

การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเมโซพอร์รัสคาร์บอน

ADSORPTION OF β -CAROTENE IN CRUDE PALM OIL USING
MESOPOROUS CARBON ADSORBENTS

ลลิตา บุรีรักษ์

LALITA BUREDAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-220-149

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน

Adsorption of β - carotene in Crude Palm Oil using Mesoporous Carbon Adsorbents



T105493

ลลิตา บุรีรักษ์

LALITA BUREERAK

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105493
วัน,เดือน,ปี..... 24 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-220-149

**ADSORPTION OF β -CAROTENE IN CRUDE PALM OIL USING
MESOPOROUS CARBON ADSORBENTS**

LALITA BUREERAK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2009
KMITL--2009-EN-M-220-149**

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน
Thesis Title Adsorption of β -carotene in Crude Palm Oil using Mesoporous Carbon Adsorbents
นักศึกษา นางสาวลลิตา บุรีรักษ์
รหัสประจำตัว 50061153
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-220-149

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ดวงกมล	ณ ระนอง	
ดร.พรสวรรค์	อัสวแสงรัตน์	
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	ไกรวัฒนวงศ์	
ผศ.ดร.สมหมาย	พิวสอาด	
รศ.ดร.ประกอบ	กิจไชยา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ ๕ ตุลาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG


คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2552
ลงชื่อ 

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน
นักศึกษา	นางสาวลลิตา บุรีรัมย์
รหัสประจำตัว	50061153
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน (RF 1- RF 12) จากรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ ด้วยวิธีการโซลเจล พบว่าการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนของสารตั้งต้น ตัวทำละลายและวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน ล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติของเมโซพอร์สคาร์บอนที่ได้ จากนั้นนำตัวดูดซับที่ได้ มาทำการศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบเปรียบเทียบกับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (Ac) เกรดการค้า พบว่าตัวดูดซับทั้ง 2 ประเภท สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบเมื่อใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายได้ดีกว่าใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย ตัวดูดซับ Ac เข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวดูดซับ RF 7, RF 8 และ RF 9 เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 72 ชั่วโมง โดยตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนทุกตัวสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้มากกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ เนื่องจากตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนมีรูพรุนขนาดใหญ่ และมีปริมาตรรูพรุนมากจึงทำให้สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้ดี และพบว่าตัวดูดซับ RF 9 สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้มากที่สุด คือ 10.6 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับรองลงมาเป็น RF 8 , RF 7 และ RF 10 ดูดซับได้ 10.3, 9.4 และ 9.3 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับตามลำดับ เบต้าแคโรทีนที่ถูกดูดซับบน RF 7, RF 8 , RF 9 และ RF 10 สามารถคายซับได้ด้วยตัวทำละลายโทลูอีน โดย RF 10 สามารถคายซับเบต้าแคโรทีนได้มากที่สุดเป็น 1.61 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับ ดังนั้นในการศึกษารั้งนี้ตัวดูดซับ RF 10 จึงมีความเหมาะสมสำหรับการสกัดเบต้าแคโรทีน ออกจากน้ำมันปาล์มดิบมากที่สุด เนื่องจากสามารถคายซับเบต้าแคโรทีน ออกมาใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด

Thesis Title	Adsorption of β - carotene in crude palm oil using mesoporous carbon adsorbents
Student	Miss Lalita Bureerak
Student ID.	50061153
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Prakob Kitchaiya
Co-Thesis Advisor	Assist. Prof. Dr. Kriangsak Kraiwattanawong

ABSTRACT

This research concentrated on a synthesis of mesoporous carbons adsorbent (RF 1- RF 12) prepared by sol-gel method using resorcinol and formaldehyde as the precursor. It was found that some factors such as different ratio of reactants, type of solvent exchange and drying process affected properties of the prepared mesoporous carbons. Adsorption of β -carotene in crude palm oil (CPO) was investigated using a commercial activated carbon (Ac) and the synthesized mesoporous carbons. Both adsorbents exhibited good adsorption of β -carotene in CPO when isopropanol was used as a solvent. It was found that the adsorption equilibrium on Ac was reached within 24 hours while it took 72 hours for mesoporous carbon adsorbents. β -carotenes could be more adsorbed by mesoporous carbon adsorbents than Ac adsorbent because of larger pore size and pore volume. β -carotenes adsorption on RF 9 was 10.6 mg β -carotene/g adsorbent while the adsorption rating of RF 8, RF 7 and RF 10 were 10.3, 9.4 and 9.3 mg β -carotene/g adsorbent, respectively. Desorption of β -carotenes was best found in toluene solvent. 1.61 mg β -carotene/g adsorbent was largest recovered from RF 10 after desorption comparing with other adsorbents. Thus, RF 10 was a suitable β -carotene adsorbent due to its adsorption capacity and desorption degree.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอขอบคุณ

