

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกำจัด HPNA ด้วยสารดูดซับคาร์บอน
HPNA REMOVAL BY CARBON ADSORBENTS



T104110



วิจัย พิลาวัลย์
วิษณุ ศิริการ

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....104110

วัน,เดือน,ปี.....3.0.ค.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HPNA REMOVAL BY CARBON ADSORBENTS



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

2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาบัตร

การกำจัด HPNA ด้วยสารดูดซับคาร์บอน

นักศึกษา

นายวิชัย พิลาวัลย์ รหัสประจำตัว 48010816

นายวิษณุ ศิริการ รหัสประจำตัว 48010842

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

พ.ศ.

2551

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
(ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

ประธานกรรมการ

รณฤดี เบญจางคประเสริฐ
(ผศ.รณฤดี เบญจางคประเสริฐ)

กรรมการ

วลัยรัตน์ สุขสมัย
(ดร.วลัยรัตน์ สุขสมัย)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การกำจัด HPNA ด้วยสารดูดซับคาร์บอน		
นักศึกษา	นายวิชัย	พิลาวัลย์	รหัสประจำตัว 48010816
	นายวิษณุ	ศิริการ	รหัสประจำตัว 48010842
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
พ.ศ.	2551		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการกำจัด Heavy polynuclear aromatics (HPNA) ด้วยวิธีการดูดซับ โดยสารดูดซับคาร์บอนทางการค้าและเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์จากรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ HPNA ถูกดูดซับโดยสารดูดซับคาร์บอนด้วยการทดสอบ 2 ส่วน คือ 1.ประสิทธิภาพการดูดซับ และ 2.ความจุในการดูดซับ วิเคราะห์ความพรุนของสารดูดซับคาร์บอนด้วยเครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจนและวิเคราะห์ HPNA ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับ RF4 ซึ่งมีปริมาณเมโซพอร์มากที่สุดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนขนาดใหญ่สามารถกำจัด HPNA ในน้ำมันจากหน่วยแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนรวมประมาณ 77 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่า AC1 สารดูดซับคาร์บอนทางการค้า 6.2 เท่า และการทดลองความจุในการดูดซับพบว่า RF4 มีความจุมากกว่า สารดูดซับคาร์บอนทางการค้าประมาณ 2.9 เท่า

Report Title	HPNA removal by carbon adsorbents		
Student	Mr. Wijai Pilawan	Student ID.	48010816
	Mr. Wisanu Sirikarn	Student ID.	48010842
Degree	Bachelor of Engineering		
Programme	Chemical Engineering		
Year	2008		
Thesis Advisor	Dr. Kriangsak Kraiwattanawong		

ABSTRACT

This project is to study about the HPNA removal by commercial carbon adsorbents and mesoporous carbons synthesized from resorcinol and formaldehyde. HPNA is adsorbed by carbon adsorbents by the batch tests: 1 Adsorption performance and 2 Adsorption capacity. The carbon adsorbents are characterized by nitrogen adsorption apparatus and HPNA is analyzed by X-ray fluorescence at 510 nm of wavelength. In section 1, the results show that RF4 possessing the highest mesopore volume and large pore size diameter can remove HPNA in oil from hydrocracking unit around 77 % and is higher than AC1 which is the commercial carbon adsorbents around 6.2 times. In section 2, adsorption capacity of RF4 is higher than AC1 around 2.9 times.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบริษัท ปตท. จำกัด มหาชน ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการทำโครงการ
ขอขอบพระคุณคุณรุ่งนภา จันทร์ชูเกียรติ โรงกลั่นไทยออยล์ ที่ช่วยเหลือในด้านการวิเคราะห์สาร
ตัวอย่าง ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง BET วิเคราะห์สมบัติของสารดูดซับคาร์บอน
ขอขอบพระคุณ คุณเพ็ญพิศ วงศ์มณีนิล นักศึกษาปริญญาเอก และนักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือใน
การทำโครงการ

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และอบรมสั่งสอนในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำแนะนำและ
ช่วยเหลือตลอดการทำโครงการนี้

และสุดท้ายขอขอบพระคุณผู้ที่ให้การสนับสนุนในการทำโครงการที่ไม่ได้กล่าวนามทุกๆ ท่านมา
 ณ ที่นี้ หากโครงการนี้มีความผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัยมา ณ โอกาสนี้

วิจัย พิลาวัลย์
วิญญู ศิริการ
ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม.....	4
2.1.1 Basic Unit Configuration of Hydrocracking Unit.....	4
2.1.1.1 Once-through Hydrocracking Unit.....	4
2.1.1.2 Single-stage Hydrocracking Unit.....	5
2.1.1.3 Two-stage Hydrocracking Unit.....	5
2.1.2 ตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการ.....	6
2.1.2.1 อุณหภูมิ.....	6
2.1.2.2 ความดันของเครื่องปฏิกรณ์.....	6
2.1.2.3 Space Velocity.....	6
2.2 โพลีไซคลิกอะโรมาติกส์ ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatics Hydrocarbon).....	6
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงของ PAHs ในสิ่งแวดล้อม.....	6
2.2.2 ความเป็นพิษ.....	7
2.2.3 การเข้าสู่ร่างกาย.....	7

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 คาร์บอนกัมมันต์.....	8
2.3.1 ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์.....	9
2.3.1.1 แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น.....	9
2.3.1.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุนบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์.....	9
2.3.1.3 แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง.....	9
2.3.1.4 แบ่งตามความหนาแน่นของคาร์บอนกัมมันต์.....	10
2.3.1.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ.....	10
2.4 การดูดซับ.....	10
2.4.1 กลไกการดูดซับ.....	11
2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption).....	11
2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption).....	12
2.4.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms).....	12
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	14
2.4.3.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ.....	14
2.4.3.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ.....	14
2.4.3.3 ผลของอุณหภูมิ.....	14
2.5 เมโซพอร์สคาร์บอน.....	15
2.5.1 การสังเคราะห์และสมบัติของเมโซพอร์สคาร์บอน.....	15
2.5.2 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์.....	16
2.5.3 กระบวนการเกิดเจลและการบ่ม.....	16
2.5.4 การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย.....	17
2.5.5 ไพโรไลซิส.....	17
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 การทดลอง.....	21
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้.....	21
3.3 วิธีการทดลอง.....	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนโดยวิธีการโซลเจล.....	22
3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ (Adsorption performance) แบบบะ.....	22
3.3.3 การศึกษาความจุในการดูดซับ (Adsorption capacity) แบบบะ.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	25
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของสารดูดซับคาร์บอน.....	26
4.2 ผลการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับ (Adsorption performance) แบบบะ.....	27
4.2.1 ผลการดูดซับ HPNA.....	27
4.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการหาประสิทธิภาพของสารดูดซับคาร์บอน.....	28
4.3 ผลการทดลองเพื่อหาความจุในการดูดซับ (Adsorption capacity) แบบบะ.....	29
4.3.1 ผลการดูดซับ HPNA.....	29
4.3.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการหาความจุในการดูดซับของสารดูดซับคาร์บอน.....	30
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	31
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	31
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	31
เอกสารอ้างอิง.....	32
เอกสารอ้างอิง(ต่อ).....	33
ภาคผนวก.....	34
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	35
ภาคผนวก ข ผลการทดลองการวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	38
ภาคผนวก ค การทดสอบสมบัติของสารดูดซับโดยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน.....	40
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์สมบัติของสารดูดซับโดยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน.....	42

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มขนาดรูพรุนตามระบบ IUPAC.....	9
ตารางที่ 3.1 เวลาดูดซับของสารที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพของสารดูดซับ.....	23
ตารางที่ 3.2 เวลาการดูดซับของสารที่ใช้ในการทดลองหาความจุในการดูดซับ.....	24
ตารางที่ 4.1 ชนิดของสารดูดซับที่นำมาทดสอบการดูดซับ HPNA แบบกะ.....	25
ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของสารดูดซับคาร์บอนด้วยแบบจำลอง BET.....	26
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละ HPNA ในน้ำมันหลังการดูดซับ.....	27
ตารางที่ 4.4 ความจุในการดูดซับ HPNA ของสารดูดซับคาร์บอน.....	29
ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของการดูดซับของสารดูดซับชนิดต่างๆ.....	38
ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองหาความจุในการดูดซับของสารดูดซับชนิดต่างๆ.....	39
ตารางที่ ง-1 ผลการกระจายตัวขนาดของรูพรุนของ RF1.....	42
ตารางที่ ง-2 ผลการกระจายตัวขนาดของรูพรุนของ RF2.....	43
ตารางที่ ง-3 ผลการกระจายตัวขนาดของรูพรุนของ RF3.....	44
ตารางที่ ง-4 ผลการกระจายตัวขนาดของรูพรุนของ RF4.....	45
ตารางที่ ง-5 ผลการกระจายตัวขนาดของรูพรุนของ AC1.....	46

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	Once-through Hydrocracking Unit.....	4
รูปที่ 2.2	Two-stage Hydrocracking Unit.....	5
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างโครงสร้างและชื่อเรียกเฉพาะของสารประกอบโพลีไซคลิก อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน.....	8
รูปที่ 2.4	กลไกการดูดซับและคายซับ.....	12
รูปที่ 2.5	ไอโซเทอมของการดูดซับตามการจำแนกของ IUPAC.....	13
รูปที่ 2.6	ปฏิกิริยาการเติม (Addition reaction).....	16
รูปที่ 2.7	ปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation reaction).....	16
รูปที่ 2.8	สมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ชนิด A และ ชนิด B ที่ใช้ในการทดลอง.....	18
รูปที่ 2.9	การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากปาล์ม.....	18
รูปที่ 2.10	การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ F400.....	19
รูปที่ 2.11	(1) ไอโซเทอมการดูดซับของเบนซีน (2) ไอโซเทอมการดูดซับของโทลูอีน.....	19
รูปที่ 2.12	ไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับของแก๊สไนโตรเจน.....	20
รูปที่ 2.13	การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอน.....	20
รูปที่ 4.1	การกระจายตัวขนาดรูพรุนของสารดูดซับคาร์บอน AC1 RF1 RF2 RF3 และ RF4.....	26
รูปที่ 4.2	กราฟข้อมูลผลการดูดซับ HPNA ด้วยสารดูดซับคาร์บอน 5 ชนิด ได้แก่ AC1 RF1 RF2 RF3 และ RF4 โดยแสดงเป็นร้อยละปริมาณของสาร HPNA ที่เหลือเทียบกับเวลา.....	28
รูปที่ 4.3	กราฟปริมาณความจุของสารดูดซับคาร์บอน 2 ชนิด ได้แก่ AC1 และ RF4 โดยแสดงปริมาณความจุของสารดูดซับคาร์บอนเทียบกับเวลา.....	30
รูปที่ ก-1	รังสีเอ็กซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดหลุดออก.....	35
รูปที่ ก-2	การปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน1.....	36
รูปที่ ก-3	การปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน2.....	36
รูปที่ ก-4	ส่วนประกอบหลักของเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	37
รูปที่ ค-1	เครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน (Micromeritics, ASAP 2020).....	41
รูปที่ ง-1	การกระจายตัวขนาดรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอน RF1.....	42
รูปที่ ง-2	การกระจายตัวขนาดรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอน RF2.....	43

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ ง-3 การกระจายตัวขนาดรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอน RF3.....	44
รูปที่ ง-4 การกระจายตัวขนาดรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอน RF4.....	45
รูปที่ ง-5 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ AC1.....	46



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมประเภทปิโตรเคมีโดยเฉพาะ โรงกลั่นน้ำมันมักจะพบปัญหาเกี่ยวกับการเกิดฟาวลิ่ง (Fouling) ในหน่วยแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking Unit) เมื่อเกิดฟาวลิ่งในกระบวนการแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ซึ่งฟาวลิ่งที่เกิดขึ้นมักเกิดจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดของโมเลกุลขนาดใหญ่ ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทโพลีอะโรมาติกส์

Heavy Polynuclear Aromatic Hydrocarbon (HPNA) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยวงเบนซีนหลายวงและมากกว่า 11 วงขึ้นไป [1] มีสมบัติทางกายภาพคือ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ ซึ่งทำให้เกิดเป็นแว็กซ์ (Wax) เคลือบที่ผนังของท่อหรือรู โดยเฉพาะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [2] ของหน่วยแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม ทำให้ยากต่อการนำส่วนที่ผ่านจากกระบวนการแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมแล้ว กลับมาผ่านกระบวนการใหม่อีกครั้ง (Recycle) ในกระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องมีการกำจัดสาร HPNA ที่เกิดขึ้นออกจากส่วนล่างของหน่วยแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม โดยการนำน้ำมันที่ได้จากส่วนล่างของหน่วยแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม มาผ่านกระบวนการดูดซับด้วยสารดูดซับ (Adsorbent) ก่อนที่จะนำกลับมาป้อนใหม่ในกระบวนการแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม เพื่อลดปริมาณ HPNA และเป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของ HPNA ซึ่งอาจจะทำให้เกิดโครงสร้างของ HPNA ที่ใหญ่ขึ้น และเกิดเป็นฟาวลิ่งขึ้นมาได้

วิธีการกำจัด HPNA ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันใช้วิธีการดูดซับโดยอาศัยสารดูดซับประเภทคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว (Coconut shell activated carbon) แต่เนื่องจากประสิทธิภาพของคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวเพื่อใช้ในการดูดซับ HPNA มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ต่ำ โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาสารดูดซับประเภทคาร์บอนชนิดอื่นๆ ที่มีความเหมาะสมในการดูดซับ HPNA โดยจะใช้คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และเมโซพอร์รัสคาร์บอนที่สังเคราะห์จากรีซอร์ซินอลและฟอรั้มัลดีไฮด์มาทดสอบการดูดซับ HPNA

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาและทำการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนเพื่อใช้ในการดูดซับ HPNA

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับประเภทคาร์บอนชนิดต่างๆ ในการดูดซับ HPNA

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 สังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนในอัตราส่วนต่างๆ กันจำนวน 4 สภาวะ ได้แก่ RF1 RF2 RF3 และ RF4 และผ่านการทำให้แห้งแบบสูญญากาศ

1.3.2 วิเคราะห์สมบัติของเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้และคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า โดยอาศัยเครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน

