การทดลองดูดซับฟีนอลโดยใช้คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

สำหรับการทดลองนี้ใช้คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่แลกเปลี่ยนชนิดตัวทำละลาย ทำแห้งแบบเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C ความดัน 105 bar มาทดลองดูดซับฟีนอล โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทำดังนี้

1. ชั่งคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ปริมาณ 0.02 g ใส่ลงในสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้น 100 mg/l ปริมาณ 25 ml ในขวดแก้วที่มีฝาปิด
2. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm อุณหภูมิ 30 °C โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 30 60 90 120 240 420 และ 720 min เพื่อเอาไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลือ ณ เวลาต่าง
3. กรองแยกตัวดูดซับออกจากสารละลายฟีนอลด้วยกระดาษกรอง
4. นำสารละลายฟีนอลที่ผ่านการแยกตัวดูดซับแล้ว ไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เวลาในการดูดซับต่างๆ ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ดังแสดงในภาคผนวก ง

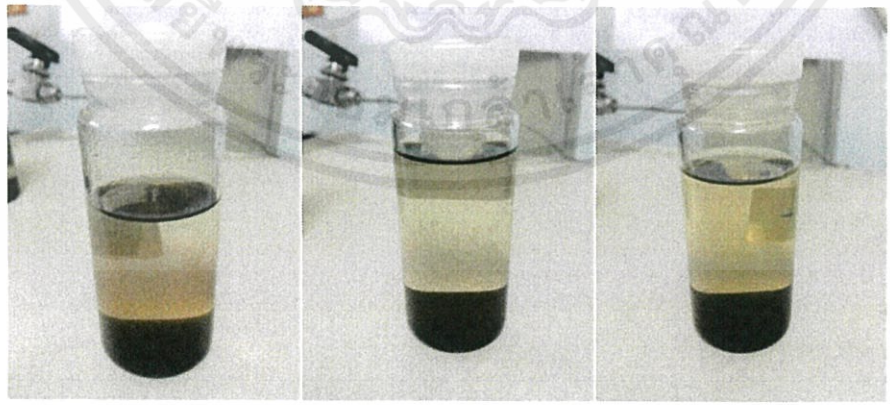
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยวิธีการทำให้เกิดอิมัลชันด้วยการฉีดผ่านวัสดุที่มีรูพรุนสูง จากนั้นผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและการทำแห้งด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤตและศึกษาผลของการเปลี่ยนตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายได้แก่ เอทานอล อะซิโตน และ ไอโซโพรพานอล ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดวัดขนาดของอนุภาคจากภาพสัณฐานวิทยาด้วยโปรแกรม ImageJ และวิเคราะห์สมบัติรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีของ Brunauer Emmett Teller (BET Method) ด้วยเครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจนและทดสอบความสามารถในการดูดซับของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยการนำไปดูดซับฟีนอล

4.1 การศึกษาผลของตัวทำละลายต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติของรูพรุน

เมื่อนำรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลที่เกิดจากปฏิกิริยาโซลเจลพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างรีซอร์ซินอลกับฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายโดยตัวทำละลายที่เลือกใช้ในการทดลองคือ เอทานอล อะซิโตน และ ไอโซโพรพานอล พบว่าการใช้ตัวทำละลายดังกล่าวรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลมีลักษณะสมบูรณ์ไม่เกิดการสลายตัวของร่างแหระหว่างการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายแสดงในรูปที่ 4.1

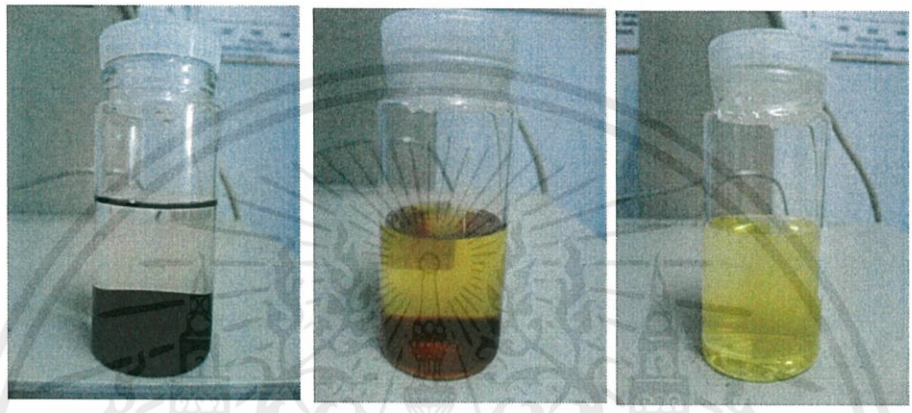


CA-EtOH CA-Act CA-IPA

รูปที่ 4.1 ภาพรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลในตัวทำละลายในการกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสังเกตได้จากตัวทำละลายที่นำไปแลกเปลี่ยนไม่ทำให้ลักษณะของเจลเกิดการเปลี่ยนแปลงคือมีลักษณะสีน้ำตาลเข้มเช่นเดิม เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน หากรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลเกิดการสลายตัวของร่างแหในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย จะสังเกตได้จากสีของตัวทำละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน หลังจากนั้นลักษณะของเจลเริ่มมีการสลายตัวของร่างแหและสลายตัวหมดเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แลกเปลี่ยนตัวทำละลาย



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.2 ภาพรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลในตัวทำละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย (ก) เริ่มต้น (ข) 3 วัน (ค) 7 วัน

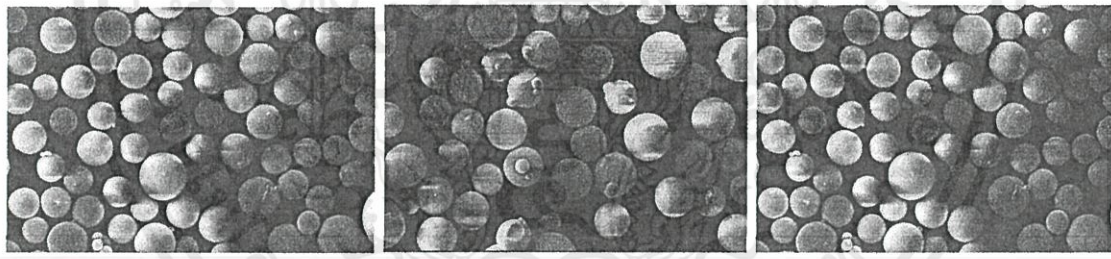
จากนั้นนำรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลเข้าสู่กระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ความดัน 105 bar อุณหภูมิ 40 °C ความสามารถในการสกัดตัวทำละลายสามารถอธิบายได้จากค่าของปริมาณของเอทานอล อะซิโตน และ ไอโซโพรพานอล ที่มีอยู่ในเจลเปียกจากกระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤต จากการทดลองพบว่าเมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายจะทำให้สามารถสกัดตัวทำละลายในโครงสร้างเจลได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองมีค่าการละลาย (Solubility) ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาพสภาวะเหนือวิกฤตมีค่าที่แตกต่างกันทำให้สามารถสกัดตัวทำละลายออกจากโครงสร้างเจลได้แตกต่างกันดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลของตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณของตัวทำละลายที่สกัดได้ (%Wet Basis) ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C

สารตัวอย่าง	ค่าการละลาย	%Wet basis
CA-EtOH	0.0011	73%
CA-Act	0.0103	80%
CA-IPA	0.0119	81%

หลังจากนั้นนำอาร์เอฟเจลไมโครสเฟียร์ที่ได้จากการทำแห้งเหนือวิกฤตเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชันได้เป็นคาร์บอนแอโรเจล และนำมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าอนุภาคคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีลักษณะเป็นทรงกลมสมบูรณ์ เกิดการแตกหักเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการกระทบกันระหว่างอนุภาคกับผนังของภาชนะ อนุภาคกับแท่งกวนแม่เหล็ก ในขั้นตอนการสังเคราะห์เจล แสดงให้เห็นจากภาพสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.3 โดยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคของเอทานอล 54 μm อะซิโตน 51 μm และไอโซโพรพานอล 57 μm