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา และ ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ไขปัญหาลดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และของกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทางเงินทุนวิจัย

คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ ดูแลเอาใจใส่ และให้การสนับสนุนตลอดมา

พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

คุณค่าและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ลลิตา บุรีรักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เบต้าแคโรทีน (β - carotene)	5
2.1.1 คุณสมบัติของเบต้าแคโรทีน.....	5
2.1.2 การดูดซึมเบต้าแคโรทีน	5
2.1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึม.....	5
2.1.4 ประโยชน์ของเบต้าแคโรทีน.....	6
2.1.5 ปริมาณที่แนะนำต่อวัน.....	6
2.1.6 แหล่งของเบต้าแคโรทีน.....	6
2.2 น้ำมันปลา.....	7
2.3 การดูดซับ (Adsorption).....	9
2.3.1 กระบวนการดูดซับ	9
2.3.2 ประเภทของการดูดซับ.....	9
2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon).....	12
2.4.1 ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์	12
2.4.1.1 แบ่งตามลักษณะรูปร่าง.....	12
2.4.1.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุน.....	13
2.4.1.3 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ.....	13
2.4.2 การผลิตคาร์บอนกัมมันต์.....	14
2.4.2.1 การคาร์บอนไนเซชัน.....	14
2.4.2.2 การกระตุ้น.....	14
2.5 รีซอร์ซินอล_ฟอร์มัลดีไฮด์คาร์บอนเจล.....	16
2.5.1 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์.....	16
2.5.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์รีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คาร์บอนเจล.....	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 อุปกรณ์และการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	23
3.3 สารเคมี.....	24
3.4 วิธีการทดลอง.....	24
3.4.1 การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนด้วยวิธีการ โซลเจล.....	24
3.4.2 วิธีการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับ.....	25
3.4.3 วิธีหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ.....	26
3.4.4 วิธีหาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีน.....	26
3.4.5. วิธีการคายซับเบต้าแคโรทีน.....	27
3.4.6. การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเบต้าแคโรทีน.....	27
3.4.7. การวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนโดยใช้เครื่อง HPLC.....	28
3.4.8. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	29
4.1 การสังเคราะห์เมโซพอร์รัสคาร์บอนเพื่อใช้ในการดูดซับเบต้าแคโรทีนใน น้ำมันปาล์มดิบ.....	29
4.2 ศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ...	36
4.3 ศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ.....	37
4.4 ศึกษาตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ....	38
4.5 การศึกษาการคายซับ.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	44
ภาคผนวก ก พื้นที่ผิวและกราฟของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.	49
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจน.....	51
ภาคผนวก ค ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับ.....	71
ภาคผนวก ง ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ	75
ภาคผนวก จ ผลงานทางวิชาการ.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความสามารถในการละลายของเบต้าแคโรทีนในตัวทำละลายแต่ละชนิด.....	5
2.2 องค์ประกอบของสารส่วนน้อยในน้ำมันปาล์มดิบ.....	8
2.3 องค์ประกอบของแคโรทีนในน้ำมันปาล์ม.....	8
2.4 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม.....	9
2.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	10
2.6 การแบ่งกลุ่มขนาดรูพรุนตามระบบ IUPAC.....	13
2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของเจล.....	18
2.8 ค่าแรงดึงผิวของตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	19
3.1 อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน.....	25
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ Ac และตัวดูดซับ RF 1 ถึง RF 12.....	34
4.2 ปริมาณเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่ถูกดูดซับ โดยตัวดูดซับ ที่เวลา 24 ชั่วโมง....	37
4.3 ปริมาณเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่ถูกดูดซับ โดยตัวดูดซับ ที่เวลา 72 ชั่วโมง....	40
4.4 ปริมาณการคายซับเบต้าแคโรทีนจากตัวดูดซับ	41
ก. พื้นที่ผิวของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	48
ข-1 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ Ac.....	51
ข-2 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 1.....	52
ข-3 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 2.....	53
ข-4 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 3.....	54
ข-5 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 4.....	55
ข-6 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 5.....	56
ข-7 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 6.....	57
ข-8 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 7.....	58
ข-9 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 8.....	59
ข-10 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 9.....	60
ข-11 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 10.....	61
ข-12 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 11.....	62
ข-13 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 12.....	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-14 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ Ac.....	64
ข-15 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 1.....	64
ข-16 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 2.....	65
ข-17 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 3.....	65
ข-18 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 4.....	66
ข-19 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 5.....	66
ข-20 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 6.....	67
ข-21 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 7.....	67
ข-22 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 8.....	67
ข-23 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 9.....	68
ข-24 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 10.....	68
ข-25 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 11.....	69
ข-26 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 12.....	69
ค-1 ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยเฮกเซนเข้มข้น ร้อยละ 50 ที่เวลา 24 ชั่วโมง.....	71
ค-2 ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยไอโซโพรพานอล เข้มข้นร้อยละ 50 ที่เวลา 24 ชั่วโมง.....	72
ค-3 ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยไอโซโพรพานอล เข้มข้นร้อยละ 50 ที่เวลา 72 ชั่วโมง.....	73
ง-1 ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ Ac.....	75
ง-2 ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ RF 7...	75
ง-3 ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ RF 8...	76
ง-4 ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ RF 9...	76