1.3.3 ทดสอบการดูดซับ HPNA โดยใช้วิธีทดสอบแบบกะ ได้แก่ การทดสอบหาประสิทธิภาพการดูดซับ ด้วยสารดูดซับ 5 ชนิด ได้แก่ AC1 RF1 RF2 RF3 และ RF4

1.3.4 จากผลการทดลองหาประสิทธิภาพของการดูดซับ นำคาร์บอนกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดของสารดูดซับคาร์บอนทางการค้าและเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ มาศึกษาหาความจุในการดูดซับ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับของสารดูดซับ

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนโดยใช้อัตราส่วนของสารตั้งต้นต่างๆ กัน

1.4.3 ศึกษาและออกแบบการทดลองที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของสารดูดซับประเภทคาร์บอนซึ่งได้แก่ คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และเมโซพอร์สคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์

1.4.4 เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเพื่อนำข้อมูลไปเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกสารดูดซับประเภทคาร์บอนที่มีความสามารถในการดูดซับ HPNA ได้ดีกว่าเดิมในโรงกลั่นน้ำมัน

1.4.5 วิเคราะห์ประสิทธิภาพและสรุปผลการทดลอง

1.4.6 จัดทำรายงานปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1.5.1 ได้รับความรู้เกี่ยวกับกระบวนการดูฉบับและปัจจัยที่มีผลต่อการดูฉบับ HPNA

1.5.2 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน

1.5.3 สามารถนำข้อมูลจากโครงการไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันได้ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking unit) [2]

กระบวนการนี้เป็นการรวมเคมีที่เกี่ยวกับการเกิดคาร์โบเนียมไอออน (คาร์โบเนียมไอออนคือ การที่ไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไอออนที่มีประจุลบออกไป ทำให้ไฮโดรคาร์บอนนั้นมีสภาพเป็นบวก) ของกระบวนการคาตาลิติกแครกกิง (Catalytic Cracking) เข้ากับเคมีด้านการเติมไฮโดรเจน เริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นบริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วโอเลฟินก็จะไปทำให้เกิดเป็นคาร์โบเนียมไอออน จากนั้นจะเกิดการแตกตัวแล้วจะถูกเติมไฮโดรเจนให้อิ่มตัวทันที

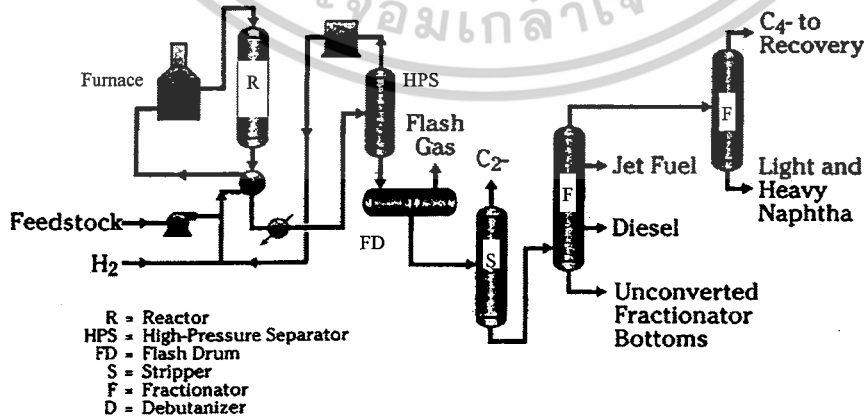
ปฏิกิริยาที่เกิดรวมแล้วจะเป็นประเภทคายความร้อน จึงทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ การออกแบบกระบวนการจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้เป็นอย่างดี เพราะถ้าคุมไม่อยู่อาจส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสียหรืออาจเกิดฟาว์ลิงขึ้นมาได้

2.1.1 Basic Unit Configuration of Hydrocracking Unit

โดยหลักๆ แล้วกระบวนการแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม มีรูปแบบกระบวนการผลิตต่างๆ ไป 3 แบบ คือ

2.1.1.1 Once-through Hydrocracking Unit

เหมาะสำหรับ โรงกลั่นที่สามารถใช้ผลิตภัณฑ์ส่วนหนักรๆ ที่ยังแตกตัวได้ไม่หมด (Unconverted Fractionator Bottoms) ไปใช้ประโยชน์ทางอื่นที่ได้มูลค่าดีกว่า เช่น นำไปเป็นสารป้อนให้โรงงานทำน้ำมันเครื่องเพราะมีคุณภาพดีและมีความเหมาะสม หรือนำไปเป็นสารป้อนเข้าหน่วยแครกเกอร์เพราะจะเป็นสารป้อนที่สะอาด ให้ผลิตภัณฑ์คุณภาพดีและตรงกับความต้องการสูง รูปแบบกระบวนการแบบ Once-through Hydrocracking Unit แสดงได้ดังรูป 2.1 ซึ่งโรงงานแบบนี้จะมีราคาถูกที่สุด



รูปที่ 2.1 Once-through Hydrocracking Unit [2]

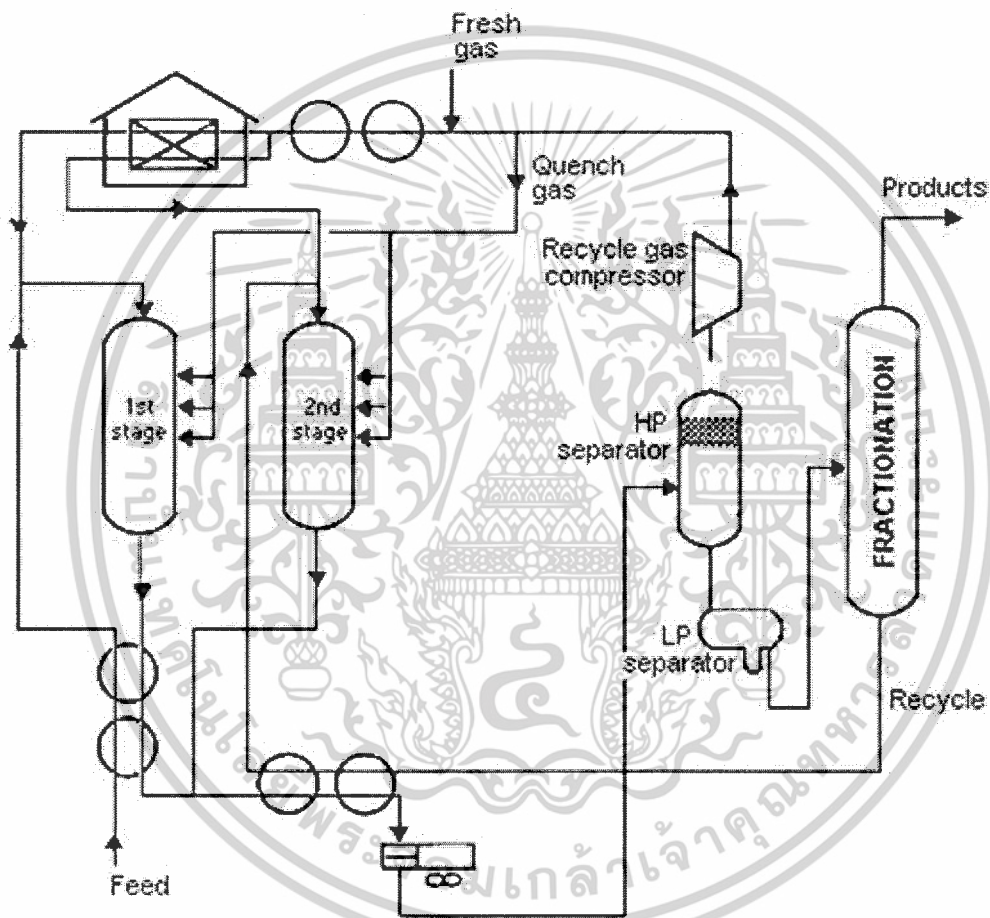
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 Single-stage Hydrocracking Unit

จะมีรูปแบบของกระบวนการคล้ายกับ Once-through แต่มีข้อแตกต่างคือ ด้านล่างของส่วนที่ผ่านกระบวนการแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม ส่วนใหญ่จะส่งกลับเข้าสู่กระบวนการ กับสารป้อนใหม่เพื่อทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ถ้าสารป้อนมีคุณภาพดีจะสามารถเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจนหมดได้

2.1.1.3 Two-stage Hydrocracking Unit

จะมีรูปแบบของกระบวนการดังแสดงในรูป 2.2 ซึ่งจะมีเครื่องปฏิกรณ์ 2 เครื่องต่อกัน โดยเครื่องที่ 2 จะสามารถเปลี่ยนสายป้อนกลับ (Recycle stream) ได้จนหมด แบบนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ที่สูงมาก



รูปที่ 2.2 Two-stage Hydrocracking Unit [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการ

2.1.2.1 อุณหภูมิ เป็นตัวแปรที่สำคัญในการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ เมื่อใช้ไประยะเวลาหนึ่ง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเสื่อมคุณภาพลง จำเป็นต้องปรับอุณหภูมิที่เครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นประมาณ 0.1-0.2 องศาฟาเรนไฮต์ เพื่อรักษาระดับของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอายุ 2-4 ปี

2.1.2.2 ความดันของเครื่องปฏิกรณ์ จะมีผลต่อความดันย่อยของไฮโดรเจน จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มความดันจะช่วยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์

2.1.2.3 Space Velocity ซึ่งนิยามวัดเป็น LHSV (Liquid hourly space velocity) ซึ่งเมื่อมีค่าสูงขึ้นจะทำให้เวลาที่เกิดปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนจึงต้องเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตามด้วย

ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม จะทำให้เกิดสาร Heavy Polynuclear Aromatics (HPNA) ขึ้นใน Recycle stream ซึ่งจะไปเกาะตามอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดการอุดตันของอุปกรณ์ได้

2.2 โพลีไซคลิกอะโรมาติกส์ ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatics Hydrocarbon) [3,4]

โพลีไซคลิก อะโรมาติกส์ ไฮโดรคาร์บอน หรือ พีเอเอช (PAHs) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป จัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน ส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำ และเป็นส่วนประกอบในน้ำมัน ถ่านหิน สามารถเกิดได้เองตามธรรมชาติจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เป็นเชื้อเพลิงจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์ และเชื้อเพลิงชีวมวลหรือเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ รวมทั้งควันจากท่อไอเสียรถยนต์และควันบุหรี่ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม การกลั่นน้ำมันดิบ อุตสาหกรรมไม้ ซึ่งใช้สารเคลือบทาเนื้อไม้เพื่อป้องกันแมลง PAHs พบได้ทั้งในน้ำ ดิน ดินตะกอน อากาศ น้ำใต้ดิน และบริเวณริมถนน ความเข้มข้นของ PAHs ในสิ่งแวดล้อมขึ้นกับระยะห่างระหว่างบริเวณที่ปนเปื้อนกับแหล่งที่ผลิต PAHs

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงของ PAHs ในสิ่งแวดล้อม เมื่อ PAHs เข้าสู่สิ่งแวดล้อม อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- การย่อยสลายทางชีวภาพโดยสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ
- การย่อยสลายโดยแสง PAHs ถูกออกซิไดส์ด้วยแสงได้
- การแตกสลายด้วยน้ำ ซึ่งจะเกิดได้น้อยมาก
- การรวมตัวกับดิน PAHs เป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ จึงยึดเกาะกับอนุภาคของดินหรือดินตะกอนได้ดี จึงสามารถพบการปนเปื้อนในบริเวณดังกล่าวได้สูง การกระจายในดินชั้นต่างๆ ขึ้นกับขนาดของโมเลกุลและชั้นดิน PAHs ที่มีวงเบนซีน 2-3 วง มีแนวโน้มจะพบมากในชั้นของทรายบริเวณน้ำใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิน ส่วน PAHs ที่มีวงเบนซีน 5-6 วง มีแนวโน้มที่จะพบในชั้นของดินที่มีสารอินทรีย์มาก และ PAHs เหล่านี้มีแนวโน้มจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียยากอีกด้วย

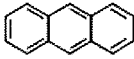
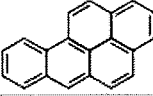
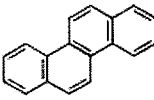


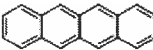

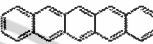
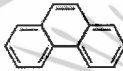

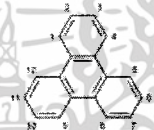
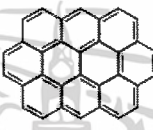
2.2.2 ความเป็นพิษ

โดยทั่วไป โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอนเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำ ในสิ่งมีชีวิตชั้นสูงจะพบความเป็นพิษเรื้อรัง การได้รับแบบเรื้อรังอาจทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบต่างๆของร่างกายได้ แต่อาการไม่รุนแรงนัก ความเป็นพิษที่สำคัญของ PAHs คือความสามารถในการก่อมะเร็งในอวัยวะหลายชนิด แต่ไม่มีผลต่อการพัฒนาของตัวอ่อนและพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิต

2.2.3 การเข้าสู่ร่างกาย

PAHs เข้าสู่ร่างกายได้หลายวิธี ทั้งโดยการกินอาหารที่ปนเปื้อน PAHs สูดดมไอระเหยหรือเข้ามาในควันไฟที่มี PAHs ผสมอยู่ หรือ โดยการสัมผัสทางผิวหนัง มีรายงานว่า PAHs เข้าสู่ร่างกายโดยการสูดดมพบ เมตาบอลไลต์ของเบนโซเอไพรีนในปัสสาวะของอาสาสมัครชายที่สูบบุหรี่ 15 -20 มวนต่อวัน เป็นเวลานานกว่า 10 ปี และเมตาบอลไลต์ในปัสสาวะของอาสาสมัครที่ยังมีสุขภาพดีมีค่าสูงกว่าในอาสาสมัครที่เป็นมะเร็งปอด และในอาสาสมัครที่กินเนื้อย่างที่ปนเปื้อนเบนโซเอไพรีนจะพบเบนโซเอไพรีนในอุจจาระ แต่จะไม่พบในอาสาสมัครที่กินเนื้อย่างที่ไม่ปนเปื้อน