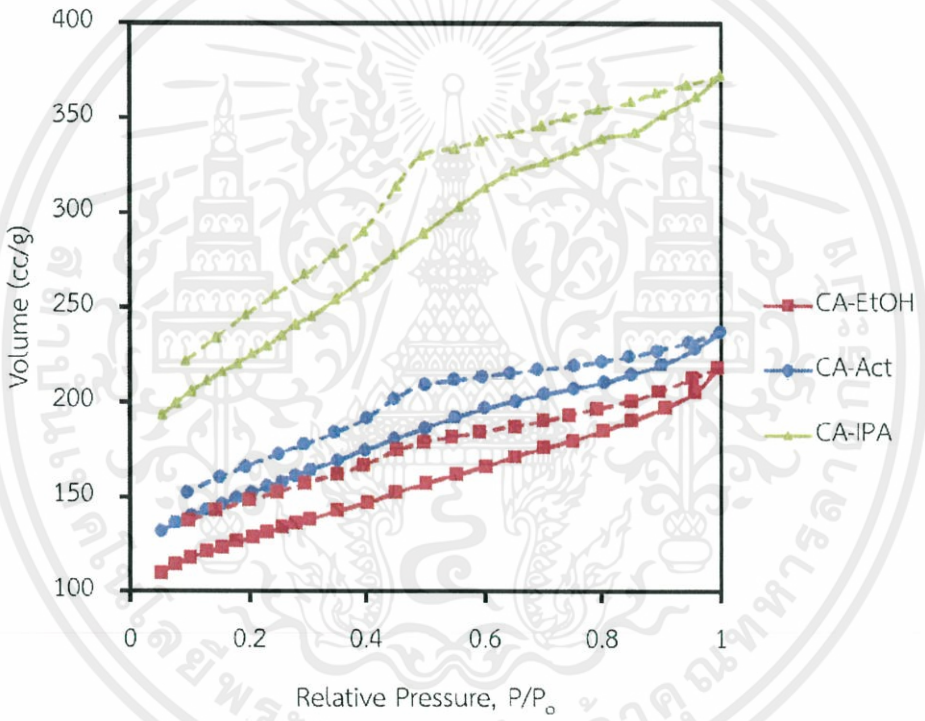


CA-EtOH CA-Act CA-IPA

รูปที่ 4.3 ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C

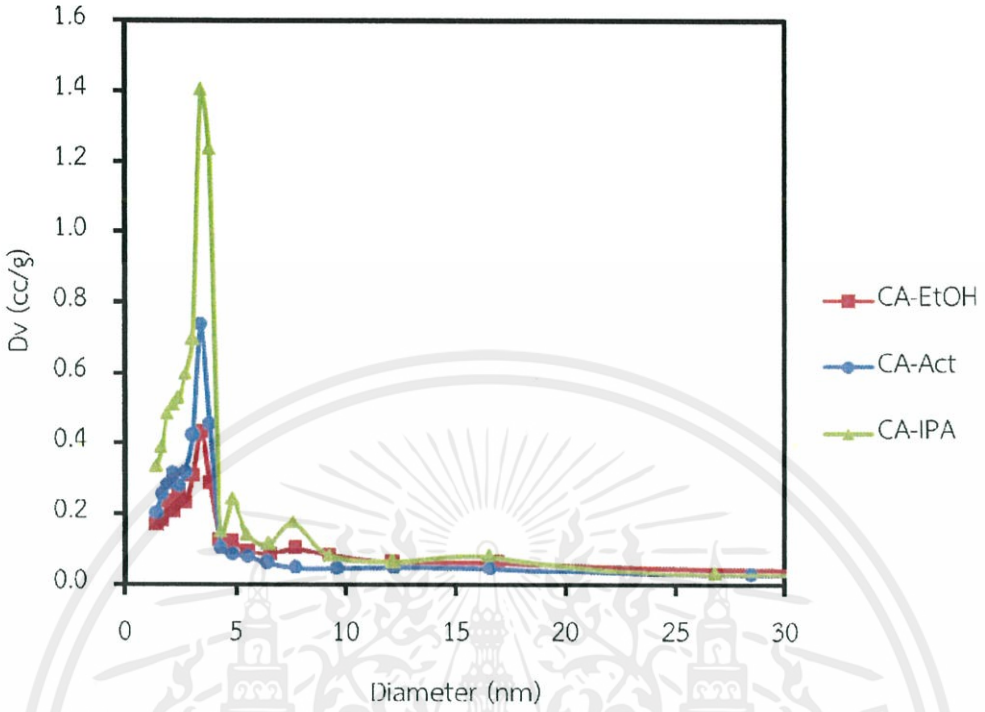
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นวิเคราะห์สมบัติของรูพรุนด้วยวิธี BET โดยพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของไนโตรเจนที่ถูกดูดซับกับความความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจนหรือไอโซเทอมของการดูดซับและการคายซับของแก๊สไนโตรเจนดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าตัวทำละลายไอโซโพรพานอลมีการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนสูงกว่าเอทานอลและอะซิโตน ซึ่งในช่วงการเกิดฮีสเทอรีซิสพบว่าตัวทำละลายไอโซโพรพานอลมีความชันของกราฟในการคายซับแก๊สไนโตรเจนสูงเนื่องจากมีปริมาณของรูพรุนในช่วงไมโครพอร์มาก เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงของไมโครพอร์และเมโซพอร์ดังรูปที่ 4.5 และคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ตัวทำละลายคือไอโซโพรพานอลมีปริมาณไนโตรเจนที่ถูกดูดซับมากที่สุด



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของตัวทำละลายที่มีผลต่อไอโซเทอมของการดูดซับและการคายซับของไนโตรเจนโดยการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของตัวทำละลายที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C

เมื่อนำผลการดูดซับไนโตรเจนมาวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนด้วยไอโซโพรพานอลและการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C มีปริมาตรไมโครพอร์ 0.30 cm^3/g ปริมาตรเมโซพอร์ 0.41 cm^3/g และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.58 cm^3/g ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก 746 m^2/g เมื่อเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายเป็นอะซิโตนและเอทานอล พบว่าปริมาตรไมโครพอร์ ปริมาตรเมโซพอร์ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด พื้นที่ผิวต่อน้ำหนักลดลง เนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายมีค่าการละลายน้อยกว่าจึงทำให้สามารถสกัดตัวทำละลายออกจากโครงสร้างเจลได้น้อยกว่าและเมื่อพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของตัวทำละลายไอโซโพรพานอลดังตารางที่ 4.2 และค่าไดอิเล็กตริกของคาร์บอนไดออกไซด์คือ 1.5 [22]

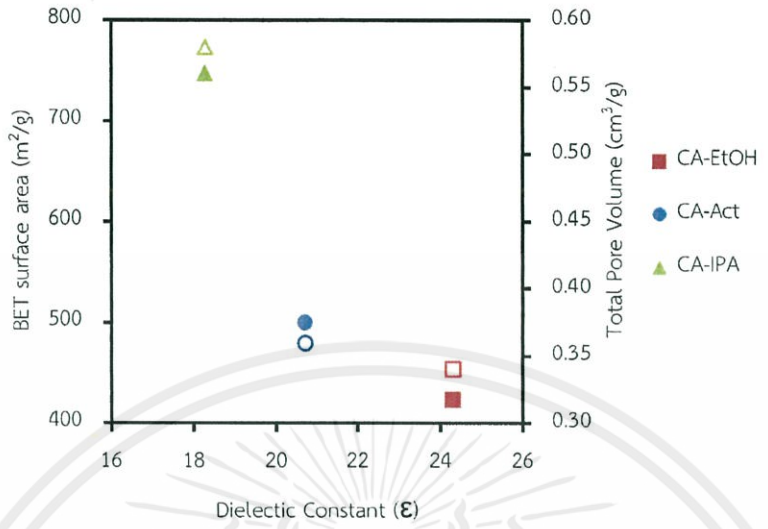
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ เมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายและผ่านกระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C [22]

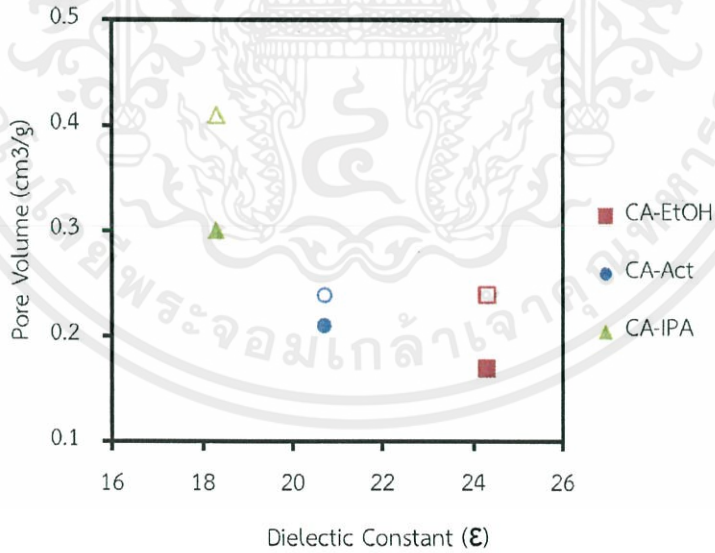
สารตัวอย่าง (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (μm)	พื้นที่ผิว BET (m^2/g)	ปริมาตรไมโครพอร์ (cm^3/g)	ปริมาตรเมโซพอร์ (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)
CA-EtOH (24.3)	54	423	0.17	0.24	0.34
CA-Act (20.7)	51	500	0.21	0.24	0.37
CA-IPA (18.3)	57	746	0.30	0.41	0.58

จากความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวทำละลายกับพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของคาร์บอนแอโรเจลของตัวทำละลาย (รูปที่ 4.6) พบว่าการใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพานอลให้พื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมากที่สุด เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของไอโซโพรพานอลที่มีค่าใกล้เคียงกับคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าคงที่ไดอิเล็ดตริกจะแสดงความเป็นขั้วของตัวทำละลาย เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกันทำให้ความเป็นขั้วมีความใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ไอโซโพรพานอลกับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายเข้ากันได้ดี ดังนั้นไอโซโพรพานอลจึงเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 อิทธิพลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C (สัญลักษณ์ทึบคือพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักและสัญลักษณ์โปร่งคือปริมาตรรูพรุนทั้งหมด)

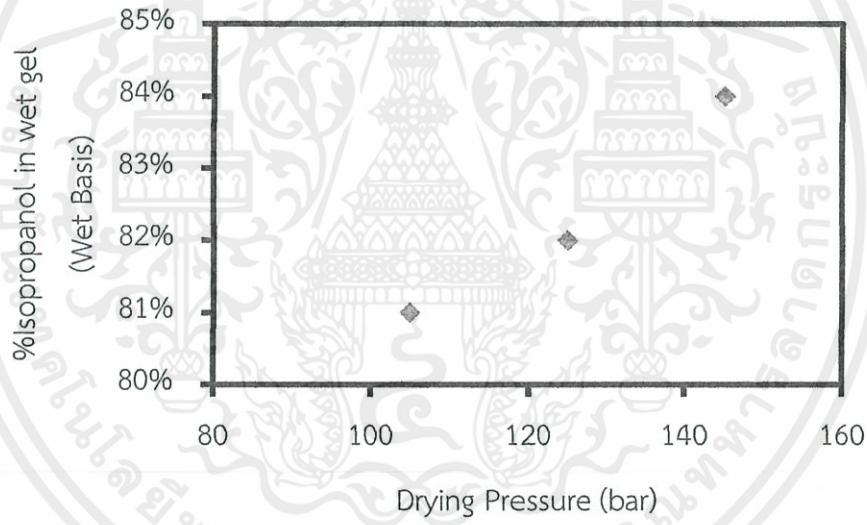


รูปที่ 4.7 อิทธิพลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อปริมาตรของรูพรุนในช่วงไมโครพอร์และเมโซพอร์ของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C (สัญลักษณ์ทึบคือไมโครพอร์และสัญลักษณ์โปร่งคือเมโซพอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลของความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ต่อสมบัติของรูพรุน