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเบต้า แคลโรทีนที่พบในธรรมชาติ.....	4
2.2 ปฏิกริยาการเติม (Addition reaction).....	17
2.3 ปฏิกริยาการควบแน่น (Condensation reaction).....	17
4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ Ac และ RF 1- RF 12.....	30
4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ Ac และ RF 1- RF 5.....	30
4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 7 - RF 10	31
4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 6 และ RF1 -RF 12	31
4.5 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ Ac และ RF 1- RF 12.....	32
4.6 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ Ac และ RF 1 -RF 5.....	32
4.7 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ RF 7 - RF 10.....	33
4.8 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ RF 6, RF11และRF 12.....	33

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิตามินพนธ์

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำมันปาล์มมีแนวโน้มที่จะขยายตัวอย่างมาก โดยส่วนประกอบในน้ำมันปาล์มดิบจะมีแคโรทีนอยด์ อยู่ 500-700 ppm ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเบต้าแคโรทีน(β -carotene) ถึง 56 % แคโรทีนอยด์ที่เหลือจะประกอบไปด้วยแอลฟาแคโรทีน แกมมาแคโรทีน แซนโทฟิล และไลโคฟิล [1,2]

เบต้าแคโรทีนจัดเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ(Pro-Vitamin A) โดยปกติร่างกายของมนุษย์สามารถเปลี่ยนเบต้าแคโรทีนไปเป็นวิตามินเอได้ตามปริมาณที่ร่างกายต้องการ เมื่อรับประทานเบต้าแคโรทีนเข้าไปในร่างกาย ดับจะทำหน้าที่เปลี่ยนโมเลกุลของเบต้าแคโรทีนให้เกิดเป็น วิตามินเอ (Vitamin A) โดยที่เบต้าแคโรทีน 1 โมเลกุล จะถูกเปลี่ยนให้เป็น วิตามิน เอ ได้ 2 โมเลกุล[3] เมื่อหมดความต้องการวิตามินเอแล้ว กระบวนการเปลี่ยนแปลงเบต้าแคโรทีนไปเป็นวิตามินเอก็จะหยุดลง โดยเบต้าแคโรทีนมีบทบาทสำคัญในการรักษาสุขภาพและเพิ่มระบบภูมิคุ้มกันให้แข็งแรง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (antioxidation) โดยการกำจัดอนุมูลอิสระ (free radicals) เพื่อป้องกันไม่ให้อนุมูลอิสระไปทำปฏิกิริยาทำลายส่วนประกอบต่างๆของเซลล์ จนทำให้เซลล์มีการเจริญเติบโตผิดปกติเป็นต้นเหตุทำให้เกิดโรคมะเร็ง จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้เบต้าแคโรทีนเป็นสารที่ได้รับความสนใจและเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องสำอางเป็นอย่างมาก

เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มให้บริสุทธิ์นั้น จะใช้ตัวดูดซับในการกำจัดสีออกจากน้ำมันปาล์มเพื่อให้ น้ำมันปาล์มคุณภาพรับประทาน ในขั้นตอนนี้จะทำให้สูญเสียเบต้าแคโรทีน ซึ่งเป็นสารที่มีคุณค่าไปอย่างเปล่าประโยชน์ [4,5] ดังนั้นถ้าสามารถนำเบต้าแคโรทีน กลับมาใช้ประโยชน์ได้ก่อนที่จะถูกทำลายจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตน้ำมันปาล์มอีกทางหนึ่ง ด้วยความสำคัญและประโยชน์ของเบต้าแคโรทีนจึงก่อให้เกิดการคิดค้นและพัฒนาเทคนิคต่างๆ ในการสกัดเบต้าแคโรทีนออกจากน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแยกเบต้าแคโรทีนออกจากน้ำมันปาล์ม โดยการดูดซับเป็นวิธีที่มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย หรือการกลั่นโมเลกุล พบว่าวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่สะดวก และใช้พลังงานต่ำ เหมาะสำหรับการแยกสารที่มีปริมาณความเข้มข้นน้อยๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เบต้าแคโรทีนจัดว่าเป็นสารที่มีขนาดใหญ่คือมีขนาดประมาณ 17 อังสตรอม [6] ดังนั้นการที่จะหาตัวดูดซับสำหรับดูดซับเบต้าแคโรทีนนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วย ตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุนแบบไมโครพอร์ (< 20 อังสตรอม) มีขนาดเล็กเกินไปในการดูดซับ ในขณะที่ตัวดูดซับแบบมาโครพอร์จะมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ (> 500 อังสตรอม) แต่จะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อย ตัวดูดซับแบบเมโซพอร์ซึ่งมีขนาดรูพรุนระหว่าง 20 ถึง 500 อังสตรอมและมีพื้นที่ผิวปานกลางจึงมีความเหมาะสมในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น เบต้าแคโรทีน