การแพร่กระจายของ PAHs ในร่างกายของสัตว์ทดลองพบว่าเมื่อได้รับ โดยการสูดดมและการกินจะแพร่ไปยัง ปอด ตับ ไต และทางเดินอาหาร หนูที่ได้รับเบนโซเอไพรีน โดยการหยอดเข้าหลอดคอ พบว่าเบนโซเอไพรีนจะกระจายไปยังปอด ตับ และทางเดินอาหาร โดยเมตาบอลไลต์ในลำไส้จะมากขึ้นเมื่อเวลานานขึ้น แสดงว่ามีการขับออกทางน้ำดีและมีการหมุนเวียนระหว่างลำไส้และตับ อีกทั้งยังสามารถแพร่ไปยังลูกอ่อนในครรภ์ได้ แต่ไม่มีรายงานเกี่ยวกับการแพร่กระจายหลังการสัมผัสทางผิวหนัง

Chemical compound		Chemical compound	
Anthracene		Benzo[a]pyrene	
Chrysene		Coronene	
Corannulene		Naphthacene	
Naphthalene		Pentacene	
Phenanthrene		Pyrene	
Triphenylene		Ovalene	

รูปที่ 2.3 ตัวอย่าง โครงสร้างและชื่อเรียกเฉพาะของสารประกอบ โพลีไซคลิก อะโรมาติกส์ ไฮโดรคาร์บอน [4]

2.3 การร่อนกัมมันต์ [5-8]

คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีร่อนกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปใช้เป็นสารดูดซับ (Adsorbent) ในกระบวนการแยกแก๊สผสม ดูดซับกลิ่น กำจัดรส หรือดูดซับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย เป็นต้น คาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้จะเป็นที่รู้จักกันมานานในแง่ของการใช้เป็นสารดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับสูง ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนมาก นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนเหล่านี้ยังมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุและยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

2.3.1 ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์

สามารถแบ่งได้โดยใช้หลักต่าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ ตัวอย่างการแบ่งชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ ได้แก่

2.3.1.1 แบ่งตามชนิดของการกระตุ้น

- กระตุ้นทางเคมี (Chemical activated carbon)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวของคาร์บอน มักเป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ สารเคมีที่ใช้กระตุ้น ได้แก่ $ZnCl_2$, H_3PO_4 และ $NaCl$

- กระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical activated carbon)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์ เช่น ไออน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดซับแก๊สและไอระเหย

2.3.1.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุนบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์

การแบ่งกลุ่มขนาดของรูพรุนแบ่งได้ตามระบบ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) เป็น 3 ประเภทได้แก่

ตารางที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มขนาดรูพรุนตามระบบ IUPAC [6]

ประเภทของรูพรุน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (นาโนเมตร)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (อังสตรอม)
ไมโครพอร์ (Micropore)	< 2	< 20
เมโซพอร์ (Mesopore)	2-50	20-500
มาโครพอร์ (Macropore)	>50	>500

ขนาดของรูพรุนนี้จะส่งผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพเมื่อนำไปใช้งาน คาร์บอนกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอน รูปร่างลักษณะเป็นผลึกคล้ายแกรไฟต์ แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของคาร์บอนกัมมันต์ซึ่งมีมากกว่า โดยทั่วไปขนาดและรูปร่างโครงสร้างของผลึกเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เผา ถ้าอุณหภูมิที่เผาสูงผลึกคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จะมีขนาดเล็ก นอกจากนี้รูปร่างอะตอมของคาร์บอนยังเปลี่ยนแปลงตามส่วนประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ

2.3.1.3 แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

- ประเภทเป็นผง (Powder activated carbon หรือ PAC)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง นิยมใช้สำหรับการฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นสารละลายได้หลายชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประเภทเป็นเม็ด (Granular activated carbon หรือ GAC)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำเป็นเกล็ด ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของแก๊ส และใช้ทำหน้ากักป้องกันแก๊สและไอพิษต่างๆ

2.3.1.4 แบ่งตามความหนาแน่นของคาร์บอนกัมมันต์

- ความหนาแน่นต่ำ

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มักใช้ประโยชน์ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาลคิบหรือทำน้ำให้บริสุทธิ์

- ความหนาแน่นสูง

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือไอระเหย

2.3.1.5 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- ดูดซับแก๊ส

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับแก๊สพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภทที่ได้จากเมล็ดของผลไม้ และถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

- ดูดซับสี

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นการเผาถ่านประเภทที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากเกลบ ถ่านจากหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล

- ดูดซับโลหะ

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวแยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน แพลตทินัมจากแร่

คาร์บอนกัมมันต์ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวให้มากที่สุด โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ ความพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจากการกระตุ้นทางเคมีหรือการกระตุ้นทางกายภาพทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึกเพิ่มขึ้น มีพื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้น ซึ่งจะสามารถดูดซับกลิ่นและสีได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ธรรมดา

2.4 การดูดซับ [8]

การดูดซับเป็นขบวนการแยกสารประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนสารที่อยู่ในสถานะของของไหล (Fluid phase) เคลื่อนที่เข้าสู่ผิวของของแข็งที่เป็นสารดูดซับ (Adsorbent) โดยทั่วไปแล้วจะทำการบรรจุสารดูดซับไว้ในเบดนิ่ง (Fixed bed) แล้วจึงป้อนสารที่เป็นของไหลไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง จนกว่าสารดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวหรือได้สารที่ต้องการแยกตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วสารดูดซับที่ใช้จะเป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนสูง ซึ่งจะเกิดกระบวนการดูดซับในขั้นตอนแรกที่ผิวของผนังหรือบนรูพรุนที่มีลักษณะจำเพาะต่อการดูดซับ กระบวนการแยกสารนั้นเกิดขึ้นได้เมื่อมีความแตกต่างของน้ำหนักรวมของสาร ความเป็นขั้วของสาร ลักษณะรูปร่างของสารที่นำมาดูดซับ เป็นต้น จุดประสงค์ที่สำคัญในการศึกษากระบวนการดูดซับ คือ เพื่อหาความสามารถในการดูดซับสารที่ต้องการต่อน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ (Adsorption capacity) และเวลาที่สารดูดซับนั้นจะถึงจุดอิ่มตัว การหาความสามารถในการดูดซับสารต่อน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้เป็นวัตถุประสงค์สำคัญที่ใช้ในการอธิบายในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยพิจารณาเป็นสองกรณี คือ 1. อัตราเร็วในการเปลี่ยนสารดูดซับ 2. ขนาดของเครื่องและชนิดของอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ ซึ่งการหาความสามารถในการดูดซับนั้นโดยทั่วไปจะต้องทดลองในห้องปฏิบัติการหรือจำเป็นต้องจำลองหน่วยปฏิบัติงานในโรงงานมาใช้ในการทดสอบ

2.4.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้ แรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างสารดูดซับและสารที่ต้องการดูดเป็นแรงที่เกิดขึ้นมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลชนิดอ่อน เช่น แรงลอนดอนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของแรงไดโพล-ไดโพล เป็นต้น

ลักษณะการเกาะจับด้วยแรงทางกายภาพเกิดจากผล 3 ประการ คือ

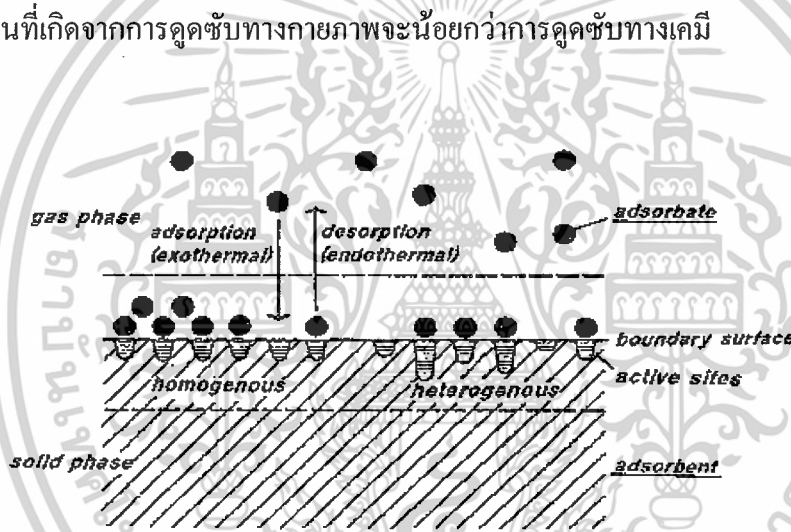
1. เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและสารดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่
2. เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว สามารถเปลี่ยนเป็นไดโพล โมเลกุลได้ ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มาอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะแบบเดียวกันเข้ามาจะเกิดแรงดึงดูดกัน แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงอ่อนๆ ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของสารดูดซับและตัวถูกดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลที่ไม่มีขั้วทั้งคู่
3. เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงกันข้าม แล้วเกิดการดึงดูดกัน ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลของสารดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว

2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารดูดซับและสารที่ต้องการดูดซับ หรือเกิดพันธะทางเคมีของตัวถูกดูดซับกับสารที่ต้องการดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยา การเกาะของสารที่ต้องการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับจะคล้ายกับแรงที่ใช้ยึดเหนี่ยวกันระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล การดูดซับทางเคมีบางครั้งต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วย

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่มีการถ่ายเทหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน สามารถผันกลับได้ในสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน แต่การดูดซับทางเคมีจะผันกลับไม่ได้
2. การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป บนพื้นผิวสารดูดซับที่ไม่มีบริเวณจำเพาะ ในการเกิดกระบวนการดูดซับภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้นได้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น และโดยทั่วไปการดูดซับทางเคมีจะเกิดแบบชั้นเดียวเท่านั้น
3. ความร้อนที่เกิดจากการดูดซับทางกายภาพจะน้อยกว่าการดูดซับทางเคมี



รูปที่ 2.4 กลไกการดูดซับและคายซับ [9]

2.4.2 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms)

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ และความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สถานะสมดุล ณ ที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือไปเขียนกราฟ กับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับจะได้ไอโซเทอมของการดูดซับซึ่งสามารถนำไปใช้หาความสามารถของสารดูดซับในการดูดซับสารและสามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของสารดูดซับชนิดต่างๆ ได้

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 กลุ่มดังนี้

ชนิดที่ 1. Langmuir ได้มาจาก Langmuir equation isotherm รูปร่างของไอโซเทอมแบบนี้จะพบมากในสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อยมาก เช่น คาร์บอนกัมมันต์ ซิลิกาเจล และซีโอไลต์ การดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว

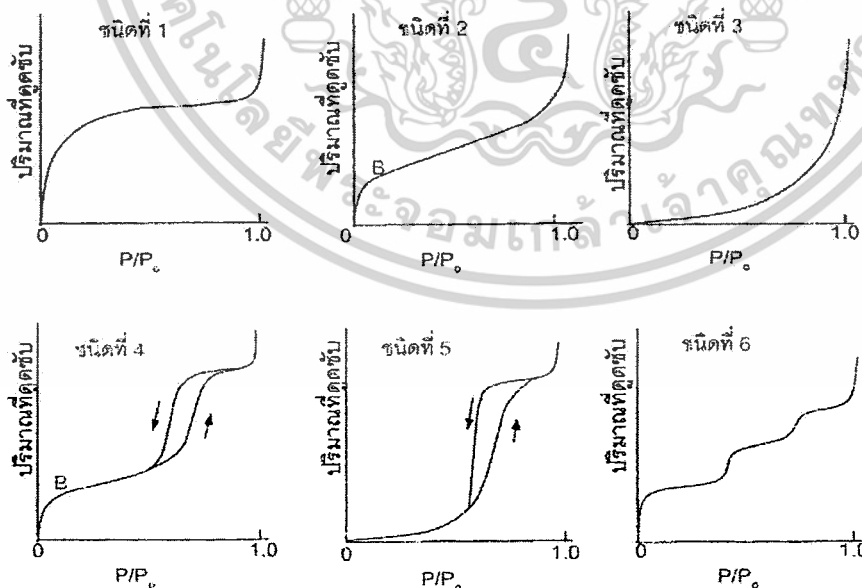
ชนิดที่ 2. Sigmoid หรือ S-shaped isotherm จะพบในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ ที่จุด B จะเป็นตำแหน่งที่มีการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์และเริ่มมีการดูดซับแบบหลายชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ชนิดที่ 3. Convex isotherm ที่ไม่มีจุด B จะเป็นแบบที่พบได้ยาก เกิดขึ้นในกรณีที่มีการดูดซับระหว่างสารดูดซับและตัวถูกดูดซับมีแรงดึงดูดที่อ่อน ทำให้สารที่ต้องการดูดซับไม่เปียกบนผิวของสารดูดซับ เช่น ใช้น้ำมันแกรไฟต์

ชนิดที่ 4. มีลักษณะเหมือนกับแบบ Sigmoid isotherm จะพบในสารดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 2 - 50 นาโนเมตร ที่ค่า P/P_0 ต่ำ ลักษณะของเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับแบบ Sigmoid เมื่อค่า P/P_0 มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะเกิด Capillary condensation ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิด Hysteresis effect ขึ้น ไอโซเทอมชนิดนี้จะพบกับตัวเร่งปฏิกิริยาในทางอุตสาหกรรม

ชนิดที่ 5. เหมือนกับแบบ Convex isotherm แต่จะเกิด Capillary condensation ที่ P/P_0 สูงๆ ไอโซเทอมชนิดนี้พบได้ยาก

ชนิดที่ 6. มีลักษณะเหมือนขั้นบันได (stepped isotherm) ซึ่งพบได้ไม่บ่อยนัก เกิดจากการดูดซับที่ละชั้นบนผิวหน้าที่มีหลายชั้นและความเป็นระเบียบสูง ความชันของเส้นกราฟจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมของการดูดซับตามการจำแนกของ IUPAC [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

2.4.3.1 พื้นที่ผิวและ โครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่ง ที่มีผลต่อความสามารถของสารดูดซับในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของสารดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้เพียงอย่างเดียว โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

2.4.3.2 ขนาดของสารดูดซับ

ถ้าสารดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดเล็กลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของสารดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

2.4.3.3 ความสามารถในการละลาย

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย มักสามารถเกาะติดบนผิวของสารดูดซับได้ดี

2.4.3.4 น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้น การดูดซับจะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักของโมเลกุลจะเป็นผลให้ความสามารถในการละลายลดลง แต่ในทางกลับกัน ถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่มากเกินไปจะแพร่เข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับได้ ก็จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