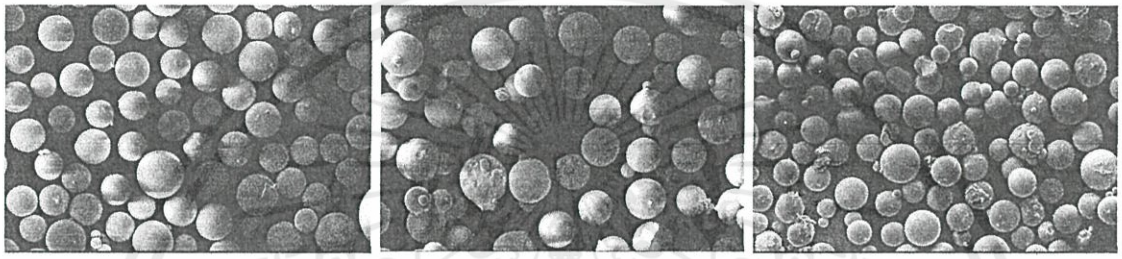
การศึกษาผลของความดันที่ใช้ในกระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ความดันในการทำแห้งคือ 105 125 และ 145 bar ที่อุณหภูมิ 40 °C ซึ่งรีซอร์ซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายโดยใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเพิ่มความดันที่ใช้ในการทำแห้ง 105 125 และ 145 bar ตามลำดับ จะสามารถสกัดไอโซโพรพานอลออกจากโครงสร้างเจลได้มากขึ้นคือ 81% 82% และ 84% (%Wet Basis) ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 เนื่องจากค่าการละลายของไอโซโพรพานอลในคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองโดยการคำนวณจากน้ำหนักเจลก่อนและหลังทำแห้งมีค่าต่ำกว่าเส้นค่าการละลายสูงสุด จึงทำให้ไอโซโพรพานอลที่อยู่ในโครงสร้างเจลละลายในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตได้หมดและค่าการละลายในวัฏภาคไอมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความดันในการทำแห้ง เนื่องจากมีการเพิ่มความดันภายในระบบเป็นการเพิ่มจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณไอโซโพรพานอลเท่าเดิม



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของความดันที่ใช้ในการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณของตัวทำละลายที่สกัดได้ (%Wet Basis) ที่อุณหภูมิคงที่ 40 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นนำอาร์เอฟเจลไมโครสเฟียร์ที่ได้จากการทำแห้งเหนือวิกฤตเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชันได้เป็นคาร์บอนแอโรเจล และนำมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าอนุภาคคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีลักษณะเป็นทรงกลมสมบูรณ์ เกิดการแตกหักเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการกระทบกันระหว่างอนุภาคกับผนังของภาชนะ อนุภาคกับแท่งกวนแม่เหล็ก ในขั้นตอนการสังเคราะห์เจล แสดงให้เห็นจากภาพสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.9 ของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายโดยใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายและผ่านกระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C และความดัน 105 125 และ 145 bar มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคของ 57, 63 และ 50 μm ตามลำดับ

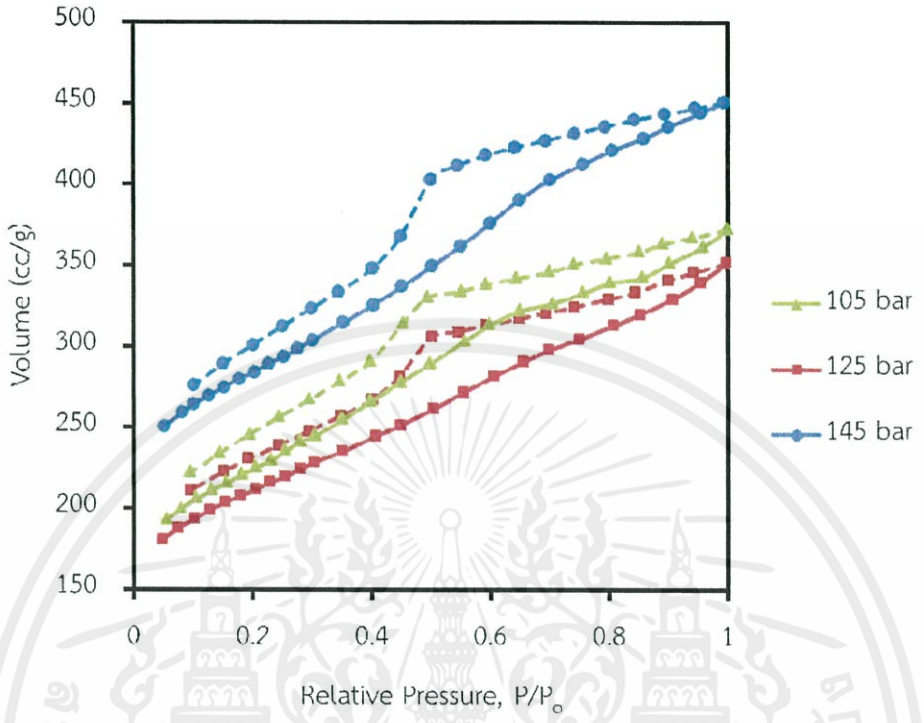


105 bar 125 bar 145 bar

รูปที่ 4.9 ภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์เมื่อใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายและทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C และความดัน 105 125 และ 145 bar

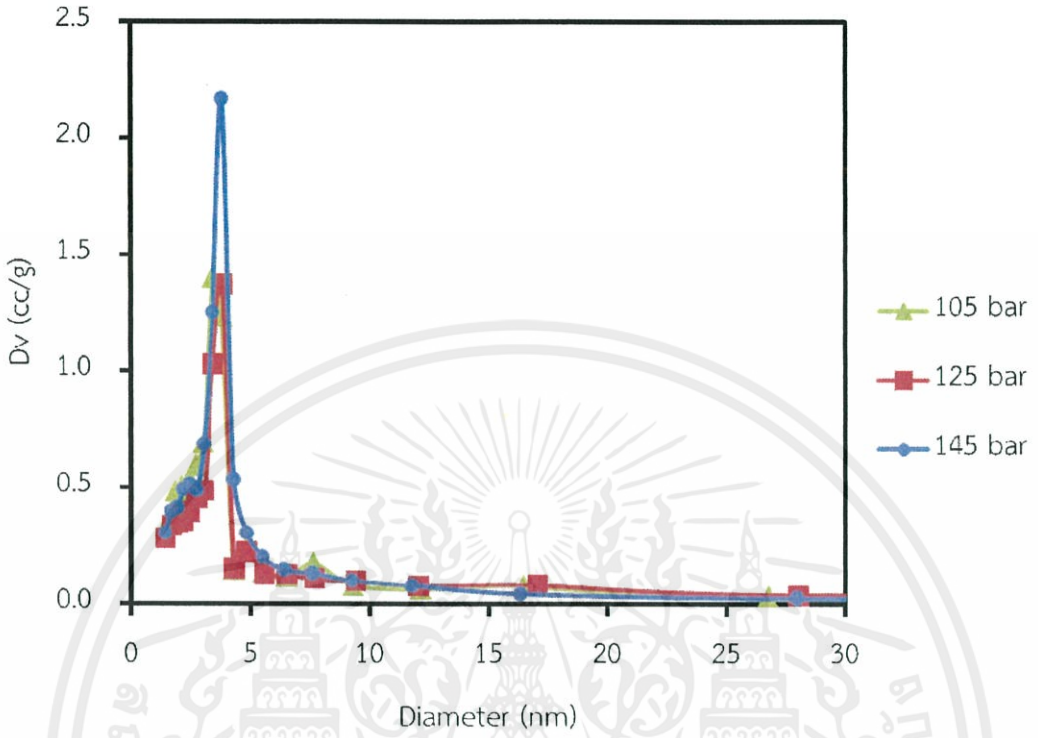
หลังจากนั้นนำอาร์เอฟเจลไมโครสเฟียร์ที่ได้จากการทำแห้งเหนือวิกฤตเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชันได้เป็นคาร์บอนแอโรเจล จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติของรูพรุนด้วยวิธี BET พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของไนโตรเจนที่ถูกดูดซับกับความสัมพันธ์ของแก๊สไนโตรเจนหรือไอโซเทอมของการดูดซับและการคายซับของแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 145 bar มีปริมาณการดูดซับไนโตรเจนสูงสุด และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์พบกว่ามีการกระจายตัวอยู่ในช่วงของไมโครพอร์และเมโซพอร์ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 อิทธิผลของความดันในการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C ที่มีผลต่อไอโซเทอมของการดูดซับและการคายซับของไนโตรเจนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 อิทธิพลของความดันในการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 °C ที่มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย

เมื่อนำผลการดูดซับไนโตรเจนมาวิเคราะห์และแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายคือ ไอโซโพรพานอล และการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 145 bar อุณหภูมิ 40 °C มีปริมาตรไมโครพอร์ 0.38 cm^3/g ปริมาตรเมโซพอร์ 0.45 cm^3/g และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.70 cm^3/g ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากที่สุดคือ 927 m^2/g ซึ่งการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มค่าการละลายระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวทำละลายไอโซโพพานอล มีผลทำให้สามารถสกัดตัวทำลายในระดับไมโครพอร์ได้มากขึ้น ส่งผลทำให้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักได้มาก ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทบสอบข้างต้น ที่เมื่อเพิ่มการละลายจะสามารถเพิ่มความสามารถในการสกัดตัวทำละลายได้มาก ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำแห้งคือความดัน 145 bar และอุณหภูมิ 40 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

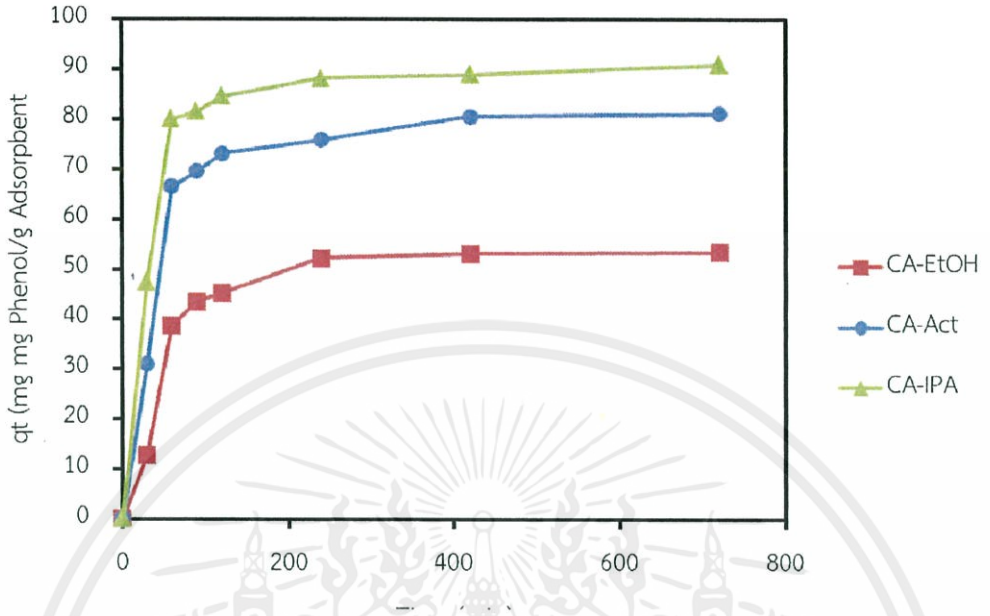
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ความดันในการทำแห้งคือ 105, 125 และ145 bar ที่อุณหภูมิคงที่ 40°C