คาร์บอนกัมมันต์ และเมโซพอร์สคาร์บอนเป็นตัวดูดซับที่มีคุณสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนสูงรวมถึงมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับตัวดูดซับสังเคราะห์ชนิดอื่น และเมื่อพิจารณาถึงความมีขั้วของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ พบว่าคาร์บอนกัมมันต์และเมโซพอร์สคาร์บอนเป็นตัวดูดซับไม่มีขั้ว และเบต้าแคโรทีนก็เป็นสารที่ไม่มีขั้วจึงเป็นตัวดูดซับที่น่าสนใจสำหรับใช้ในการดูดซับ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการดูดซับและการคายซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบซึ่งมีความสำคัญเพราะนอกจากจะสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ควรที่จะสามารถนำเบต้าแคโรทีนที่ถูกดูดซับไว้ออกมาได้ด้วยจึงจะได้ประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เปรียบเทียบการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์และเมโซพอร์สคาร์บอน
2. ศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์และเมโซพอร์สคาร์บอน
3. ศึกษาการคายซับเบต้าแคโรทีนจากตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์และเมโซพอร์สคาร์บอน

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (Ac) จากบริษัทคาร์โบกาญจน์และเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการโซลเจล (sol-gel method) 12 ตัวอย่าง (RF 1-RF 12)
2. ศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้าและเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น
3. ศึกษาการคายซับเบต้าแคโรทีนจากตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนด้วยตัวทำละลาย n-butyl acetate, cyclo hexane, toluene, ethanol, benzene, tetrahydrofuran และ น้ำมันถั่วเหลือง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีการดูดซับและกระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์และตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน
2. มีความรู้ความเข้าใจในการเลือกใช้ตัวทำละลายและตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับเบต้าแคโรทีน
3. เป็นแนวทางในการเลือกใช้ตัวทำละลายในการสกัดแยกเบต้าแคโรทีนออกจากตัวดูดซับเพื่อให้ได้ผลกลับคืนมากที่สุด
4. เป็นแนวทางในการนำวิธีสกัดเบต้าแคโรทีนไปพัฒนาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปลาต่อไป

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

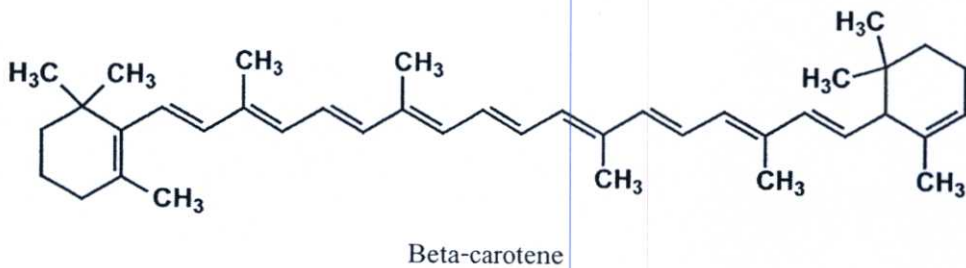
2.1 เบต้าแคโรทีน (β - carotene)

2.1.1 คุณสมบัติของเบต้าแคโรทีน

เบต้า แคโรทีน เป็นสารประกอบที่มีผลึกสีแดงเข้มจำพวกแคโรทีนอยด์ ถูกทำลายได้ง่ายโดยการออกซิไดส์ หรือเมื่อได้รับความร้อนสูงมาก ๆ มีคุณลักษณะเฉพาะตัวดังนี้

- มวลโมเลกุล 536.89 กรัมต่อโมล
- ความหนาแน่น 0.941 ± 0.06 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- ลักษณะเป็นผลึกรูปเหลี่ยมสีแดงม่วง [7]
- จุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 180-182 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงเดียวกันกับที่เบต้าแคโรทีนเริ่มสลายตัว โดยเกิดการออกซิไดส์ที่พันธะคู่เกิดเป็นเบต้าแคโรทีนไอโซเมอร์ชนิดต่างๆ มีผลทำให้สีของเบต้าแคโรทีนจางลง [8]