2.4.3.5 ความมีขั้วของโมเลกุล

ในกรณีที่สารดูดซับเป็นสารที่ไม่มีขั้ว ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อตัวถูกดูดซับมีสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

2.4.3.6 ผลของอุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ถ้ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง เนื่องจากค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ Arrhenius ดังสมการที่ (1)

$$k = k_0 e^{-Ea/RT} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เมโซพอร์สคาร์บอน [10]

การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนจะมีกระบวนการหลัก 3 ขั้นตอนในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ ขั้นตอนแรกมีความเกี่ยวข้องกับการกระบวนการผสมสารและเตรียมสารละลาย การเกิดเจล และการบ่มเจล ในขั้นตอนที่สองจะมีความเกี่ยวข้องกับการทำให้แห้ง (Drying) ส่วนขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการทำให้เจนนั่นกลายเป็นสารประกอบคาร์บอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนนี้ก็จะมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของคาร์บอนเจลที่เกิดขึ้น อย่างเช่น ในขั้นตอนแรก ปัจจัยที่ส่งผลกระทบ คือ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น ความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย เป็นต้น ส่วนปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบในขั้นตอนที่สองคือ รูปแบบหรือวิธีการทำให้แห้ง และผลต่างของแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นของตัวทำละลายก่อนและหลังจากกระบวนการทำให้แห้ง และขั้นตอนกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และกระบวนการกระตุ้น (Activation) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานะต่างๆ ที่ใช้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและลักษณะจำเพาะต่างๆ ของเจล สมบัติที่สำคัญในการใช้งานคือ มีความพรุนสูง (>80%) มีพื้นที่ผิวสูง ($400-1200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) และมีปริมาตรของรูพรุนสูง ซึ่งสมบัติเหล่านี้ก็จะขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการสังเคราะห์

2.5.1 การสังเคราะห์และสมบัติของเมโซพอร์สคาร์บอน

เมโซพอร์สคาร์บอนได้สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อให้มีสมบัติเฉพาะ โดยอาศัยอัตราส่วนของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกัน สามารถสรุปหลักการสังเคราะห์ได้ดังนี้ คือ รีซอร์ซินอล (Resorcinol:R) และ ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde:F) จะถูกผสมในอัตราส่วน โดยโมลที่เหมาะสมในสถานะที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนใหญ่จะใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีน้อยกรณีที่กระทำในสถานะที่เป็นกรด จากนั้นสารที่นำมาผสมกันจะถูกทำให้ร้อนขึ้น และปล่อยให้ระยะเวลาผ่านไประยะหนึ่งเพื่อให้สารนั้นเกิดโครงร่างตาข่ายที่เสถียร หลังจากนั้นเจลที่เกิดขึ้นจะถูกนำมาล้างหรือไม่ต้องล้างก็ได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่เหมาะสม เพื่อทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายที่เป็นน้ำออกไป จากนั้นเจลที่เปียกจะถูกทำให้กลายเป็นเจลที่แห้งโดยอาจใช้วิธี

1. การทำให้แห้งแบบซูเปอร์คริติคอลล (Supercritical drying) เป็นวิธีการทำให้แห้งที่ภาวะเหนือวิกฤตซึ่งเจลที่เกิดขึ้นจะเรียกว่าแอโรเจล (Aerogel)
2. การทำให้แห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying) เป็นวิธีการทำให้แห้งทำให้ตัวทำละลายมีอุณหภูมิถึงจุดเยือกแข็งแล้วลดความดันลงจนเกิดการระเหิดของตัวทำละลายออกไปจะเรียกเจลที่เกิดขึ้นว่าไครโอเจล (Cryogel)
3. การทำให้แห้งแบบซับคริติคอลล (Subcritical drying) เช่น การอบแห้ง (Evaporative drying) การทำให้แห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave drying) การทำให้แห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) จะเรียกเจลที่เกิดขึ้นว่าซีโรเจล (Xerogel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเจลแห้งแล้ว ก็จะนำมาเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน โดยเป็นการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ และสุดท้ายคือการกระตุ้น เพื่อเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวให้มากยิ่งขึ้น

2.5.2 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์

รีซอร์ซินอล หรือ 1,3-dihydroxylbenzene มีสูตรโมเลกุลเป็น $C_6H_4(OH)_2$ เป็นสารประกอบฟีนอล ซึ่งเหมาะกับการเติมฟอร์มัลดีไฮด์ (CH_2O) ในตำแหน่งที่ 2,4 และ 6 ลงในวงของอะโรมาติกส์

ฟอร์มัลดีไฮด์หรือเมทานอลมีสูตรโมเลกุลเป็น CH_2O ความหลากหลายของอัตราส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะมีผลต่อคุณสมบัติของเจล เช่น ถ้าใช้ปริมาณของฟอร์มัลดีไฮด์ สูงจะส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง ซึ่งจะทำให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น และเจลที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ

ตัวทำละลายที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำกลั่น หรือน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized water) หรือ อาจจะเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซิโตน เมทานอล เอทานอล นอร์มอล โพรพานอล เป็นต้น

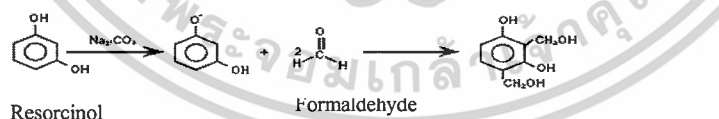
ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ โซเดียมคาร์บอเนตมีสูตรโมเลกุลคือ Na_2CO_3 มีสมบัติเป็นเบสอ่อน

เจลที่เกิดขึ้นจากการใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จะถูกเรียกว่า ไฮโดรเจล (Hydrogels) หรือ เอควเจล (Aquagels) และเจลที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์จะเรียกว่า ไลโอเจล (Lyogels) รวมไปถึง แอลโคเจล (Alcogels) ซึ่งใช้ตัวทำละลายประเภทแอลกอฮอล์

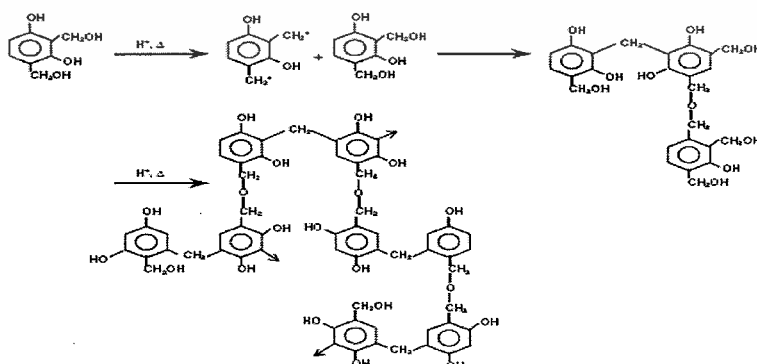
2.5.3 กระบวนการเกิดเจลและการบ่ม

ปัจจัยหลักในขั้นตอนการเกิดเจล คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาแบบดูดพลังงาน (Endothermic reaction) และปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ภายใต้การควบคุมสภาวะต่างๆ เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์

ปฏิกิริยาหลักระหว่าง รีซอร์ซินอล กับ ฟอร์มัลดีไฮด์ คือ ปฏิกิริยาการเติม (Addition reaction) และ ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเติม (Addition reaction) [10]



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation reaction) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซเดียมคาร์บอเนตมีความสำคัญเป็นอย่างมากในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการเติมของริซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่น และปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยมีโมเลกุลของน้ำหลุดออกมา จนเกิดเป็นตะกอนของคอลลอยด์ และตกตะกอนรวมตัวกันเป็นโครงร่างของพอลิเมอร์

เมื่อเกิดเจลขึ้นแล้วเราจะต้องนำมาบ่มเพื่อทำให้เกิด โครงสร้างตาข่ายที่สมบูรณ์ โดยการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่มประมาณ 1 สัปดาห์ แต่ถ้าระยะเวลาบ่มมากกว่านี้ก็จะเป็นการแน่ใจได้ว่า ปฏิกิริยาการเกิด โครงสร้างตาข่ายเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

2.5.4 การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

ก่อนการนำเจลที่ได้จากการสังเคราะห์ไปทำให้แห้งนั้นการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยลดแรงคาปิลลารี (Capillary force) หรือแรงตึงผิวที่จะเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการทำให้แห้งได้ โดยเฉพาะในการทำให้แห้งแบบสับคริติคอลที่จะเกิดเฟสระหว่างแก๊สกับของเหลวส่งผลให้เกิดแรงคาปิลลารีทำให้โครงสร้างของเจลหลังจากการทำแห้งเปลี่ยนไปจากก่อนการทำให้แห้ง การแลกเปลี่ยนตัวทำละลายทำได้โดยการเลือกตัวทำละลายอื่นที่มีค่าแรงตึงผิวที่มีค่าน้อยกว่าตัวทำละลายที่อยู่ในรูพรุนของเจล ตัวทำละลายที่นิยมใช้ได้แก่ เทอร์โทริบิวทานอล อะซิโตน และ โทลูอิน เป็นต้น

2.5.5 ไฟโรไลซิส

เป็นกระบวนการเปลี่ยนเจลให้เป็นคาร์บอนบริสุทธิ์ โดยการกำจัดสารประเภทออกไซด์และกลุ่มไฮโดรเจนต่างๆ ที่อยู่ในเจลออกไป ณ ที่อุณหภูมิสูง เจลที่ผ่านการทำไฟโรไลซิสจะเรียกว่า คาร์บอนเจล เช่น เจลที่สังเคราะห์จากริซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ เมื่อผ่านการทำไฟโรไลซิสจะเรียกว่า ริซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์คาร์บอนเจล โดยส่วนใหญ่การทำไฟโรไลซิสนั้นจะให้เตาเผา โดยขั้นตอนแรกจะให้แก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน อาร์กอน หรือ ฮีเลียมผ่านในเตาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อไล่อากาศออกจากเตาเผา หลังจากนั้นจะเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 600-2100 องศาเซลเซียส โดยจะสามารถตั้งอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธีรเจต บุญพวง [11] ศึกษาการหาถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสาร PNA โดยทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิด A และ ชนิด B สำหรับกำจัดสาร PNA และยังวิเคราะห์หาผลของโครงสร้างของรูพรุนในถ่านกัมมันต์ที่มีต่อความจุของการดูดซับ การศึกษาจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาโครงสร้างรูพรุนในถ่านกัมมันต์ และการทดลองเพื่อหากราฟ breakthrough ในส่วนแรกเป็นการหาปริมาตรและพื้นที่ของรูพรุนขนส่งและรูพรุนดูดซับด้วยเครื่อง Mercury-intrusion porosimeter และเครื่อง Autosorb I นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบ ภาพลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถ่ายจากเครื่อง SEM ส่วนที่สองเป็นการทดลองที่สภาวะปฏิบัติการหนึ่งเพื่อให้ได้กราฟ breakthrough

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

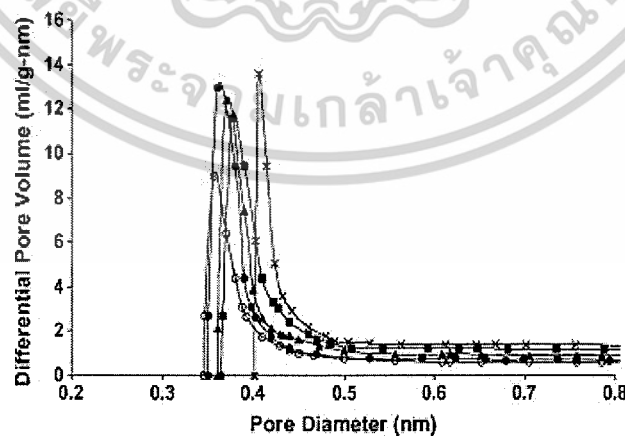
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง 1041110 หรือทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่อง fluorescence spectrometer จะนำมาใช้หาค่าความเข้มข้นของ PNA เพื่อนำมาวาดกราฟ breakthrough โดยเทียบกับเวลาที่ทำการทดลอง จากผลที่ได้พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิด A ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด PNA สูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิด B เพราะให้กราฟที่มีความยาวของช่วงที่มีการถ่ายเทมวลสั้นกว่า และมีความจุของการดูดซับที่สูงกว่า ที่ความเข้มข้น PNA ในน้ำมันขาออกเป็น 15 ส่วนในล้านส่วนและที่ ปริมาณของน้ำมันขาเข้าเท่ากัน ผลที่ได้ยืนยันยืนยันการศึกษาโครงสร้างของรูพรุนที่ว่าถ่านกัมมันต์ชนิด A มีรูพรุนขนส่งและรูพรุนดูดซับมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิด B ดังแสดงในรูป 2.8

Properties	Type A	Type B
Total intrusion volume (ml/g)	3.27(Base 1)	Base 1
Total pore area (m ² /g)	2.26(Base 2)	Base 2
Average pore diameter (μm)	1.45(Base 3)	Base 3
Porosity (%)	2.01(Base 4)	Base 4

รูปที่ 2.8 สมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ชนิด A และ ชนิด B ที่ใช้ในการทดลอง

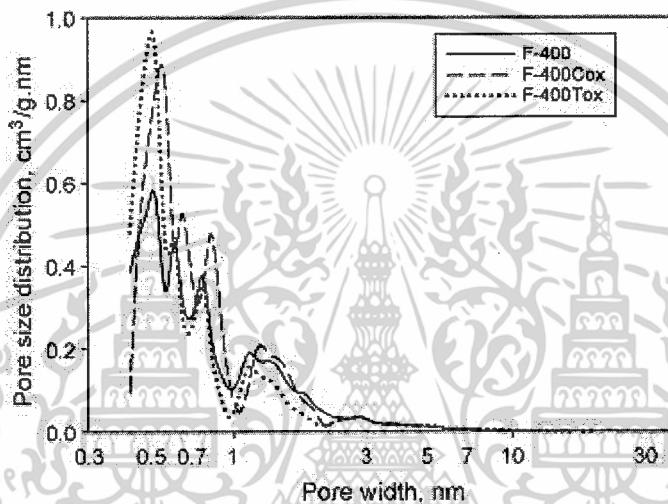
Ahamd M.A. และคณะ [12] ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์โดยใช้ผลผลิตที่ได้จากต้นปาล์ม และนำมาเผาให้เป็นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นมา กระตุ้นด้วยไอน้ำภายใต้สภาวะบรรยากาศ ผลจากการทดลองสามารถทำให้ทราบได้ว่า เมื่อนำคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้จากต้นปาล์มนั้น ไปทดสอบการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อวิเคราะห์ลักษณะของคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้ พบว่าขนาดของรูพรุนที่ผลิตได้นั้น โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดของรูพรุนระดับไมโครพอร์ อยู่ในช่วงประมาณ 0.3 -0.4 นาโนเมตร ดังแสดงในรูป 2.9