ความดันที่ใช้ในการทำแห้ง (bar)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (μm)	พื้นที่ผิว BET (m^2/g)	ปริมาตรไมโครพอร์ (cm^3/g)	ปริมาตรเมโซพอร์ (cm^3/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)
105	57	746	0.30	0.41	0.58
125	63	697	0.28	0.38	0.54
145	50	927	0.38	0.45	0.70

4.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

จากผลการศึกษาผลของตัวทำละลายและผลของความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติของรูพรุนในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 สมบัติของรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ตัวทำละลายคือ เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอลผ่านกระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤตที่ความดัน 105 bar อุณหภูมิ 40 °C นำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยเปรียบเทียบกันระหว่างคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน โดยศึกษาการดูดซับสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/l ทำการทดลองดังหัวข้อที่ 3.3.5 โดยใช้เทคนิค UV-Vis Spectroscopy วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลือจากการดูดซับ ที่ความยาวคลื่น 270 nm และนำข้อมูลความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือที่เวลาใดๆ ไปคำนวณปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เวลาใดๆ (mg/g) จากสมการที่ ง.1 โดยมีรายละเอียดดังภาคผนวก ง และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับฟีนอลต่อกรัมตัวดูดซับคาร์บอนแอโรเจลไมโครสฟียร์ (q_t) กับระยะเวลาในการดูดซับ ดังรูปที่ 4.12 พบว่าในช่างระยะเวลาในการดูดซับ 60 min จะเกิดการดูดซับฟีนอลอย่างรวดเร็ว และปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 420 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 อิทธิผลของตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายที่ส่งผลต่อปริมาณการดูดซับฟีนอลต่อกรัมตัวดูดซับคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ (q_t) ที่อุณหภูมิ 30 °C

เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลและความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้ผลดังตารางที่ 4.4 พบว่าคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายมีประสิทธิภาพและปริมาณการดูดซับฟีนอลที่เวลาสมดุลสูงสุดคือ มีประสิทธิภาพการดูดซับ 76.19 % และสามารถดูดซับฟีนอลได้ 91 mg phenol/g absorbent

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพและปริมาณการดูดฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายที่เวลาสมดุล

สารตัวอย่าง	ประสิทธิภาพการดูดซับ(%)	ปริมาณการดูดซับ (mg phenol/g adsorbent)
CA-EtOH	44.76	53
CA-Act	67.98	81
CA-IPA	76.19	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาผลของตัวทำละลายต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติของรูพรุน

จากการศึกษาอิทธิพลชนิดของตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและผ่านกระบวนการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 105 bar และอุณหภูมิ 40 °C พบว่าอนุภาคคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะทรงกลม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วง 54 - 56 μm คาร์บอนแอโรเจลที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย มีปริมาตรไมโครพอร์ 0.30 cm^3/g ปริมาตรเมโซพอร์ 0.41 cm^3/g และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.58 cm^3/g ทำให้มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากที่สุดคือ 746 m^2/g ดังนั้นไอโซโพรพานอลจึงเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

5.1.2 การศึกษาผลของความดันในการทำแห้งแบบเหนือวิกฤตโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคและสมบัติของรูพรุน

จากการศึกษาอิทธิพลของความดันที่ใช้ในการทำแห้งเหนือวิกฤตโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้โดยทำแห้งเหนือวิกฤตที่ความดัน 145 bar มีปริมาตรไมโครพอร์ 0.38 cm^3/g ปริมาตรเมโซพอร์ 0.45 cm^3/g และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.70 cm^3/g ทำให้มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมากที่สุดคือ 926 m^2/g ดังนั้นความดัน 145 bar เป็นความดันที่เหมาะสมในการทำแห้งเหนือวิกฤตด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

5.1.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลที่อุณหภูมิ 30 °C ของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ พบว่าคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย มีปริมาณการดูดซับฟีนอลที่เวลาสมดุลมากที่สุด คือ 91 mg phenol/g adsorbent

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการศึกษาตัวทำละลายเพิ่มเติมที่มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
- ควรมีการศึกษาผลเพิ่มเติมเมื่อเพิ่มความดันในการทำแห้ง
- ควรมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Liana Alvares Rodrigues, Tiago Moreira Bastos Campos, Manoel Orlando Alvarez-Mendes, Aparecido dos reis Coutinho, Kumiko Koibuchi Sakane, and Gilmar Patroci´nio Thim. "Phenol Removal from Aqueous Solution by Carbon Xerogel" J. Sol-Gel Sci. Techn., vol.63, 2012. pp. 202-210

[2] Jun-Bing Yang, Li-Cheng Ling, Lang Liu, Fei-Yu Kang, Zheng-Hong Huang, and Hui Wu. "Preparation and Properties of Phenolic Resin-Based Activated Carbon Spheres with Controlled Pore Size Distribution" Carbon, vol.40, 2002. pp. 911-916

[3] H. TAMON, H. ISHIZAKA, T. ARAKI and M. OKAZAKI. "CONTROL OF MESOPOROUS OF ORGANIC AND CARBON AEROGELS." J. carbon, vol36, 1987. pp. 1257-1262

[4] Ryoji Takahashi, Kazuki Nakanishi, Naohiro Soga. "Effects of aging and solvent exchange on pore structure of silica gels with interconnected macrospores." Journal of Non-Crystalline Solids. 1995. pp. 66-76

[5] เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์. 2551." Mesoporous carbon gels: Now and future." วิศวสารลาดกระบัง. ฉบับที่ 25. หน้า 37-45

[6] Shaheen A. A-Muhtaseb and James A. Ritter. "Preparation and Properties of Resorcoinol-Formaldehyde Organic and Carbon Gel" Adv. Mater., vol. 15, 2003. pp. 101-114.

[7] ชนิดา เวสนุสิทธิ์. 2550. "ผลของการทำให้แห้งแบบสูญญากาศและการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายในการสังเคราะห์รีซอร์ซินนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คาร์บอนซีโรเจลโดยวิธีการโซลเจลพอลิคอนเดนเซชัน" ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[8] Satish M Manocha. "Porous carbons" Sadhana, vol.28, 2003. pp. 335-348.

[9] Karen Rath. "Novel Materials from Solgel Chemistry" Solgel Chemistry. 2007. pp. 24-26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] Michel Perrut and Eric Francais. 2555. AEROGEL DRYING. [Online].Available : http://www.separex.fr/index.php/download/category/8-applications?download=20:aerogel-drying

[11] เกศินี ศรีสุระ. 2549."การสกัดวิตามินอีจากเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตและการตกผลึกวิตามินอีโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[12] Maartjie F. Kemmere and Thierry Meyer. 2005. Supercritical Carbon Dioxide in Polymer Reaction Engineering. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

[13] Lowel,S.L and Shields, Joan E.. Powder surface area and porosity. 3 rd.ed.. London : Chapman & Hall , 1991. p. 1-40.

[14] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชาและคณะ. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. 2553. หน้า 221-228.

[15] P. KUMAR, P. CORONEL, J. SIMUNOVIC, V.D. TRUONG, AND K.P. SANDEEP. "Measurement of Dielectric Properties of Pumpable Food Materials under Static and Continuous Flow Conditions" Food Science Vol. 72, 2007

[16] Michel Perrut and Eric Francais. 2555. The dielectric constant. [Online].Available : http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/dielectric_constant.php

[17] Toshihide Horikawa, Jun'ichi Hayashi and Katsuhiko Muroyama. "Size Control and Characterization of Spherical Carbon Aerogel Particles from Resorcinol–Formaldehyde Resin" Carbon, vol. 42, 2004. pp. 169–175

[18] JintawatChaichanawong, KoranitKongcharoen and SuratAreerat "Preparation of carbon aerogel microspheres by a simple-injection emulsification method" Advanced Powder Technology, 2013.

[19] A. Szczureka, G. Amaral-Labata, V. Fierroa, A. Pizzi b, E. Massonc, A. Celzarda "Porosity of resorcinol-formaldehyde organic and carbon aerogels exchanged and dried with supercritical organic solvents" Materials Chemistry and Physics, vol. 129. 2011. pp. 1221-1232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[20] Z.S. Hu, L.G. Wang, Z.W. Ou, L. Huang, R. Lai, T. He, J.X. Dong, G.X. Chen "Preparation of aerogel beryllium borate with supercritical carbondioxide drying" Powder Technology. Vol. 114. 2001. pp. 163-167

[21] Nathalie Job,*, Alexandre The´ry c, Rene´ Pirard, Jose´ Marien , Laurent Kocon d,Jean-Noe¨lRouzaud, Franc¸oisBe´guin c, Jean-Paul Pirard "Carbon aerogels, cryogels and xerogels: Influenceof the drying method on the textural propertiesof porous carbon materials" Carbon, vol.43, 2005. pp. 2481-2494

[22] Arthur A. Maryott and Edgar R. Smith. "Table of Dielectric Constants of Pure Liquids" National Bureau of Standards Circular 514, Issued August 10, 1951.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

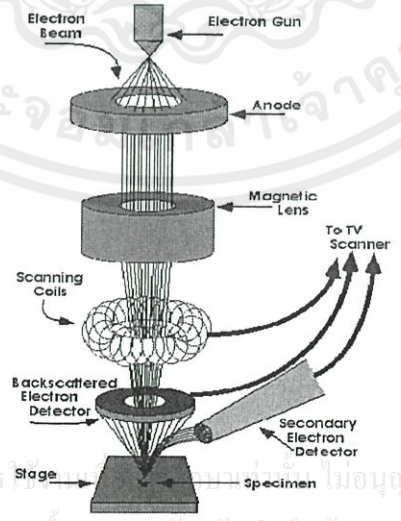
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจล ไมโครสเฟียร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 nm การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดนี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับดูผ่านด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านก็ได้ เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดจะเป็นภาพลักษณะ3 มิติ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