- เบต้าแคโรทีนหนึ่งโมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 40 อะตอมอยู่ในรูปไอโซพรีน (Isoprene group) แปดโมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่โดยมีวงแหวน β -ionone 2 วงที่หัวและท้ายของโมเลกุล มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{40}H_{56}$ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเบต้า แคโรทีนที่พบในธรรมชาติ[8]

- เบต้าแคโรทีนไม่ละลายในน้ำและในสภาวะที่เป็นกรดหรือด่าง [9] และละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ความสามารถในการละลายของเบต้าแคโรทีนในตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถในการละลายของเบต้าแคโรทีนในตัวทำละลายแต่ละชนิด [10]

ชนิดของตัวทำละลาย	ความสามารถในการละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Methanol	10
Acetonitrile	10
Ethanol	30
2-propanol	40
Acetone	200
Ethyl acetate	500
Hexane	600
Ethyl ether	1000
Chloroform	2000
Cyclohexane	2000
Benzene	4000
Toluene	4000
Dichloromethane	6000
THF	10000

2.1.2 การดูดซึมเบต้าแคโรทีน [11]

เมื่อเบต้าแคโรทีนเข้าสู่ร่างกายจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเรตินอล (Retinol) ที่ตับซึ่งเป็นรูปที่ร่างกายจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยในร่างกายจะมีเอนไซม์ไดออกซีจีเนส (Dioxygenase) และเรตินีนรีดักเทส (Retinene reductase) ช่วยในการเปลี่ยนรูปบริเวณแรกที่จะมีการดูดซึมคือ ลำไส้เล็กตอนต้น ซึ่งบริเวณนี้น้ำย่อยที่ใช้แตกตัวไขมัน (fat splitting enzyme) และเกลือน้ำดีจะเปลี่ยนแคโรทีนให้อยู่ในรูปของวิตามินเอ โดยการช่วยเหลือของ ไทรอกซิน (thyroxine) ซึ่งเป็นกรดอะมิโน ที่ได้จากต่อมธัยรอยด์ ต่อจากนั้นก็จะถูกส่งเข้ากระแสโลหิตนำไปใช้ได้ การเปลี่ยนแคโรทีนออกซ์เป็นวิตามินเอ ส่วนใหญ่เกิดที่ผนังลำไส้ การดูดซึมจะตีมาน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับ การดูดซึมไขมัน ถ้าอาหารมีไขมันน้อยหรือมีกรดไขมันโซ่ยาวอยู่มาก การดูดซึมจะเป็นไปไม่ได้ดี

2.1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึม [11]

ในการดูดซึมเบต้าแคโรทีนเข้าสู่ร่างกายนั้นมีปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ชนิดของผัก เบต้าแคโรทีนในผัก โดยทั่วไปดูดซึมได้ประมาณร้อยละ 20-45 โดยที่เบต้าแคโรทีนในผักใบสีเขียวจะดูดซึมได้ดีกว่าผักสีแดง และเหลือง เช่น แครอท ประมาณ 2-3 เท่า

2. ปริมาณโปรตีนในอาหาร ปริมาณโปรตีนในอาหารช่วยในการดูดซึมเบต้าแคโรทีน โดยถ้าเพิ่มปริมาณโปรตีน ในอาหารจะช่วยเปลี่ยนเบต้าแคโรทีน เป็นวิตามินเอในเซลล์ด้วย
3. ปริมาณไขมันในอาหาร ไขมันทำหน้าที่เป็นพาหะขนส่งวิตามินเอ และเบต้าแคโรทีนจากกระเพาะไปสู่ลำไส้เล็กและเป็นแหล่งที่เกิดไมเซลล์ (micelle) บางครั้งในไขมันจะมีวิตามินอีด้วยจะช่วยทำหน้าที่เป็น antioxidant
4. น้ำดี น้ำดีจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมเบต้าแคโรทีน ได้ดียิ่งขึ้น

2.1.4 ประโยชน์ของเบต้าแคโรทีน [12]