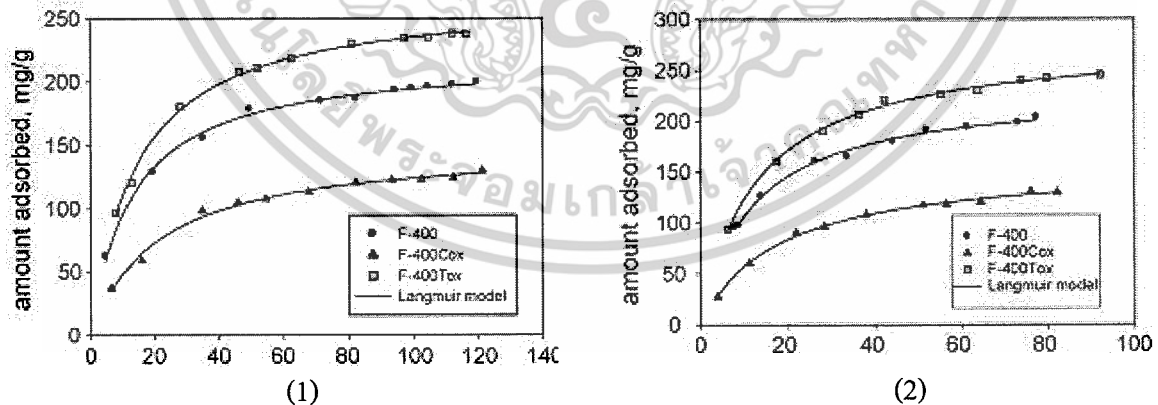
รูปที่ 2.9 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากปาล์ม [12]

Wibowo N. และคณะ [13] ศึกษาการดูดซับเบนซีนและโทลูอีนด้วยการนำคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตมาจากถ่านหิน ชนิด F400 ที่มีขายอยู่ในเชิงการค้า มาปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 12 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Molar หลังจากนั้นนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 800 องศาเซลเซียสแล้วจะต้องรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ที่ 800 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และทำการลดอุณหภูมิโดยการใช้อากาศไนโตรเจนไหลผ่านคาร์บอนกัมมันต์จนอุณหภูมิลดถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาดูดซับสารละลายเบนซีนและโทลูอีน โดยใช้เครื่องมือ UV-visible spectrophotometer ในการหาความสามารถในการดูดซับ และทำการวิเคราะห์ขนาดของรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุนและพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ พบว่าเมื่อคาร์บอนกัมมันต์ชนิดถ่านหิน F400 เมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไนตริกและการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนแล้วจะทำให้มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนต่ำ พื้นที่ผิวสัมผัสสูงขึ้นและมีปริมาตรของรูพรุนที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.10 การกระจายตัวของขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ F400 [13]

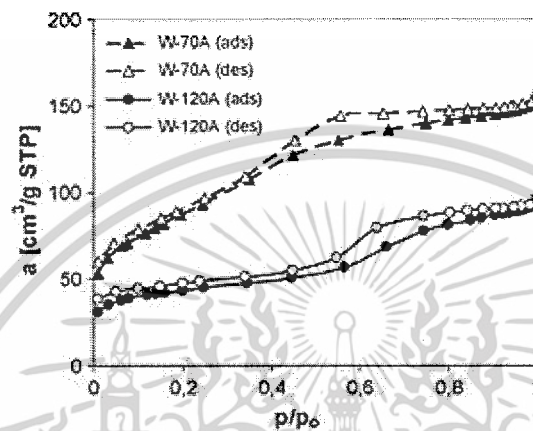


รูปที่ 2.11 (1) ไอโซเทอมการดูดซับของเบนซีน

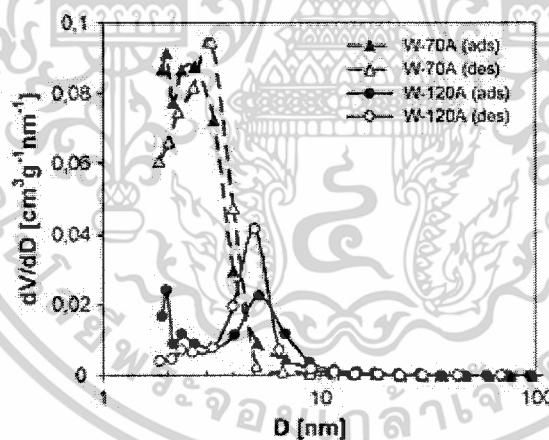
(2) ไอโซเทอมการดูดซับของโทลูอีน [13]

Marczewski W.Adam [14] ศึกษาการดูดซับไนโตรเบนซีน 4-ไนโตรเบนซีนและ4-คลอโรฟีนอลในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีสถานะเป็นกรด โดยใช้เมโซพอร์รัสคาร์บอน 2 ชนิด และทำการศึกษาสมบัติและวิเคราะห์สมบัติของเมโซพอร์รัสคาร์บอนด้วยวิธีการดูดซับด้วยไนโตรเจน ซึ่งการดูดซับสารจำพวกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบอินทรีย์หรือสารจำพวกโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่นั้น การใช้คาร์บอนกัมมันต์ชนิดที่มีขนาดของรูพรุนที่มีขนาดเล็กอาจใช้ได้ดีพอ เนื่องจากโมเลกุลของสารที่จะทำการดูดซับมีขนาดโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถที่จะดูดซับเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ โดยทำการทดลองดูดซับสารเหล่านั้นด้วยเมโซพอร์รัสคาร์บอน 2 ชนิด นำสารละลายตัวอย่างที่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้นผสมรวมกับเมโซพอร์รัสคาร์บอนแล้วนำไปเขย่าในเครื่องเขย่า ที่ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการดูดซับแล้วไปคำนวณหาความเข้มข้นที่เหลือด้วยเครื่องมือวิเคราะห์



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับของแก๊สไนโตรเจน [14]



รูปที่ 2.13 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของเมโซพอร์รัสคาร์บอน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ขวดแก้วมีฝาปิด
2. เครื่องชั่งละเอียด 5 ตำแหน่ง
3. ปีกเกอร์ (Beakers) 500 ml
4. ช้อนตักสาร (Spatula)
5. หลอดหยด (Dropper)
6. แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
7. นาฬิกาจับเวลา
8. เครื่องทำให้แห้งแบบสูญญากาศ
9. เครื่องไพโรไลซิส
10. ตู้อบ (Oven)
11. เครื่องเขย่าชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Shaker)
12. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence spectrometry)
13. เครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน (Micromeritics, ASAP 2020, Surface area and porosity analyzer)

3.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้

1. รีซอร์ซินอล ความบริสุทธิ์ $\geq 99.0\%$
2. โซเดียมคาร์บอเนต ความบริสุทธิ์ 99.8%
3. พอร์มัลดีไฮด์ ความเข้มข้น 37.0%
4. เทอเทียรีบิวทานอล ความเข้มข้น $\geq 99.0\%$
5. น้ำกลั่น
6. แก๊สไนโตรเจน
7. น้ำมันที่ได้จากส่วนต่างๆของหน่วยแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม
8. AC1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนโดยวิธีการโซลเจล

1. ขั้นตอนการเตรียมเมโซพอร์สคาร์บอนซึ่งจะทำการเตรียมที่อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นด้วยอัตราส่วนต่างๆ กัน 4 สภาวะ ได้แก่ RF1 RF2 RF3 และ RF4

ตัวอย่างการเตรียมเมโซพอร์สคาร์บอน

1.1 เตรียมเมโซพอร์สคาร์บอนโดยซังรีซอร์ซินอล และ โซเดียมคาร์บอเนต ผสมกันในสภาพที่เป็นผงในบีกเกอร์แล้วเติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ คนให้ละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมฟอร์มัลดีไฮด์ลงไป คนให้ละลายเข้ากันอีกครั้ง

1.2 เทสารละลายที่เตรียมไว้ในข้อ 1.1 ลงในขวดแก้วทรงกระบอกที่มีฝาปิดมิดชิด

1.3 วางสารละลายในข้อ 1.2 ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการแข็งตัว แล้วจึงนำเข้าตู้อบ

1.4 นำเจลในข้อ 1.3 ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วแลกเปลี่ยนตัวทำละลายด้วยเทอเทียรีบิวทานอล

2. นำเจลที่ผ่านการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายแล้วมาทำให้แห้งโดยวิธีการทำให้แห้งแบบสุญญากาศ

3. นำเจลที่ผ่านการทำให้แห้งแล้ว มาเผาในเตาเผาแบบอับอากาศ (pyrolysis)

3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ (Adsorption performance) แบบกะ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ซังน้ำมัน ใส่ในขวดแก้วที่มีฝาปิดมิดชิด

2. ซังสารดูดซับแต่ละชนิด

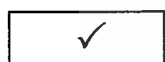
3. เขียนระบุลำดับที่ของขวดเพื่อใช้เป็นลำดับที่ในการเก็บสารตัวอย่าง

4. นำสารดูดซับแต่ละชนิดจากข้อที่ 2 ใส่ในขวดแก้วที่เตรียมจากข้อที่ 1 ตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 แล้วนำขวดน้ำมันทั้งหมดเข้าเครื่องเขย่าชนิดควบคุมอุณหภูมิ

5. เก็บตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการดูดซับแล้ว ตามเวลาที่แสดงในตารางที่ 3.1 ไปวิเคราะห์ปริมาณ HPNA ที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องเอ็กสเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

ตารางที่ 3.1 เวลาดูซ้ำของสารที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพของสารดูซ้ำ

เวลาที่ใช้ในการดูซ้ำ	ชนิดของสารดูซ้ำคาร์บอน				
	RF1	RF2	RF3	RF4	AC1
1 ชั่วโมง	✓	✓	✓	-	✓
2 ชั่วโมง	-	-	-	-	✓
4 ชั่วโมง	✓	✓	✓	-	✓
8 ชั่วโมง	-	-	-	-	✓
12 ชั่วโมง	✓	✓	✓	-	-
16 ชั่วโมง	-	-	-	-	✓
24 ชั่วโมง	✓	✓	✓	✓	✓
48 ชั่วโมง	✓	✓	✓	✓	-
72 ชั่วโมง	✓	✓	✓	-	-
96 ชั่วโมง	✓	✓	✓	-	-



ข้อมูลที่สามารถทดลอง



ข้อมูลที่ไม่ได้ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การศึกษาความจุในการดูดซับ (Adsorption capacity) แบบกะ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่งน้ำมัน ใสในขวดแก้วที่มีฝาปิดมิดชิด
2. ชั่งเมโซพอร์สคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดกับสารดูดซับคาร์บอนทางการค้า
3. เขียนระบุลำดับที่ของขวดเพื่อใช้เป็นลำดับที่ในการเก็บสารตัวอย่าง
4. นำสารดูดซับแต่ละชนิดจากข้อที่ 2 ใสในขวดแก้วที่เตรียมจากข้อที่ 1 จากนั้นนำเข้าเครื่องเขย่าชนิดควบคุมอุณหภูมิ
5. เขย่าน้ำมันเป็นเวลา 1 วัน เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วจึงเปลี่ยนน้ำมันที่ดูดซับใหม่ โดยใช้สารดูดซับตัวเดิม เก็บน้ำมันที่ผ่านการดูดซับแล้วตามเวลาที่แสดงในตารางที่ 3.2 ไปวิเคราะห์หาค่าด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

ตารางที่ 3.2 เวลาการดูดซับของสารที่ใช้ในการทดลองหาความจุในการดูดซับ

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง	ชนิดของสารดูดซับคาร์บอน	
	สารดูดซับคาร์บอนทางการค้า	เมโซพอร์สคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด
1 วัน	✓	✓
2 วัน	✓	✓
3 วัน	✓	✓
4 วัน	✓	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

โครงการนี้ได้แบ่งหัวข้อในการศึกษาออกเป็น 2 หัวข้อ คือ

1. การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนเพื่อใช้ในการดูดซับ HPNA
2. การทดสอบการดูดซับ HPNA แบบกะ ด้วยสารดูดซับคาร์บอนชนิดต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับ สามารถแบ่งสารดูดซับคาร์บอนได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ชนิดของสารดูดซับที่นำมาทดสอบการดูดซับ HPNA แบบกะ

สารดูดซับคาร์บอนทางการค้า	เมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น
AC1	RF1
	RF2
	RF3
	RF4

จากนั้นทดสอบการดูดซับโดยออกแบบการทดลองดูดซับ HPNA โดยวิธีแบบกะ ทดลองดูดซับด้วยสารดูดซับคาร์บอนชนิดดังกล่าวตามตารางที่ 4.1 ซึ่งได้ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษา 2 การทดลอง คือ

1. การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับ (Adsorption performance)
2. การทดลองเพื่อหาความจุในการดูดซับ (Adsorption capacity)