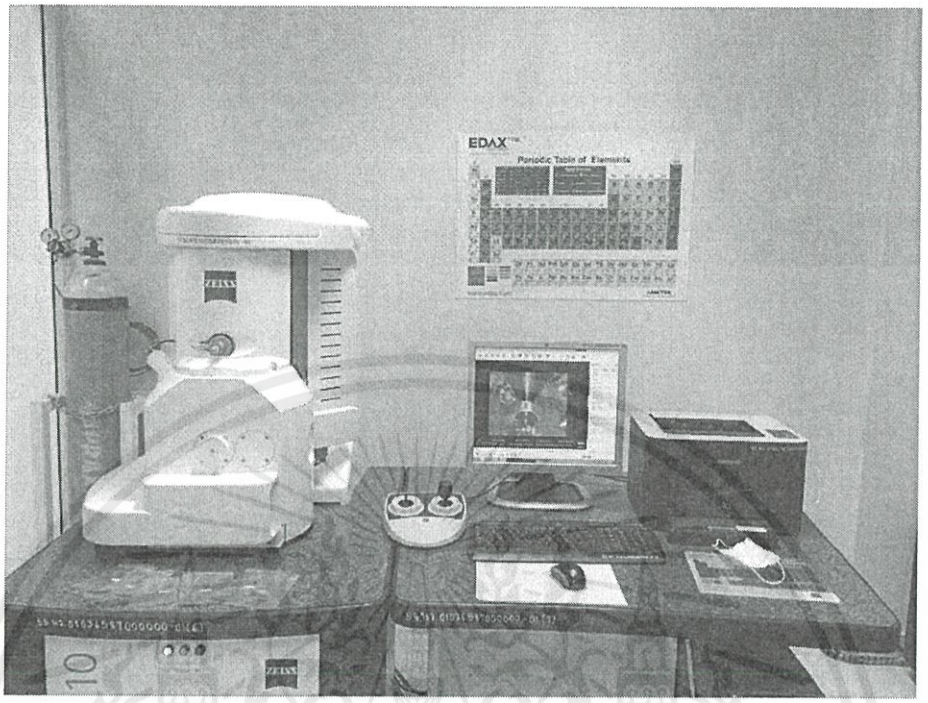
หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกวาดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



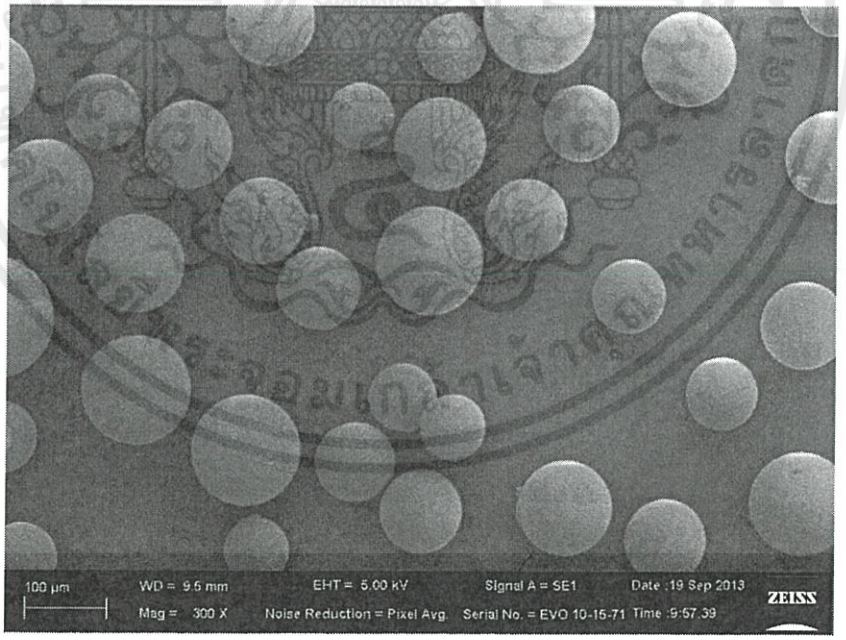
รูปที่ ก.1 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการนำคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ มาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงในรูป ก.2 และ ก.3



รูปที่ ก.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดยี่ห้อ CAI ZEISS รุ่น EVOMA10



รูปที่ ก.2 ตัวอย่างภาพสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

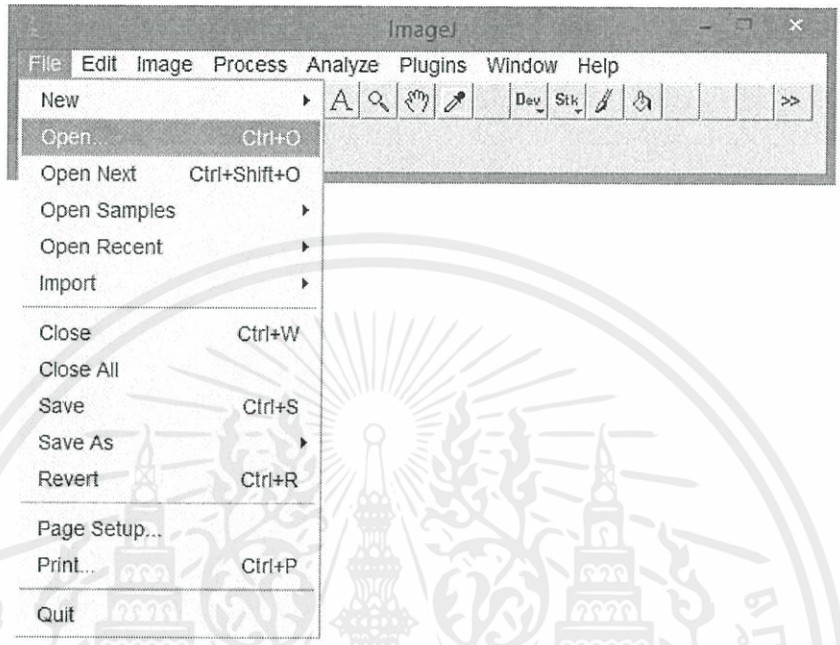
ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ด้วยโปรแกรม Image J

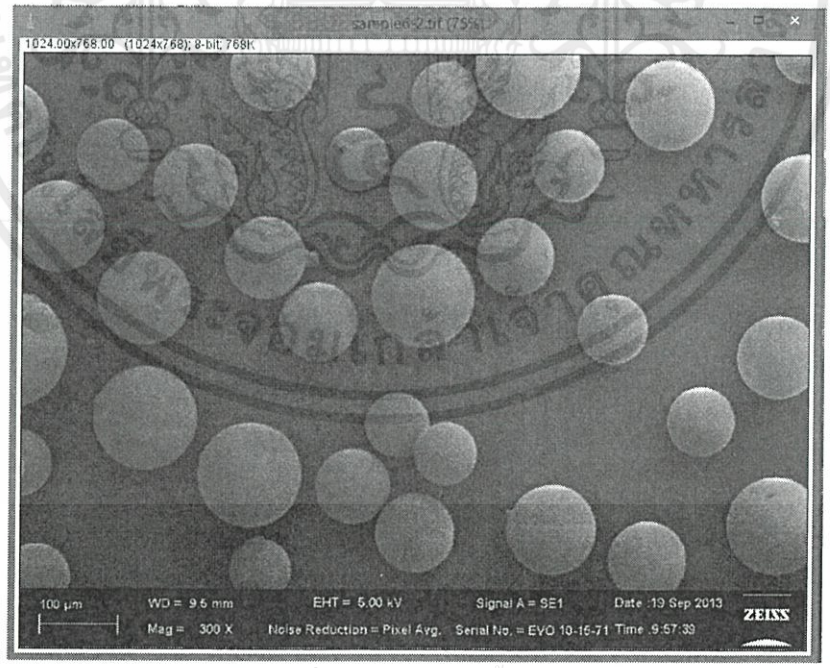
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

1. เปิดโปรแกรม ImageJจากนั้นเปิดภาพที่ต้องการวิเคราะห์โดยไปที่ File → Open ดังแสดงในรูปที่ ข.1



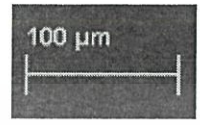
รูปที่ ข.1 การเปิดภาพสัณฐานวิทยาด้วยโปรแกรม ImageJ



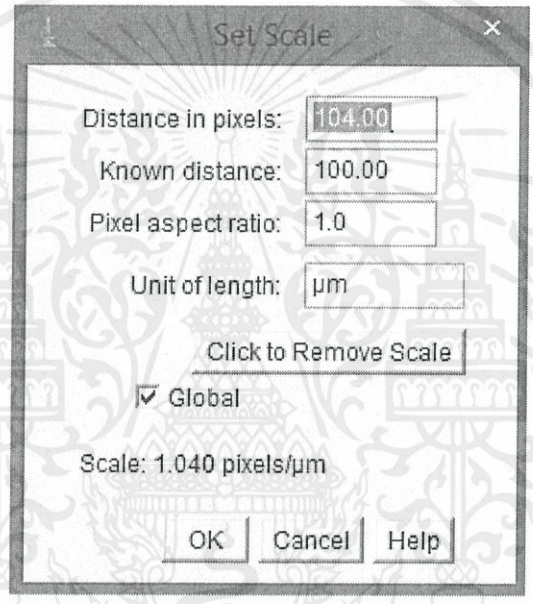
รูปที่ ข.2 ตัวอย่างภาพสัณฐานวิทยาที่เปิดด้วยโปรแกรม ImageJ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการ Set Scale เพื่อเทียบอัตราส่วนของขนาดภาพกับขนาดจริง โดยเริ่มจากใช้เครื่องมี Magnifying glassเพื่อขยายภาพ และใช้เครื่องมือ Straight line คลิกลากทับเส้นขนาด 100 μm ดังรูปที่ ข.3 จากนั้นไปที่Analyze → Set Scale ใส่ค่าKnown Distance: 100 ใส่หน่วย Unit of Length: um (ใช้um แทนμm) จากนั้นคลิกเลือก Global แล้วกด OK ดังรูปที่ ข.4