เบต้าแคโรทีนมีประโยชน์ต่อร่างกายในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ลดความเสี่ยงต่อภาวะมะเร็ง อนุมูลอิสระมีผลเกี่ยวข้องกับมะเร็งเนื้อร้าย การลดปริมาณอนุมูลอิสระเท่ากับลดความเสี่ยงของมะเร็ง ซึ่งพบว่าเบต้าแคโรทีนให้ผลกระตุ้นเซลล์ภูมิคุ้มกันต้านทานในร่างกายที่ชื่อ ที-เฮลเปอร์ ให้ทำงานด้านสิ่งแปลกปลอมได้ดีขึ้น ให้ผลดีกับผู้ที่มีความเสี่ยงต่อมะเร็ง
2. บำรุงสุขภาพของดวงตา เบต้าแคโรทีนเมื่อโดนย่อยสลายที่ตับแล้วจะได้วิตามินเอ ซึ่งร่างกายนำไปใช้สร้างสาร โรดอปซินในดวงตาส่วนเรตินา ทำให้ตามีความสามารถในการมองเห็นในตอนกลางคืนได้ และยังลดความเสี่ยงของเซลล์ของลูกตา ลดความเสี่ยงต่อการเป็นต้อกระจกด้วย
3. ชะลอความแก่ เบต้าแคโรทีนให้ผลในการลดความเสี่ยงของเซลล์จากอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดกระบวนการแก่ เบต้าแคโรทีนนับเป็นสารอาหารที่มีบทบาทสำคัญสำหรับสุขภาพของมนุษย์

2.1.5 ปริมาณที่แนะนำต่อวัน [12]

สำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา แนะนำว่าคนปกติควรได้รับเบต้าแคโรทีนประมาณ 5.2 มิลลิกรัมต่อวัน ส่วนสถาบันมะเร็งแห่งชาติสหรัฐอเมริกาแนะนำว่าควรได้รับเบต้าแคโรทีน ประมาณวันละ 6 มิลลิกรัม สำหรับประเทศไทยนั้น สำนักงานอาหารและยาแนะนำว่าควรได้รับเบต้าแคโรทีน วันละ 4.8 มิลลิกรัม

2.1.6 แหล่งของเบต้าแคโรทีน [12]

แหล่งของเบต้าแคโรทีน จะพบได้ในผัก และผลไม้ที่มีสีส้ม เหลือง หรือ แดง เพราะเบต้าแคโรทีน คือ ตัวการทำให้พืชผัก และผลไม้มีสีสรรดังกล่าว เช่น แครอท ฟักทอง หน่อไม้ฝรั่ง ข้าวโพดอ่อน แดงโม แคนตาลูป มะละกอสุก และผักที่มีสีเขียว เช่น บรอกโคลี มะระ ผักบุ้ง ต้นหอม

ผักคะน้า ผักตำลึง เป็นต้น (เหตุที่มีสีเขียวเพราะสีของเบต้าแคโรทีนถูกสีเขียวของคลอโรฟิลล์บดบัง)

2.2 น้ำมันปาล์ม [13]

น้ำมันปาล์ม แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Crude Palm Kernel Oil) น้ำมันปาล์มดิบสกัดได้จากส่วนเนื้อของผลปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีปริมาณน้ำมันประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทะเลาย น้ำมันปาล์มดิบแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนใสและส่วนที่เป็นไข โดยทั่วไปจะหลอมเหลวประมาณ 40 องศาเซลเซียส และมีจุดแข็งตัวอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 25-50 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ น้ำมันปาล์มดิบจะมีลักษณะสีแดงส้ม ซึ่งเป็นผลมาจากสารแคโรทีนอยด์ที่อยู่ในนั้น โดยแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบมีแคโรทีนเป็นองค์ประกอบอยู่ 11 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

น้ำมันเมล็ดในปาล์ม สกัดได้จากเนื้อของเมล็ดในของผลปาล์มน้ำมัน จะมีน้ำมันประมาณ 46-57 เปอร์เซ็นต์

น้ำมันปาล์มมีองค์ประกอบทางเคมีเกี่ยวข้องกับวิตามินที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ วิตามินอี (Tocopherol และ Tocotrienols) และสารแคโรทีนอยด์ (Pro-Vitamin A) ปริมาณสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ ซึ่งวิตามินทั้ง 2 ตัวจัดเป็นสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ ทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระอันเป็นต้นเหตุให้เกิดโรคมะเร็ง นอกจากวิตามินทั้ง 2 ตัวแล้วยังพบว่าในน้ำมันปาล์มยังมีสารอื่นๆที่มีประโยชน์ต่อร่างกายอีก เช่น สควอลีน (Squalene) มีคุณสมบัติช่วยเสริมสร้างการสร้างน้ำมันตามธรรมชาติ ทำให้ผิวเกิดความชุ่มชื้นเต่งตึง แลดูอ่อนกว่าวัย จัดเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุของการเกิดริ้วรอยก่อนวัย สารสเตอรอล (Sterol) ช่วยลดคอเลสเตอรอลในหลอดเลือด ป้องกันการเกิดโรคหัวใจ เป็นต้น ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบของสารแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มดิบ