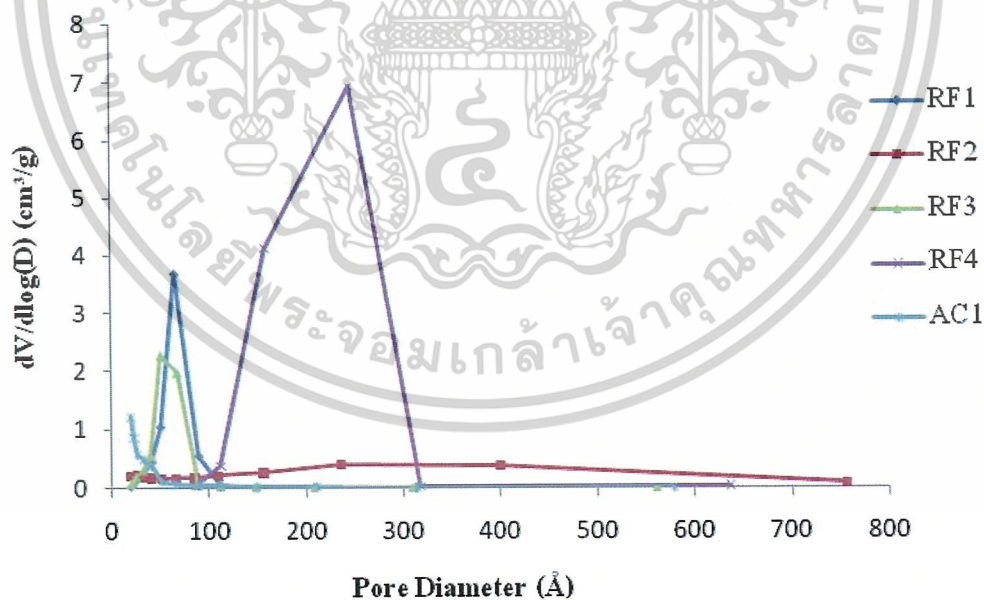
โดยทดลองดูดซับ HPNA ภายในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิคงที่ ณ ความดันบรรยากาศ ใช้ปริมาณน้ำมันและสารดูดซับตามขั้นตอนการทดลองข้อ 3.3.2 เก็บตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการดูดซับแล้ว ไปวิเคราะห์หาปริมาณ HPNA ที่เหลือ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของสารดูดซับคาร์บอน

จากการศึกษาการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน ด้วยอัตราส่วนต่างๆ กัน เพื่อให้เมโซพอร์สคาร์บอนมีสมบัติทางกายภาพต่างกัน เช่น ปริมาตรของรูพรุน การกระจายตัวขนาดของรูพรุน และขนาดของรูพรุน เป็นต้น จากนั้นนำสารดูดซับคาร์บอน 5 ชนิด ได้แก่ AC1 RF1 RF2 RF3 และ RF4 ไปทดสอบสมบัติของสารดูดซับคาร์บอนด้วยการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 และการกระจายตัวขนาดของรูพรุนแสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของสารดูดซับคาร์บอนด้วยแบบจำลอง BET

ชนิดสารดูดซับคาร์บอน	ปริมาตรเมโซพอร์ (cm ³ /g)	ปริมาตรไมโครพอร์ (cm ³ /g)	พื้นที่ผิว Single point (m ² /g)	D _{peak} (Å)
AC1	0.30	0.17	876.75	19
RF1	0.80	0.16	710.33	64
RF2	0.41	0.22	625.77	235
RF3	0.64	0.13	628.43	50
RF4	1.50	0.13	515.85	244



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวขนาดรูพรุนของสารดูดซับคาร์บอน AC1 RF1 RF2 RF3 และ RF4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับ (Adsorption performance) แบบกะ

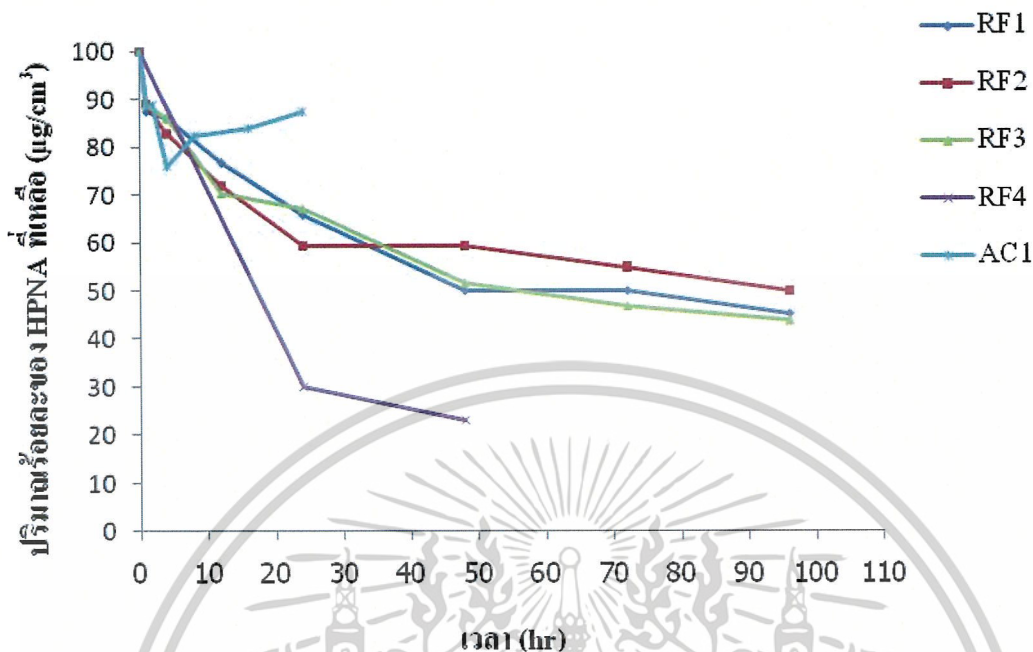
4.2.1 ผลการดูดซับ HPNA

เมื่อนำสารดูดซับคาร์บอนจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ AC1 RF1 RF2 RF3 และ RF4 มาทดสอบการดูดซับ HPNA โดยทำการทดลองตามข้อ 3.3.2 แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมัน ไปวิเคราะห์หาปริมาณ HPNA โดยคิดเป็นร้อยละของ HPNA ที่เหลือ ซึ่งเปรียบเทียบว่า ปริมาณ HPNA ในน้ำมัน 64 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ คิดเป็น 100% ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และนำข้อมูลจากตารางที่ 4.3 ไปสร้างกราฟปริมาณร้อยละ HPNA ที่เหลือเทียบกับเวลา แสดงได้ดังรูป 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละ HPNA ในน้ำมันหลังการดูดซับด้วยสารดูดซับที่เวลาต่างๆ กัน

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง	ปริมาณร้อยละ HPNA ที่เหลืออยู่ในน้ำมัน				
	ชนิดของสารดูดซับคาร์บอน				
	RF1	RF2	RF3	RF4	AC1
0 ชั่วโมง*	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1 ชั่วโมง	87.50	89.06	89.06	-	88.71
2 ชั่วโมง	-	-	-	-	88.71
4 ชั่วโมง	85.94	82.81	85.94	-	75.81
8 ชั่วโมง	-	-	-	-	82.26
12 ชั่วโมง	76.56	71.88	70.31	-	-
16 ชั่วโมง	-	-	-	-	83.87
24 ชั่วโมง	65.63	59.38	67.19	30.00	87.50
48 ชั่วโมง	50.00	59.38	51.56	23.00	-
72 ชั่วโมง	50.00	54.69	46.88	-	-
96 ชั่วโมง	45.31	50.00	43.75	-	-

*หมายเหตุ ปริมาณ HPNA ในน้ำมันก่อนการดูดซับมีค่าเท่ากับ 64 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$



รูปที่ 4.2 กราฟข้อมูลผลการดูดซับ HPNA ด้วยสารดูดซับคาร์บอน 5 ชนิด ได้แก่ AC1 RF1 RF2 RF3 และ RF4 โดยแสดงเป็นร้อยละปริมาณของสาร HPNA ที่เหลือเทียบกับเวลา

4.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการหาประสิทธิภาพของสารดูดซับคาร์บอน

จากผลการทดสอบสมบัติของสารดูดซับคาร์บอนและการทดลองการดูดซับ HPNA พบว่า

4.2.2.1 จากผลการทดลองดูดซับ HPNA ของสารดูดซับคาร์บอนทางการค้า AC1 เมื่อเปรียบเทียบผลการดูดซับ HPNA กับเมโซพอร์สคาร์บอนดังแสดงในรูป 4.2 พบว่าเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นมามีประสิทธิภาพในการกำจัด HPNA ได้สูงกว่าสารดูดซับทางการค้า อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของปริมาณเมโซพอร์ การกระจายตัวขนาดของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

4.2.2.2 ปริมาณเมโซพอร์ของ AC1 จะมีปริมาณใกล้เคียงกับ RF2 แต่มีการกระจายตัวขนาดของรูพรุนที่ต่างกัน และ RF2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมากกว่า AC1 เมื่อนำผลการทดลองหาประสิทธิภาพของการดูดซับ แล้วพบว่า RF2 มีประสิทธิภาพในการกำจัด HPNA ได้ดีกว่า AC1 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวขนาดของรูพรุนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมีผลต่อการดูดซับ HPNA

4.2.2.3 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเมโซพอร์ RF4 จะมีปริมาณของเมโซพอร์สูง คือ $1.50 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่ คือ 244 \AA ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของ RF4 จะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของ RF2 แต่จะมีการกระจายตัวขนาดของรูพรุนที่ต่างกัน และ RF4 มีปริมาณเมโซพอร์ที่สูงกว่า RF2 เมื่อนำผลการทดลองหาประสิทธิภาพของการดูดซับ แล้วพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RF4 มีประสิทธิภาพในการกำจัด HPNA ได้ดีกว่า RF2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเมโซพอร์และการกระจายตัวของรูพรุนมีผลต่อการดูดซับ HPNA

4.2.2.4 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเมโซพอร์ของ RF1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.80 \text{ cm}^3/\text{g}$ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 64 \AA กับ RF2 ที่มีปริมาณของเมโซพอร์เท่ากับ $0.41 \text{ cm}^3/\text{g}$ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 235 \AA สารดูดซับคาร์บอนทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันทั้งปริมาณของเมโซพอร์และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน แต่ให้ผลการดูดซับ HPNA ที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าทั้งปริมาณของเมโซพอร์และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีผลต่อการดูดซับทั้งคู่ ซึ่งการกำจัด HPNA ที่ดี ต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและมีปริมาณของเมโซพอร์ที่เหมาะสม

4.3 ผลการทดลองเพื่อหาความจุในการดูดซับ (Adsorption capacity) แบบกะ

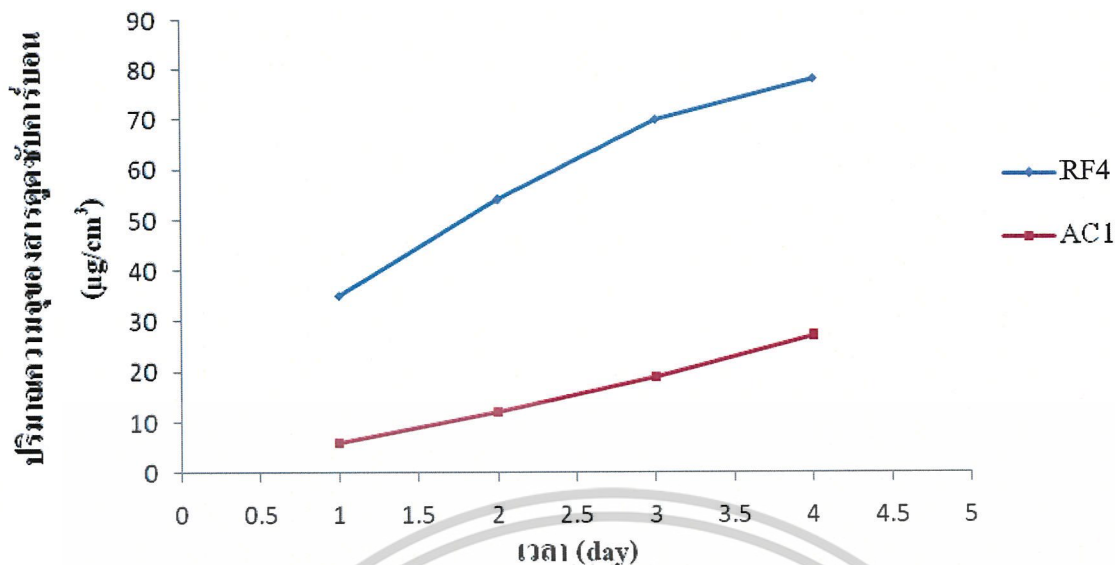
4.3.1 ผลการดูดซับ HPNA

จากการศึกษาการหาประสิทธิภาพของการดูดซับพบว่าคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าคือ AC1 ที่นำมาทดสอบและเมโซพอร์สคาร์บอน RF4 เป็นตัวที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัด HPNA ของสารดูดซับคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น นำมาศึกษาเพิ่มเติมโดยทำการทดสอบหาความจุในการดูดซับ โดยทำการทดลองตามข้อ 3.3.3 แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการดูดซับตามตารางที่ 3.4 ไปวิเคราะห์หาปริมาณ HPNA ที่เหลือด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร คำนวณออกมาเป็นปริมาณความจุของสารดูดซับคาร์บอน แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความจุในการดูดซับ HPNA ของสารดูดซับคาร์บอน

ระยะเวลาที่ดูดซับ	ปริมาณความจุของสารดูดซับคาร์บอน ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)	
	ชนิดของสารดูดซับคาร์บอน	
	AC1	RF4
1 วัน	6	35
2 วัน	12	45
3 วัน	19	70
4 วัน	27	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟปริมาณความจุของสารดูดซับคาร์บอน 2 ชนิด ได้แก่ AC1 และ RF4 โดยแสดงปริมาณความจุของสารดูดซับคาร์บอนเทียบกับเวลา

4.3.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการหาความจุในการดูดซับของสารดูดซับคาร์บอน

จากตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ HPNA ที่เหลือจากการดูดซับของตัวดูดซับ 2 ชนิด ได้แก่ AC1 และ RF4 และจากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงปริมาณความจุของสารดูดซับคาร์บอน พบว่า RF4 ซึ่งเป็นสารดูดซับคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากกรีซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์มีความจุในการดูดซับมากกว่า AC1 ที่เป็นสารดูดซับทางการค้า

จากผลการวิเคราะห์สมบัติของสารดูดซับคาร์บอนด้วยแบบจำลอง BET ในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการที่ AC1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 19 Å ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า RF4 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 244 Å ประมาณ 12.8 เท่า และมีปริมาตรของเมโซพอร์ที่ต่ำกว่า RF4 ถึง 5 เท่า จึงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ HPNA ที่มีขนาดของโมเลกุลใหญ่ แม้ว่า AC1 จะมีพื้นที่ผิวมากกว่า RF4 ก็ตาม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า HPNA ไม่สามารถที่จะแพร่เข้าไปในรูพรุนของ AC1 ได้ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับ HPNA ได้น้อย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 จากการทดสอบการดูดซับ HPNA ด้วยสารดูดซับคาร์บอนชนิดต่างๆ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับให้คงที่ และควบคุมน้ำหนักของสารดูดซับต่อน้ำหนักของน้ำมันที่ใช้ดูดซับ จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณของ HPNA ที่เหลืออยู่ในน้ำมันที่ผ่านการดูดซับแล้วด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และทดสอบสมบัติของสารดูดซับด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน โดยอาศัยแบบจำลองของ บีอีที (BET) แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับ HPNA ได้แก่ การกระจายตัวของรูพรุน ปริมาตรเมโซพอร์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