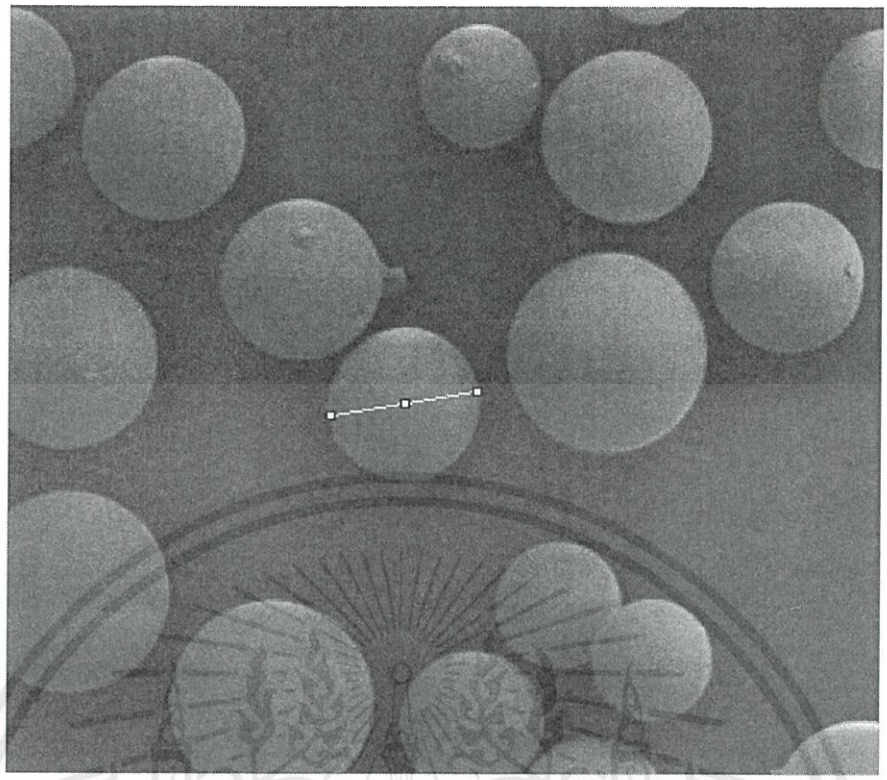
รูปที่ ข.3 การใช้เครื่องมือ Straight line คลิกลากทับเส้นขนาด 100 μm เพื่อ Set Scale



รูปที่ ข.4 การเซตค่าเพื่อ Set Scale

3. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์โดยเลือกเครื่องมือ Straight line ลากลงบนภาพให้เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ต้องการวัดขนาด ดังรูปที่ ข.5 หลังจากนั้นเลือก Analyze→ Measure ซึ่งโปรแกรมจะวัดขนาดของเส้นตรงทีได้ลากไว้และแสดงที่คอลัมน์Lengthดังรูปที่ ข.6จากรูปพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่วัดนั้นมีค่า 96.111 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์

Results

File Edit Font Results

	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	93.380	92.743	69.778	119.225	9.181	96.111

รูปที่ ข.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่วัดได้

4. ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 3 จนครบตามจำนวนอนุภาคในภาพที่ต้องการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์สมบัติของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ด้วยเครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 ข้อมูลไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับของแก๊สไนโตรเจน

ค.1.1 ข้อมูลการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้อะซิโตนเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

ตารางที่ ค.1 การดูดซับและการคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้อะซิโตนเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar และ 40 °C

ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)	ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)
0.05208	131.8588	0.99940	236.9043
0.07657	136.3221	0.94611	231.7476
0.10265	140.1553	0.89215	227.4990
0.12861	143.5531	0.84625	224.0816
0.15402	146.6196	0.80005	221.4709
0.17908	149.6593	0.75246	219.4397
0.20389	152.5652	0.69064	217.2477
0.22948	155.4409	0.64359	215.5151
0.25431	158.2744	0.59508	213.5581
0.27875	161.3707	0.54725	211.6523
0.30377	164.3605	0.49851	209.5266
0.35116	169.4166	0.44858	202.1799
0.39925	175.0665	0.39998	191.3931
0.44869	180.6457	0.34572	183.8747
0.49849	186.5881	0.29325	177.8635
0.55015	191.8903	0.24925	173.0752
0.60004	196.8134	0.1945	166.3392
0.65223	200.9345	0.15125	160.7918
0.70258	204.4317	0.09487	152.6610
0.75354	207.4129		
0.80382	210.5717		
0.85010	214.9841		
0.90141	219.8139		
0.95576	228.3241		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1.2 ข้อมูลการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้เอทานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

ตารางที่ ค.2 การดูดซับและการคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้เอทานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)	ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)
0.05137	109.7367	0.99429	217.7374
0.07611	114.2310	0.95082	212.6464
0.10230	118.0710	0.89464	205.4446
0.12964	120.8446	0.84994	200.9321
0.15468	123.3941	0.79127	196.6569
0.17887	126.3467	0.74574	193.4269
0.20509	128.7192	0.69920	190.0785
0.22972	131.3051	0.65079	187.4085
0.25457	133.8126	0.59082	184.3208
0.28046	136.1377	0.54471	181.6810
0.30498	138.3910	0.49665	179.0167
0.35179	142.6813	0.45226	174.5428
0.40213	146.8456	0.39664	166.7874
0.44980	152.2518	0.35161	162.0710
0.50086	157.0079	0.29372	157.0033
0.55164	161.7631	0.24763	152.5564
0.60200	166.3200	0.20084	148.4074
0.64988	171.3110	0.14354	142.3672
0.70151	175.8246	0.09856	137.4133
0.75174	179.9692		
0.80135	184.7808		
0.84960	190.1538		
0.90612	197.1577		
0.95605	205.3638		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1.3 ข้อมูลการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

ตารางที่ ค.3 การดูดซับและการคายซับของแก๊สในโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)	ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)
0.05384	193.2515	0.99940	372.3132
0.07783	199.8015	0.94121	367.3816
0.10292	205.9797	0.88997	363.3778
0.12942	211.0188	0.84884	358.3026
0.15438	215.9820	0.79487	354.3417
0.17990	220.5244	0.73962	350.5143
0.20476	225.3210	0.69767	345.7226
0.22983	229.7323	0.64287	341.9068
0.25414	235.3350	0.59094	338.1703
0.27825	241.1019	0.54964	333.8571
0.30530	245.0493	0.49300	330.1015
0.35037	254.7338	0.45141	313.9102
0.39778	265.9711	0.39680	290.5887
0.44730	277.9305	0.34615	278.4500
0.49755	289.0977	0.29465	267.2489
0.55696	303.3797	0.24411	256.7380
0.59866	313.0654	0.19366	245.8729
0.64922	321.8530	0.14384	234.2940
0.70376	326.5383	0.09456	221.9899
0.75555	332.9086		
0.80082	339.2252		
0.85572	342.5538		
0.90163	351.3647		
0.95802	361.4297		

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1.4 ข้อมูลการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 125 bar 40 °C

ตารางที่ ค.4 การดูดซับและการคายซับของแก๊สในโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 125 bar 40 °C

ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)	ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)
0.04751	180.5708	0.99801	351.5486
0.07369	187.9584	0.94283	345.8200
0.10084	193.8681	0.89856	340.9823
0.12685	199.0221	0.84449	333.6755
0.15228	203.8445	0.79873	329.4749
0.17867	207.8103	0.74171	324.5870
0.20328	211.9746	0.69483	320.9499
0.22806	216.1959	0.64936	317.4956
0.25402	219.8885	0.59149	313.4956
0.27817	224.2965	0.54692	309.1298
0.30266	228.5767	0.50051	305.9469
0.34967	235.2431	0.44631	282.2903
0.40589	244.6180	0.40082	267.3047
0.44803	251.7377	0.34710	257.3383
0.50361	261.5357	0.29460	247.9714
0.55475	271.9044	0.24352	239.3540
0.60623	281.8336	0.19282	230.7198
0.65435	290.4260	0.15149	223.1339
0.69787	297.7817	0.09619	211.4776
0.74916	304.6225		
0.80693	313.0944		
0.85098	319.9941		
0.90606	329.4100		
0.95436	339.7492		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1.5 ข้อมูลการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย และทำแห้งที่สภาวะ 145 bar 40 °C

ตารางที่ ค.5 การดูดซับและการคายซับของแก๊สในโตรเจนบนคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 145 bar 40 °C

ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)	ความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจน (P/P_0)	ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ([cc/g] STP)
0.05065	250.4189	0.99315	450.7597
0.07932	259.5031	0.94449	447.0041
0.10053	264.6509	0.89218	443.4805
0.12557	269.7823	0.84146	440.0000
0.15037	275.0185	0.79225	435.7289
0.17572	279.9856	0.74199	431.5072
0.20156	284.4558	0.69234	427.0513
0.22557	289.4784	0.64134	422.7515
0.25139	293.9261	0.59207	417.8788
0.27578	298.8706	0.54439	411.7310
0.29969	304.0965	0.49847	402.6222
0.35253	314.8358	0.44767	367.7762
0.40187	325.5544	0.40007	348.1499
0.45091	337.1293	0.34462	333.6858
0.50131	349.4990	0.29834	323.8050
0.54971	362.0493	0.24907	312.7330
0.59912	375.7906	0.19942	301.2423
0.64794	390.7084	0.14902	289.4579
0.70015	402.8254	0.09997	276.3778
0.75488	412.4497		
0.80467	421.0821		
0.85701	428.4209		
0.89807	435.6119		
0.95401	444.1684		

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 ข้อมูลการกระจายตัวของขนาดรูพรุน

ค.2.1 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ ที่ใช้อะซิโตนเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

ตารางที่ ค.6ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้อะซิโตนเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Dv (log d) (cc/g)
1.398	0.2035
1.679	0.2560
1.926	0.2842
2.172	0.3135
2.431	0.2808
2.705	0.3188
3.041	0.4219
3.417	0.7358
3.812	0.4529
4.288	0.1046
4.845	0.0856
5.528	0.0780
6.381	0.0610
7.726	0.0477
9.612	0.0466
12.178	0.0490
16.524	0.0466
28.444	0.0275
1611.467	0.0042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.2 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ ที่ใช้เอทานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้เอทานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Dv (log d) (cc/g)
1.405	0.1698
1.670	0.1814
1.923	0.2365
2.184	0.2062
2.428	0.2616
2.725	0.2341
3.048	0.3069
3.410	0.4347
3.818	0.2862
4.264	0.1277
4.801	0.1224
5.563	0.0939
6.546	0.0874
7.712	0.1017
9.278	0.0822
12.121	0.0629
16.906	0.0610
30.390	0.0418
189.241	0.0089

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.3 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 105 bar 40 °C

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Dv (log d) (cc/g)
1.402	0.3308
1.660	0.3869
1.906	0.4812
2.156	0.5040
2.421	0.5254
2.711	0.5936
3.031	0.6917
3.407	1.4000
3.798	1.2320
4.275	0.1472
4.830	0.2413
5.493	0.1387
6.457	0.1146
7.595	0.1733
9.267	0.0808
12.16	0.0637
16.454	0.0785
26.754	0.0290
1609.961	0.0039

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.4 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 125 bar 40 °C