น้ำมันปาล์มประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว และกรดไขมันที่อิ่มตัวในสัดส่วนที่สมดุล สำหรับกรดไขมันไม่อิ่มตัวนั้น ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวพันธะเดี่ยวโอเลอิก (mono-unsaturated oleic acid) ร้อยละ 40 ขณะที่กรดไขมันอิ่มตัวประกอบด้วยกรดปาล์มมิติก (palmitic acid) ร้อยละ 44% และกรดสเตียริก (Stearic acid) ร้อยละ 5 ด้วยสัดส่วนของส่วนผสมดังกล่าว ทำให้น้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติพิเศษ เหมาะสำหรับการใช้ ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารหลายประเภท ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่สกัดได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เป็นน้ำมันดิบยังไม่สามารถบริโภคได้ต้องนำไปทำการกลั่นให้เป็นน้ำมันบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการแยกขางเหนียว ฟอกสี ลดกรด และคูดกลั่น ได้เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และมีผลพลอยได้คือ ไขมันปาล์ม(Palm Stearin) ซึ่งผลผลิตทั้งหมดนี้ถูกนำไปใช้ เพื่อการอุปโภคบริโภคได้หลากหลายชนิด เช่น น้ำมันปรุง

อาหาร น้ำมันทอด ผิดคนมขี้ ไอศกรีม เนยเทียม เนยขาว เนยโกโก้ ครีมเทียม คอฟฟี่เมท ไขมันทำขนมปัง สบู่ เป็นต้นและใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสเตอรอยด์เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล หรือ ไบโอดีเซล

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของสารส่วนน้อยในน้ำมันปาล์มดิบ [14]

ชนิดสาร	ปริมาณ (ppm)
Carotenoids	500-700
Tocopherol and tocotrienols	600-1,000
Sterols	326-527
Phospholipids	5-130 ^a
Triterpene alcohol	40-80 ^a
Methyl sterols	40-80
Squalene	200-500
Aliphatic alcohols	100-200
Aliphatic hydrocarbon	50

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของแคโรทีนในน้ำมันปาล์ม [15]

ชนิดของแคโรทีน	ปริมาณ (%)
Phytoene	1.27
<i>Cis-β</i> -Carotene	0.68
Phytofluene	0.06
<i>β</i> -Carotene	56.02
<i>α</i> -Carotene	35.16
<i>Cis-α</i> -Carotene	2.49
<i>σ</i> -Carotene	0.69
<i>γ</i> -Carotene	0.33
<i>δ</i> -Carotene	0.83
Neurosporene	0.29
<i>β</i> -Zeaxanthin	0.74
<i>α</i> -Zeaxanthin	0.23
Lycopene	1.30

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม [16]

ชื่อของกรดไขมัน	ชนิดของกรดไขมัน	ปริมาณที่พบ (%)	
		อยู่ในช่วง	ค่าเฉลี่ย
กรดลอริก	C 12:0	0.1-1.0	0.2
กรดไมริสติก	C14:0	0.9-1.5	1.1
กรดปาล์มมิดิก	C16:0	41.8-46.8	44.0
กรดปาล์มมิโตเลอิก	C16 :1	0.1-0.3	0.1
กรดสเตียริก	C18:0	4.2-5.1	4.5
กรดโอเลอิก	C18 :1	37.3-40.8	39.2
กรดลิโนเลอิก	C18 :2	9.1-11.0	10.1
กรดลิโนเลนิก	C18 :3	0.0-0.6	0.4
กรดอร่าซิดิก	C 20:0	0.2-0.7	0.4

2.3 การดูดซับ (Adsorption)

2.3.1 กระบวนการดูดซับ [17]

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent)

2.3.2 ประเภทของการดูดซับ [18]

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

1) การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของ

กระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับหรือภายในรูพรุนของสารดูดซับ ได้ทั้งแบบชั้นเดียว (monolayer) หรือได้หลายชั้น (multilayer)

2) การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับเกิดพันธะเคมีกับตัวดูดซับ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวหรือรูพรุนของตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายประการ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตาราง 2.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [18]

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 kJ/mol	50-400 kJ/mol
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
6. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ [19]

ในกระบวนการทดสอบการดูดซับปัจจัยซึ่งมีผลต่อการออกแบบกระบวนการประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ

1. ลักษณะของตัวถูกดูดซับ (Characteristics of the Adsorbate)

ลักษณะทางเคมีของตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดูดซับ เช่น ขนาดและรูปแบบโครงสร้างของอนุภาคโมเลกุลที่ถูกดูดซับ ขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับนั้นมีความสำคัญ