5.1.2 RF4 สารดูดซับคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นจากกรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ซึ่งมีปริมาตรเมโซพอร์สูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนขนาดใหญ่ จะสามารถกำจัด HPNA ในน้ำมันจากหน่วยแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมได้ประมาณ 77 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่าสารดูดซับคาร์บอนทางการค้า 6.2 เท่า อีกทั้งมีความจุในการดูดซับ HPNA มากกว่า สารดูดซับคาร์บอนทางการค้าถึง 2.9 เท่า

5.1.3 การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนจากกรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม จะทำให้ได้สารดูดซับคาร์บอนที่มีปริมาตรเมโซพอร์สูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่และการกระจายตัวขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมต่อการกำจัด HPNA

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 โครงการนี้ได้ศึกษาการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนจากกรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้ในการทดสอบมีเพียง 4 อัตราส่วน โดยโมลของสารตั้งต้น ซึ่งอาจยังไม่สามารถได้เมโซพอร์สคาร์บอนที่ดีที่สุดในการดูดซับ HPNA ดังนั้นควรศึกษาการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนจากกรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ที่อัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นอื่นๆ เพื่อให้ได้เมโซพอร์สคาร์บอนที่เหมาะสมในการกำจัด HPNA

5.2.2 การทดสอบการดูดซับ HPNA ที่ใช้ในโครงการนี้เป็น การทดสอบแบบกะ เพื่อดูประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับคาร์บอนชนิดต่างๆ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการปรับปรุงและพัฒนาเป็นสารดูดซับที่ใช้ในการทดสอบการดูดซับแบบต่อเนื่องในอนาคต

5.2.3 ถ้าต้องการที่จะศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการดูดซับ จะต้องสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนที่มีสมบัติอื่นๆ คงที่และปัจจัยที่ต้องการศึกษาจะต้องเปลี่ยนแปลง จากนั้นนำไปทดสอบการดูดซับ HPNA ที่สถานะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Adrian Gruia J. and Bluff Lake. **PROCESS FOR REFRACTORY COMPOUND CONVERSION IN A HYDROCRACKER RECYCLE LIQUID**. United State Patent. Patent number 5,007,998. 1991.
- [2] ปราโมทย์ ไชยเวช. **ปิโตรเลียมเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548.
- [3] วิกีพีเดีย. **โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน**. [Online]. Available : http://th.wikipedia.org/wiki/โพลีไซคลิก_อะโรมาติก_ไฮโดรคาร์บอน. 2552.
- [4] วิกีพีเดีย. **“ Polycyclic aromatic hydrocarbon ”**. [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Polycyclic_aromatic_hydrocarbon. 2009.
- [5] กระทรวงอุตสาหกรรม. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำมัน**. กรุงเทพมหานคร. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2532.
- [6] Gregg S.J. and Sing K.S.W.. **Adsorption Surface Area and Porosity**. 2nd ed. New York. Academic Press. Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich Publishers. 1982. pp. 4,25.
- [7] กมลชนก ปานสง่า ธนิษฐา ประสิทธิ์วุฒิสักดิ์ และธนัชนันท์ บุรกรรม. **การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอน**. ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [8] Fletcher Ashleigh. **“ Porsity and Sorption Behavior ”**. [Online]. Available : <http://www.staff.ncl.ac.uk/a.j.fletcher/adsorption.htm>. 2008.
- [9] Henning K.O. Degel J. **“ Fundamentals of Adsorption and Desorption ”**. [Online]. Available : <http://www.activated-carbon.com/solrec3.html>. 2008.
- [10] Shaheen A. Muhtaseb Al. and Jame Ritter A. **Preparation and Properties of Resorcinol-Formaldehyde Organic and Carbon Gels**. Advance Materials. 16 January. 2003. pp. 101-114.
- [11] Boonphayong Teerachate. **Suitable Activated Carbon for PNA Removal**. A special Research Project for the degree of Master of Engineering. Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering. King Mongkut's institute of Technology Thonburi Bangkok. 1999
- [12] Ahamd M.A. Wan Daud W.M.A. and Aroua M.K.. **Adsorption kinetics of vavious gases in carbon molecular sieves (CMS) produced from palm shell**. Physicochem. Eng.Aspects 312(2008). pp. 131-135.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] Wibowo N. Setyadni L. Wibowo D. and Setiawan J. **Adsorption of benzene and toluene from aqueous solution onto activated carbon and its acid and heat treated forms : Influence of surface chemistry on adsorption.** Journal Hazardous Materials. 146(2007). pp. 237-242.
- [14] Adam Marczewski W. **Kinetics and equilibrium of adsorption of organic solutes on mesoporous carbons.** Applied surface science. 253(2007). pp. 5818-5826.
- [15] ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. “X- ray fluorescence spectrometry”. [Online].
Available : http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRF/GettingStartOf_XRFs.htm. 2008.
- [16] วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. **จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี** : Chemical Kinetics and Reactor Design. กรุงเทพฯ. 2544. หน้า 312-319.
- [17] Particle & Surface Sciences Pty. Limited. “Micromeritics ASAP 2020 Accelerated Surface Area and Porosimetry analyzer”. [Online].
Available : http://www.pss.aus.net/products/micromeritics/equip_surface_area/2010/2020.html. 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

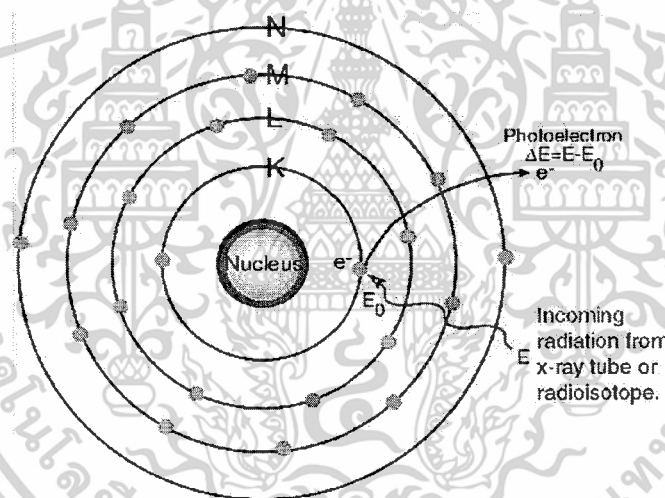
การวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเทคนิค X-ray fluorescence spectrometry (XRF) [15]

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง

ก.2 หลักการและวิธีการวิเคราะห์

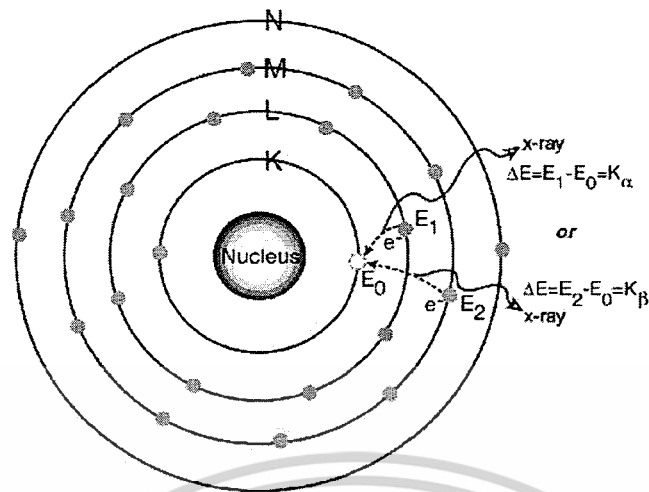
เมื่อรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอกซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ดังแสดงในรูปที่ ก-1



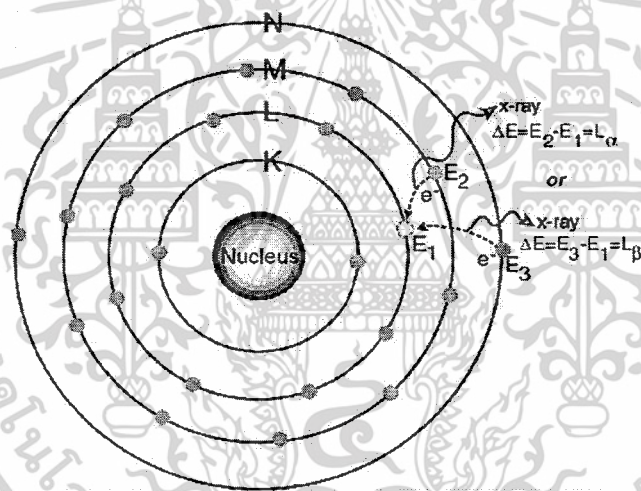
รูปที่ ก-1 รังสีเอกซ์พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดหลุดออก [15]

ที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ดังแสดงในรูปที่ ก-2 และ ก-3 ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ ฟลูออเรสเซนซ์ ” (Fluorescence) พลังงานของรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมาจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



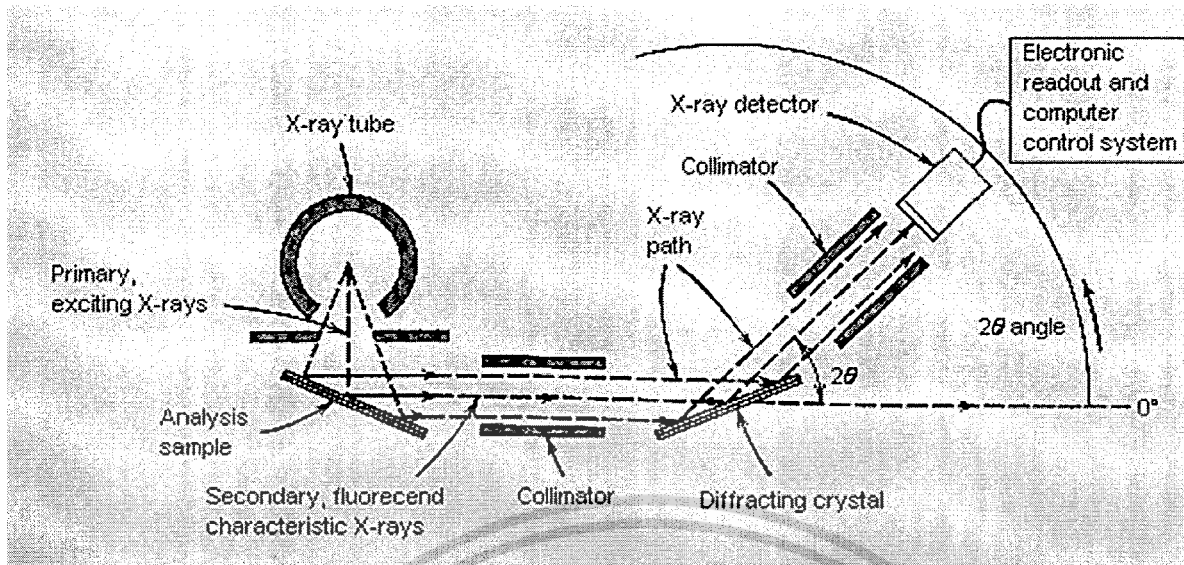
รูปที่ ก-2 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน1 [15]



รูปที่ ก-3 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน2 [15]

รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่าน collimator ในรูปรังสีขนานไปยัง Diffracting crystal ซึ่งมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d) ที่แน่นอน เช่น ควอทซ์ ลิเทียม-ฟลูออไรด์ ไมกา เป็นต้น โดย Diffracting crystal จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบนเข้าสู่เครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์ (X-ray detector) โดยปกติ Diffracting crystal จะทำมุม θ กับระนาบรังสีขนานจาก collimator และทำมุม 2θ กับเครื่องตรวจวัดดังแสดงในรูป ก-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-4 ส่วนประกอบหลักของเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ [15]

การคำนวณหาค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ของรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ จากสารตัวอย่าง จะทำได้โดยแทนค่าในสมการ Bragg's law ดังสมการที่ (2) ค่าความยาวคลื่นที่คำนวณได้จะสามารถชี้บอกได้ว่า รังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ของสารตัวอย่างประกอบด้วยธาตุใดบ้าง เทคนิคการวิเคราะห์นี้ เรียกว่า Wavelength dispersive XRF

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองการวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของการดูดซับของสารดูดซับชนิดต่างๆ

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง	ปริมาณ HPNA ที่เหลืออยู่ในน้ำมัน ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)				
	ชนิดของสารดูดซับคาร์บอน				
	RF1	RF2	RF3	RF4	AC1
0 ชั่วโมง*	64	64	64	64	64
1 ชั่วโมง	56	57	57	-	55
2 ชั่วโมง	-	-	-	-	55
4 ชั่วโมง	55	53	55	-	47
8 ชั่วโมง	-	-	-	-	51
12 ชั่วโมง	49	46	45	-	-
16 ชั่วโมง	-	-	-	-	52
24 ชั่วโมง	42	38	43	19	56
48 ชั่วโมง	32	38	33	15	-
72 ชั่วโมง	32	35	30	-	-
96 ชั่วโมง	29	32	28	-	-

*หมายเหตุ ปริมาณ HPNA ในน้ำมันก่อนการดูดซับมีค่าเท่ากับ $64 \mu\text{g}/\text{cm}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองหาความจุในการดูดซับของสารดูดซับชนิดต่างๆ

เวลาที่เก็บสารตัวอย่าง	ปริมาณความเข้มข้นของ HPNA ที่เหลืออยู่ในน้ำมัน ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)	
	ชนิดของสารดูดซับคาร์บอน	
	AC1	RF4
0 วัน	64	64
1 วัน	58	29
2 วัน	58	45
3 วัน	57	48
4 วัน	56	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การทดสอบสมบัติของสารดูดซับโดยวิธีการดูดซับแก๊สในโครเจน [16]

แบบจำลองบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller Method, BET method)