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 125 bar 40 °C

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Dv (log d) (cc/g)
1.406	0.2825
1.683	0.3392
1.923	0.3533
2.153	0.3607
2.420	0.3953
2.713	0.4574
3.048	0.4900
3.401	1.0310
3.813	1.3740
4.295	0.1533
4.818	0.2234
5.554	0.1295
6.481	0.1259
7.595	0.1100
9.398	0.0983
12.069	0.0802
17.033	0.0827
27.994	0.0381
499.485	0.0063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2.5 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 145 bar 40 °C

ตารางที่ ค10 ข้อมูลการกระจายตัวขนาดรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นสารแลกเปลี่ยนตัวทำละลายและทำแห้งที่สภาวะ 145 bar 40 °C

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Dv (log d) (cc/g)
1.427	0.3034
1.687	0.3944
1.933	0.4144
2.184	0.4941
2.445	0.5148
2.716	0.4879
3.038	0.6854
3.403	1.2510
3.808	2.1720
4.271	0.5352
4.808	0.3037
5.487	0.2016
6.381	0.1464
7.570	0.1334
9.241	0.1009
11.780	0.0805
16.325	0.0436
27.922	0.0238
159.011	0.0068

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometer

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนของตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

ง.1.1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

1) แหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเครื่องกำเนิดแสงภายในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย โดยหลอดกำเนิดแสงมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ดังนั้นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง ตัวอย่างแหล่งกำเนิดแสงในช่วง UV เช่น หลอด H2 and D2 lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 160-380 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปี UV Molecular Absorption และช่วง visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปีเป็นแบบ UV/visible/near-IR molecular Absorption

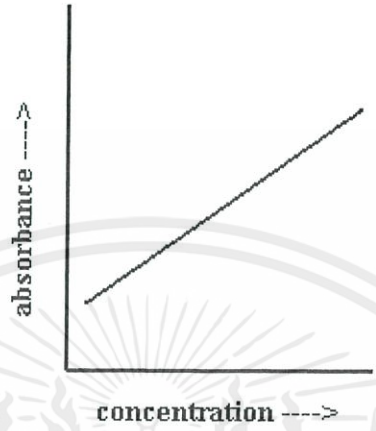
2) Monochromatorคือ ส่วนประกอบที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว โดยใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (Prism) หรือ เกรตติ้ง (Grating) เป็นตัวควบคุมแสง

3) เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (Cell Sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (Cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4) Detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier Tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (Silicon Diode Detector)

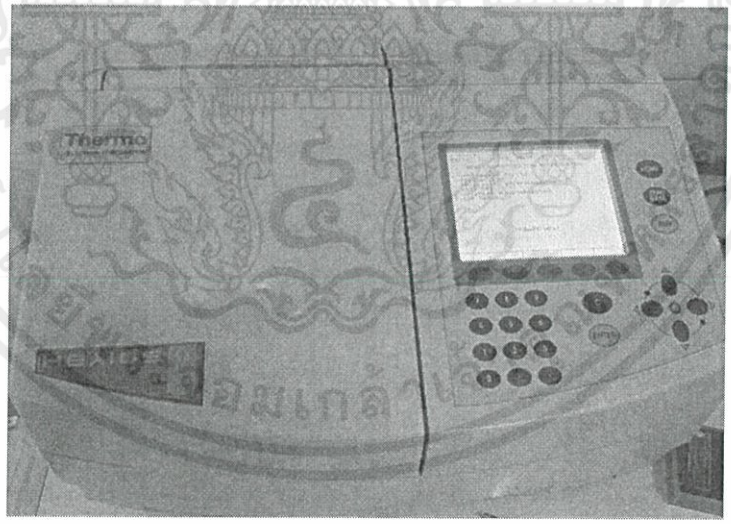
เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวิเคราะห์สารในเชิงปริมาณด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy สามารถทำได้โดยใช้วิธีการสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่า Absorbance และความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ดังรูปที่ ง.1 เมื่อสามารถวัดค่า Absorbance ของสารได้ก็สามารถหาปริมาณของสารที่จะวิเคราะห์ได้จากกราฟ



รูปที่ ง.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของสาร

ง.2 วิธีใช้เครื่องUV-Vis Spectrophotometer



รูปที่ ง.2 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer แบบลำแสงเดี่ยวยี่ห้อ HEXIOS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวิธีใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงโดยทั่วไปมีดังนี้

1) ถอดถุงคลุมเครื่องออก
2) เปิดสวิทซ์ไฟฟ้าเพื่ออุ่นเครื่องนาน 10-30 min
3) ปิดแสงจากภายในหรือภายนอกไม่ให้ตกกระทบตัวไวแสง โดยการปิดฝาครอบช่องใส่คิวเวทท์และปิดช่องแสงออก
4) ปรับ 0%T ด้วยปุ่มปรับศูนย์ ค่าความเข้มของแสงควรจะคงที่ ถ้าไม่คงที่อาจเกิดจากการอุ่นเครื่องไม่พอ หรือเครื่องมือมีความผิดปกติ
5) เลือกความยาวคลื่นแสงที่ต้องการวัดโดยหมุนปุ่มเลือกความยาวคลื่น
6) เลือกตัวกรองตัดแสงรบกวนที่เหมาะสม
7) ใส่รีเอเจนต์อ้างอิง (Reagent Blank) ลงในช่องใส่คิวเวทท์ ปิดฝาช่องใส่คิวเวทท์
8) ปรับ 100%T หรือ OD ด้วยปุ่มควบคุมการปรับในขั้นตอนนี้ต้องกระทำทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงที่ใช้วัด
9) ใส่สารตัวอย่างลงในช่องใส่คิวเวทท์ ปิดฝาช่องใส่คิวเวทท์
10) อ่านและบันทึกค่า %T หรือ A
11) ปิดสวิทซ์ไฟฟ้า ปล่อยให้เครื่องเย็นก่อนคลุมเครื่องด้วยถุงคลุมเครื่องมือ

ง.3 การสร้างกราฟมาตรฐาน

การสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลสามารถทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

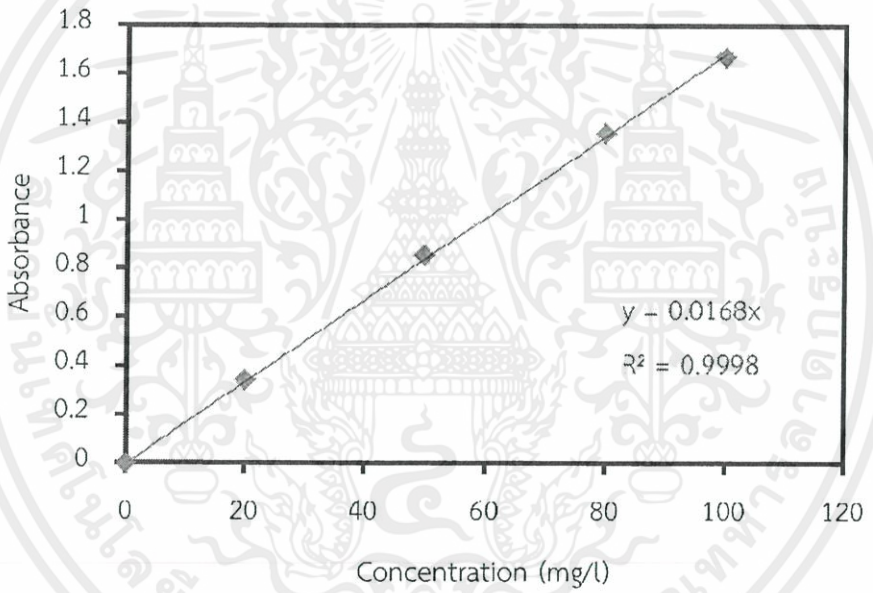
1) ใช้สารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 mg/l โดยชั่งผลึกฟีนอลประมาณ 0.05 g แล้วนำมาเจือจางในน้ำกลั่นปริมาตร 500 ml
2) นำสารละลายฟีนอลมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้น 80 50 และ 20 mg/l
3) นำสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 mg/l มาสแกนหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่สูงที่สุดด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ซึ่งความยาวคลื่นที่ได้คือ 270 nm
4) นำสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 80 50 และ 20 mg/l มาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 270 nm ได้ผลดังตารางที่ ง.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0
20	0.343
50	0.851
80	1.356
100	1.668

5) นำค่าจากตารางที่ ง.1 มาสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ดังรูปที่ ง.3



รูปที่ ง.3 กราฟมาตรฐานของสารละลายฟีนอล

ง.4 ผลการทดลองหาปริมาณสารด้วยเครื่องUV-Vis Spectrophotometer

นำคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ใช้ตัวทำละลายได้แก่ อะซิโตน เอทานอล และไอโซโพรพานอล ในกระบวนการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายอุณหภูมิในการทำแห้งที่ 40 °C และความดันในการทำแห้งที่ 105 bar มาทดลองดูดซับสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/l แล้วเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลือด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 270 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่เหลือ ที่เวลาต่างๆของการดูดซับโดยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลาย

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง (min)	ค่าการดูดกลืนแสง	ปริมาณฟีนอลที่เหลือ (mg/l)
0	1.724	100.000
30	1.243	73.988
60	0.743	44.226
90	0.700	41.667
120	0.650	38.690
240	0.612	36.429
420	0.545	32.440
720	0.538	32.024

ตารางที่ ง.3 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่เหลือ ที่เวลาต่างๆของการดูดซับโดยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง (min)	ค่าการดูดกลืนแสง	ปริมาณฟีนอลที่เหลือ (mg/l)
0	1.724	100.000
30	1.500	89.286
60	1.135	67.560
90	1.068	63.571
120	1.043	62.083
240	0.945	56.250
420	0.932	55.476
720	0.928	55.238

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่เหลือ ที่เวลาต่างๆของการดูดซับโดยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง (min)	ค่าการดูดกลืนแสง	ปริมาณฟีนอลที่เหลือ (mg/l)
0	1.724	100.000
30	1.014	60.357
60	0.553	32.917
90	0.532	31.667
120	0.489	29.107
240	0.439	26.131
420	0.427	25.417
720	0.400	23.810

จากผลการทดลองสามารถหาค่าปริมาณการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้ และคำนวณประสิทธิภาพของการกำจัดฟีนอลจากเวลาที่สุมดุล ดังต่อไปนี้

1) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับฟีนอลต่อกรัมตัวดูดซับคาร์บอนแอโรเจลไมโครสฟียร์ (q_t) กับเวลาโดยคำนวณปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เวลาใดๆ (mg/g) จากสมการที่ 3.1