สำหรับแก๊สที่ดูดซับบนผิวของแข็งแบบ Multi-molecular layer ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ BET จะใช้หลักการดูดซับก๊าซในโครเจนที่จุดเดือดปกติ อุณหภูมิประมาณ 77.5 เคลวิน โดยกรณีนี้วัสดุที่นำมาวัดจะมีรูพรุนเล็ก คือ 10-100 อังสตรอม ซึ่งก๊าซในโครเจนจะปล่อยให้ดูดซับที่ระดับความดันต่างๆ ต่ำกว่า 1 บรรยากาศ จนถึงสถานะสมดุล แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณของก๊าซในโครเจนที่ถูกดูดซับไป ที่ความดันต่างๆ BET isotherm มีรูปแบบของสมการ คือ

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m c} + \frac{(c-1)P}{V_m c P_0} \quad (3)$$

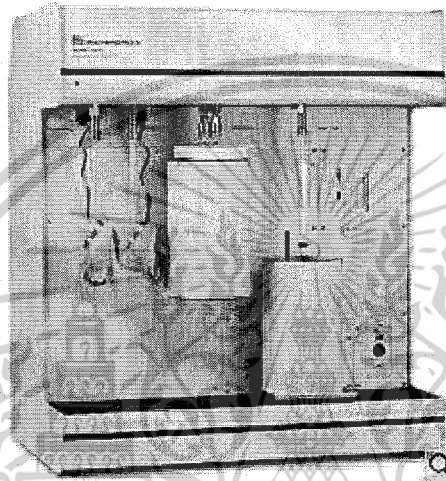
- โดย V คือ ปริมาตรของก๊าซ N₂ ที่ดูดซับบนผิวรูพรุน (cm³)
 V_m คือ ปริมาตรของก๊าซ N₂ ที่ดูดซับบนผิวรูพรุนแบบ โมเลกุลชั้นเดียว (Monomolecule layer) ปกคลุมทั่วผิวรูพรุน (cm³)
 P คือ ความดันที่สถานะใดๆ (mmHg)
 P_s คือ ความดันไอหรือความดันอิ่มตัว (Vapor or saturated vapor) (mmHg)
 c คือ ค่าจำเพาะสำหรับการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด

เมื่อเขียนกราฟจากสมการที่ (3) จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง V_m, c คำนวณหาได้จากจุดตัดและความชันเส้นตรง ค่า V_m ที่ได้นำมาเทียบเป็นพื้นที่ผิวรูพรุน S (m²) ดังสมการที่ 4

$$S = \frac{V_m N_{AV}}{22400} a \quad (4)$$

- โดย S คือ พื้นที่ผิวรูพรุน (m²)
 N_{AV} คือ Avogadro Number (6.02 x 10²³ molecules mol⁻¹)
 a คือ พื้นที่ต่อหน่วยโมเลกุลก๊าซ (cm² molecule⁻¹)

แต่ในกรณีที่รูพรุนขนาดใหญ่ จะใช้วิธีวัดแบบ Porosimeter โดยใช้หลักการอัดปรอทเข้าไปในรูพรุน จากปริมาตรของปรอทที่เข้าไปแทนที่รูพรุน ณ ความดันต่างๆ ก็จะคำนวณหาปริมาตรการกระจายรูพรุนตามเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนได้ ดังนั้นเมื่อใช้วิธีการแบบ BET ร่วมกับวิธีการวัดแบบ Porosimeter ก็จะ สามารถหาการกระจายปริมาตรรูพรุน ตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10^{-10} ถึง 10^5 อังสตรอม ซึ่งการกระจายของรูพรุนนั้น อาจมีการกระจายตัวในบางช่วงของรัศมีรูพรุน หรือหลายช่วงรัศมีรูพรุนก็ได้



รูปที่ ก-1 เครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน (Micromeritics, ASAP 2020, Surface area and porosity analyzer)

[17]

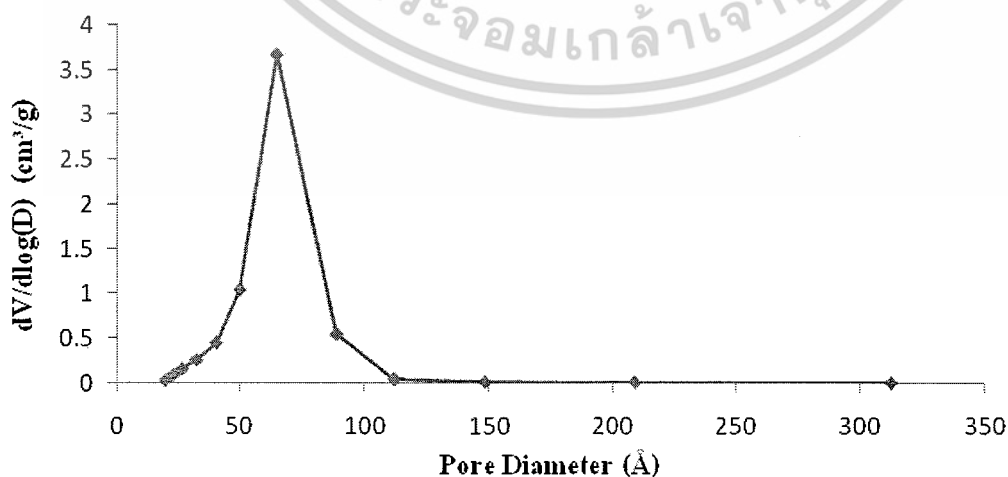
ภาคผนวก ง.

ผลการวิเคราะห์สมบัติของสารดูดซับโดยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน
ด้วยเครื่อง Micromeritics, ASAP 2020, Surface area and porosity analyzer

ง.1 การกระจายตัวของรูพรุน (Pore size distribution)

ตารางที่ ง-1 ผลการกระจายตัวของรูพรุนของ RF1

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน dV/dlog(D) (cm ³ /g)
312.15	0.0050
209.23	0.0099
148.15	0.0147
111.88	0.0462
88.93	0.5451
64.82	3.6773
49.97	1.0442
40.33	0.4505
32.29	0.2606
26.54	0.1593
23.06	0.0928
19.78	0.0269

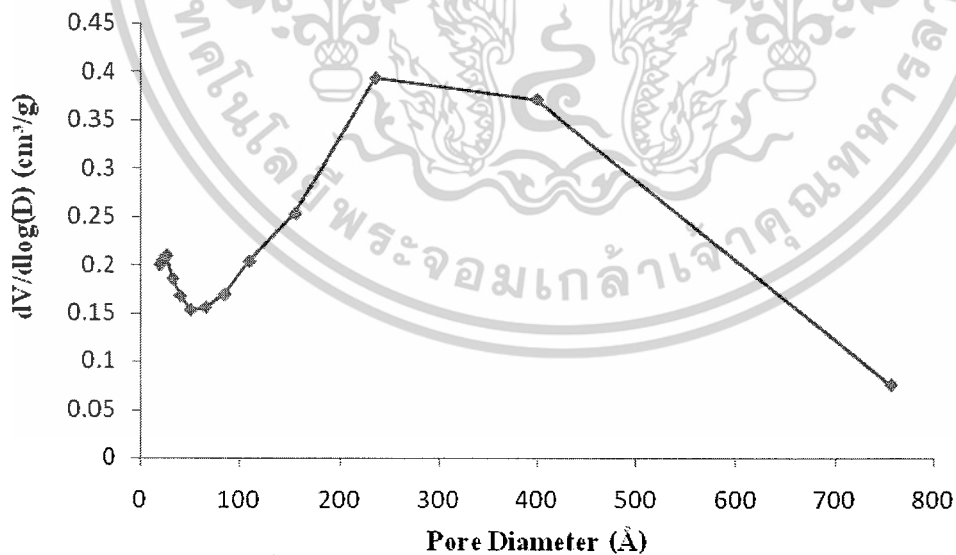


รูปที่ ง-1 การกระจายตัวของรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอน RF1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 ผลการกระจายตัวขนาดของรูพรุนของ RF2

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน dV/dlog(D) (cm ³ /g)
756.31	0.0757
400.11	0.3713
235.97	0.3937
155.68	0.2528
109.97	0.2035
85.24	0.1691
66.23	0.1556
51.16	0.1530
40.45	0.1674
32.68	0.1856
26.47	0.2095
22.92	0.2049
19.74	0.1999

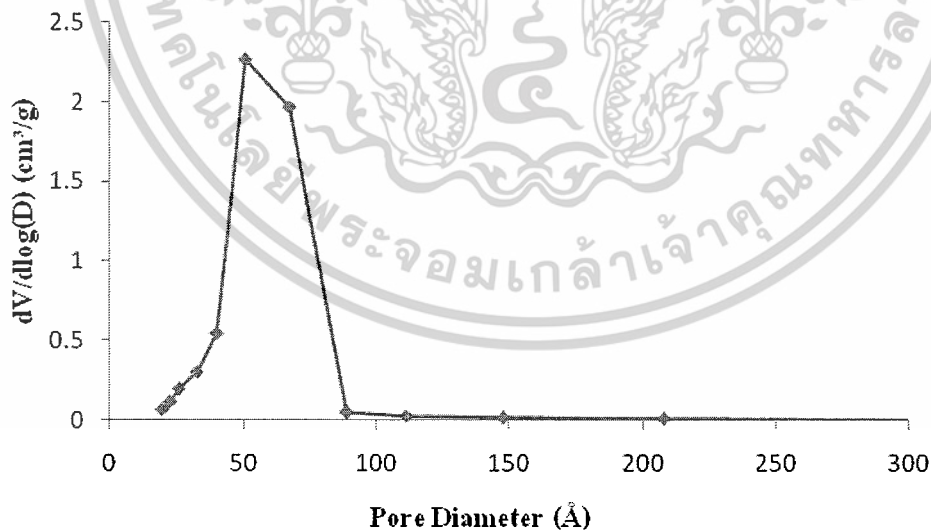


รูปที่ ง-2 การกระจายตัวขนาดรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอน RF2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 ผลการกระจายตัวขนาดของรูพรุนของ RF3

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน $dV/d\log(D)$ (cm ³ /g)
561.36	0.0008
308.78	0.0044
207.85	0.0095
147.58	0.0152
111.40	0.0281
88.81	0.0479
67.17	1.9694
50.61	2.2661
40.07	0.5430
32.45	0.2999
25.81	0.1913
22.70	0.1160
19.78	0.0664

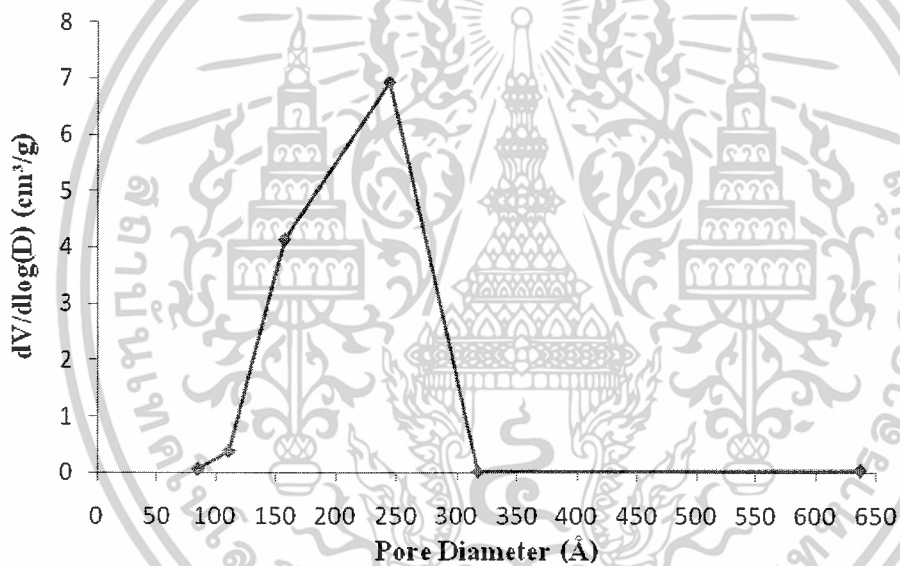


รูปที่ ง-3 การกระจายตัวขนาดรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอน RF3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-4 ผลการกระจายตัวขนาดของรูพรุนของ RF4

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน dV/dlog(D) (cm ³ /g)
636.64	0.0282
317.06	0.0214
244.17	6.9353
156.86	4.1270
111.09	0.3779
85.29	0.0509

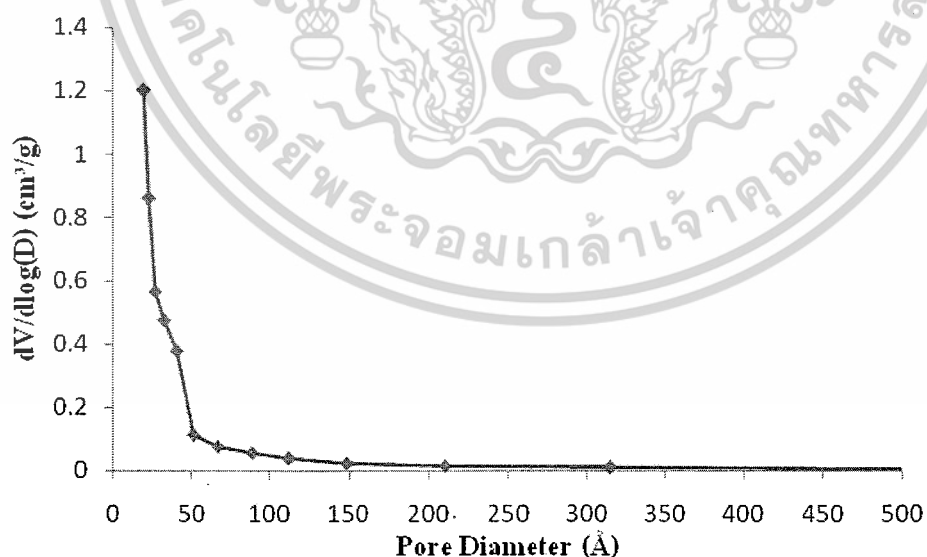


รูปที่ ง-4 การกระจายตัวขนาดรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอน RF4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-5 ผลการกระจายตัวขนาดของรูพรุนของ AC1

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน dV/dlog(D) (cm ³ /g)
578.13	0.0017
314.48	0.0104
210.50	0.0175
148.40	0.0250
111.53	0.0393
88.80	0.0560
66.66	0.0752
51.01	0.1113
40.65	0.3770
32.60	0.4755
26.55	0.5656
23.03	0.8607
19.79	1.2020



รูปที่ ง-5 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ AC1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้