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \qquad (ง.1)$$

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> หาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่เวลา 30 min

$$q_t = \frac{\left(100\,{}^{mg}/_{l} - 73.988\,{}^{mg}/_{l}\right) \times 0.025l}{0.02095g} = 31.0405\,{}^{mg}/_{g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.5 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายที่เวลาต่างๆ

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง (min)	ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ (mg/g)
0	0
30	31.04046
60	66.55586
90	69.61018
120	73.16172
240	75.86089
420	80.61996
720	81.11717

ตารางที่ ง.6 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายที่เวลาต่างๆ

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง (min)	ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ (mg/g)
0	0.00000
30	12.78554
60	38.71179
90	43.47085
120	45.24662
240	52.20764
420	53.13104
720	53.41516

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 ผลการทดลองหาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายที่เวลาต่างๆ

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง (min)	ปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ (mg/g)
0	0
30	47.30651
60	80.05171
90	81.54336
120	84.59768
240	88.14922
420	89.00159
720	90.91942

2) หาค่าปริมาณการดูดซับฟีนอลของคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สังเคราะห์ได้โดยคำนวณจากเวลาที่สมดุลคือ 420 min ดังสมการที่ 3.2

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \qquad (ง.2)$$

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> หาปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนแอโรเจลไมโครสเฟียร์ที่สมดุลที่เวลา 420 min

$$q_e = \frac{\left(100\,{}^{mg}/_{l} - 32.027\,{}^{mg}/_{l}\right) \times 0.025l}{0.02095g} = 81.1172\,{}^{mg}/_{g}$$

3) คำนวณประสิทธิภาพของการกำจัดฟีนอลจากเวลาที่สุมดุลดังสมการที่ 3.3

$$\%removal = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \qquad (ง.3)$$

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> ประสิทธิภาพของการกำจัดฟีนอลจากเวลาที่สมดุลที่เวลา 420 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%removal = \frac{\left(100\,{}^{mg}/_{l} - 32.024\,{}^{mg}/_{l}\right)}{100\,{}^{mg}/_{l}} \times 100 = 61.9762\%$$

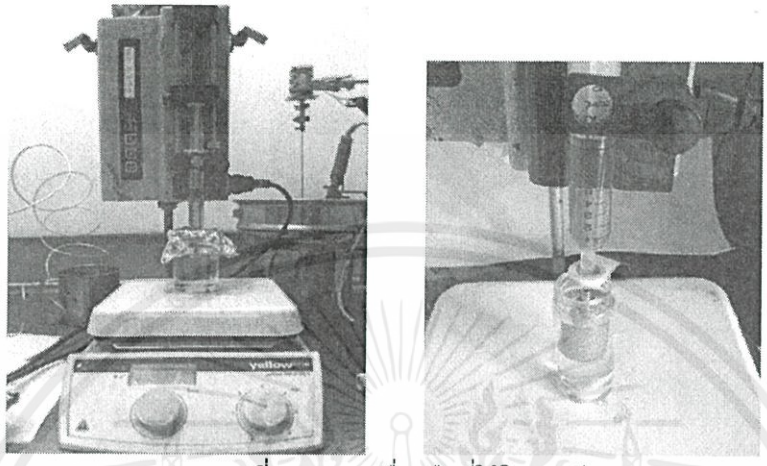
ภาคผนวก จ

อุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนแอโรเจล

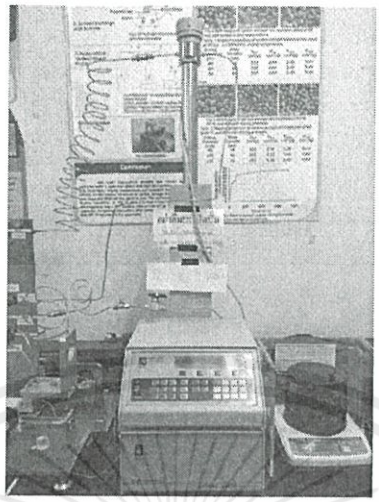


รูปที่ จ.1 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการฉีด

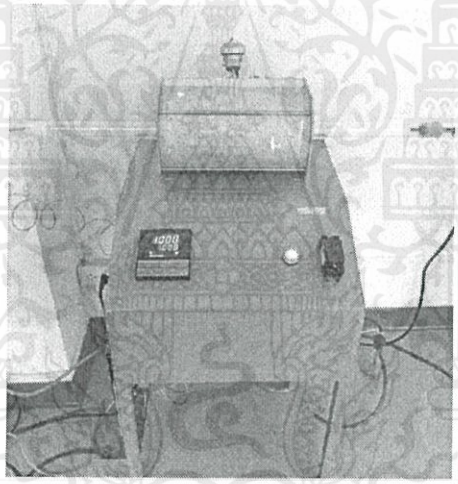
รูปที่ จ.2 เมทัลซินเตอร์ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 10 μm)

รูปที่ จ.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะทนความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.4 ปั๊มความสูง (ISCO Syringe Pump Model 260D/USA)



รูปที่ จ.5 เตาเผาแบบหลอด (Tube Furnace)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณค่าการละลาย (Solubility) ของตัวทำละลายในคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.1 การคำนวณหาจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ที่สภาวะต่างๆ

1) ใช้สมการสภาวะเปง-โรบินสัน (Peng-Robinson Equation of State) ดังสมการ (ฉ.1) ในการคำนวณหาปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ

$$P = \frac{RT}{\overline{V} - b} - \frac{a\alpha}{\overline{V}^2 + 2b\overline{V} - b^2} \quad \text{(ฉ.1)}$$

$$a = 0.45724 R^2 T_C^2 / P_C \quad \text{(ฉ.2)}$$

$$b = 0.07780 R T_C / P_C \quad \text{(ฉ.3)}$$

$$\alpha = \left[1 + \left(0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2\right)\left(1 - T_r^{0.5}\right)\right]^2 \quad \text{(ฉ.4)}$$

เมื่อกำหนดให้

$\omega = 0.224$

$R = 83.14 cm^3 bar K^{-1} mol^{-1}$

$T_C = 304.2 K$

$P_C = 73.83 bar$

โดยตัวแปรต่างๆแสดงดังตารางที่ ฉ.1

ตารางที่ ฉ.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้แทนในสมการสภาวะเปง-โรบินสัน

T(K)	T_r	P(bar)	a	b	α
313.15	1.0294	105	3,961,410	26.651	0.9795
313.15	1.0952	125	3,961,410	26.651	0.9354
313.15	1.1609	145	3,961,410	26.651	0.8935

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆดังตารางที่ ฉ.2

ตารางที่ ฉ.2 ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ

T(K)	P(bar)	$\overline{V}$ (cm^3/mol)
313.15	105	73
313.15	125	64
313.15	145	60

2) คำนวณหาจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆในเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 15 cm^3

ตัวอย่างการคำนวณ หาจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 313.15 K และความดัน 105 bar

$$\frac{15cm^3}{73\frac{cm^3}{mol}} = 0.204mol$$

ตารางที่ ฉ.3 จำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆในเครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 15 cm^3

T(K)	P(bar)	ปริมาณ CO_2(mol)
313.15	105	0.204
313.15	125	0.233
313.15	145	0.252

ฉ.2 การคำนวณหาจำนวนโมลตัวทำละลายต่างๆในเครื่องปฏิกรณ์

สมมติว่ามีอะซิโตนเติมเต็มปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของอาร์เอฟแอโรเจลจะสามารถคำนวณหาจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ที่สภาวะต่างๆได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ หาปริมาณอะซิโตนในโครงสร้างเจลที่อุณหภูมิ 313.15 K และความดัน 105 bar

1) คาร์บอนปริมาณ 0.0258g มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.366cm^3/g จะมีปริมาณอะซิโตนในโครงสร้างเจลเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0.366\frac{cm^3}{g}\times 0.0258g = 0.00944cm^3$$

2) อะซิโตนปริมาณ 0.03711 cm^3 มีความหนาแน่น 0.791 g/ cm^3 จะมีน้ำหนักเท่ากับ

$$0.00944cm^3 \times 0.791\frac{g}{cm^3} = 0.00747g$$

3) อะซิโตนปริมาณ 0.03116 g น้ำหนักโมเลกุล 58 g/mol จะมีจำนวนโมลเท่ากับ

$$0.00747g \div 58\frac{g}{mol} = 0.000129mol$$

เมื่อกำหนดให้

ความหนาแน่นอะซิโตน = 0.791 g/cm^3

น้ำหนักโมเลกุลอะซิโตน = 58 g/mol

รายละเอียดข้อมูลต่างๆแสดงดังตารางที่ ฉ.4

ตารางที่ ฉ.4 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาจำนวนโมลของตัวทำละลายในเครื่องปฏิกรณ์ที่สภาวะต่างๆ

ตัวทำละลาย	T (K)	p (bar)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	น้ำหนักคาร์บอน (g)	ปริมาตรตัวทำละลาย (cm^3)	น้ำหนักตัวทำละลาย (g)	จำนวนโมลตัวทำละลาย (mol)
อะซิโตน	313.15	105	0.366	0.0258	0.00944	0.00747	0.000129
เอทานอล	313.15	105	0.337	0.0508	0.01712	0.01351	0.000293
ไอโซโพรพานอล	313.15	105	0.576	0.0228	0.01313	0.01031	0.000171
	313.15	125	0.544	0.0461	0.02507	0.03619	0.000603
	313.15	145	0.700	0.0369	0.02583	0.03729	0.000621

ฉ.3 การคำนวณหาค่าการละลาย (Solubility) ของตัวทำละลายในคาร์บอนไดออกไซด์

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> ค่าการละลายของอะซิโตนในคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 313.15 K และความดัน 105 bar

มีปริมาณอะซิโตนและคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบเท่ากับ 0.000129 mol และ 0.204 mol ตามลำดับ ค่าการละลายของอะซิโตนในคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{0.000129mol}{(0.000129+0.204)mol} = 0.000632mol/mol$$

รายละเอียดข้อมูลต่างๆแสดงดังตารางที่ ฉ.5

ตารางที่ ฉ.5 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการละลายของตัวทำละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ

ตัวทำละลาย	T (K)	p (bar)	จำนวนโมลตัวทำละลาย (mol)	จำนวนโมล CO_2 (mol)	ค่าการละลาย (mol/mol)
อะซิโตน	313.15	105	0.000129	0.204	0.000632
เอทานอล	313.15	105	0.000293	0.204	0.001434
ไอโซโพรพานอล	313.15	105	0.000171	0.204	0.000838
	313.15	125	0.000603	0.233	0.002581
	313.15	145	0.000621	0.252	0.006613

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้