2 ประการคือ

1.1. โมเลกุลของสารอินทรีย์เมื่อ โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ความสามารถในการละลายในของเหลวลดลง สารที่มีความสามารถในการละลายในน้ำต่ำจะมีค่า affinity ที่ผิวของแข็งที่

ไม่มีขั้วสูงกว่าสารอื่นที่มีขั้วมาก และมีแนวโน้มสะสมความเข้มข้นบนผิวที่เกิดการดูดซับ ขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีผลต่อสัดส่วนของพื้นที่ผิวภายในที่ถูกดูดซับของตัวดูดซับ ถ้าโมเลกุลของสารมีขนาดใหญ่ การดูดซับจะถูกขัดขวางและความจุของการดูดซับจะลดลง โดยโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีรูปร่างกะกะกิดขวางไม่สามารถผ่านเข้าไปในตัวดูดซับได้ โมเลกุลขนาดใหญ่จะแพร่ออกจากสารละลายได้ช้ามากและต้องใช้เวลานานสำหรับการเข้าสู่สถานะสมดุลของการดูดซับ

1.2. โมเลกุลอาจอยู่ในสถานะที่เป็นไอออนหรือเป็นกลาง เป็นกึ่งไอโซเมอร์หรือเป็นโซ่ตรงล้วนมีผลต่อการแยกสารออกจากสารละลาย โดยการดูดซับ รูปแบบของโมเลกุลสามารถส่งผลกระทบต่อความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ และรูปแบบของโมเลกุลยังเป็นตัวกำหนดพลังงานของการดูดซับ ในรูปของแรงที่อนุภาคของโมเลกุลยึดเกาะกับตัวดูดซับ นอกจากนี้ลักษณะของตัวถูกดูดซับยังมีผลต่ออัตราการแพร่ของโมเลกุลผ่านของเหลว ซึ่งอัตราการแพร่เป็นฟังก์ชันกับขนาดโมเลกุล และรูปแบบของโมเลกุลในตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ

2. ลักษณะของตัวดูดซับ (Characteristics of the Adsorbent)

คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในการแยกสารหรือตัวถูกดูดซับออกจากสารละลายนั้นมีความสำคัญมาก ลักษณะทางเคมีของตัวดูดซับนั้นประกอบด้วยความสามารถในการแตกตัวเกิดเป็น ไอออนของพื้นผิวดูดซับ ชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้อาจเปลี่ยนไปเมื่อสัมผัสกับสารละลายชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะเมื่อมีไอออนหรือหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวอยู่บนพื้นผิวดูดซับ ซึ่งทำให้เกิดอันตรกิริยาทางเคมี หรือการดูดซับทางเคมี การดูดซับทางเคมีนี้จะทำให้เกิดผลที่แตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ โดยไม่เกิดการผันกลับหรือเกิดการผันกลับได้น้อยกว่า ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้อาจมีข้อดีหรือข้อเสียขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ใช้งาน

คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับนั้นมีความสำคัญ ตัวดูดซับอาจอยู่ในรูปแบบที่เป็นเม็ดหรือเป็นอนุภาค ซึ่งอาจมีความหนาแน่นใกล้เคียงหรือแตกต่างจากสารละลายมาก หรือตัวดูดซับอาจมีลักษณะเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจแขวนลอยได้ง่ายในสารละลาย คุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคตัวดูดซับนั้นมีผลอย่างมากต่อการเลือกนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับบางคุณสมบัติ เช่น พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และการกระจายตัวของพื้นที่ผิวที่ขนาดของรูพรุนต่าง ๆ ในอนุภาคมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยเป็นตัวกำหนดปริมาณความจุของตัวดูดซับที่ใช้งาน และขนาดโมเลกุลที่สามารถดูดซับได้

3. ลักษณะของสารละลาย (Characteristics of the Solution)

ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีผลต่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ทั้งตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับอาจมีลักษณะทางเคมีซึ่งได้รับผลจากความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในสารละลาย ตัวดูดซับบางตัวมีไอออนไฮโดรเจน หรือ ไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีผลต่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ความสามารถในการละลาย และค่าความจุของการดูดซับโดยตรง สำหรับการดูดซับตัวถูกดูดซับจากสารละลายในระบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจะมีความไวต่อค่าความเป็นกรด-เบสสูง ซึ่งตัว

ถูกดูดซับจะเลือกช่วงค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง และจุดที่เกิดการดูดซับ ได้สูงที่สุดนั้นเกิดจาก ความสามารถในการละลายที่ต่ำของตัวถูกดูดซับซึ่งเป็นสารที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนและสามารถเกิดการดูดซับกับตัวดูดซับที่ไม่มีขั้วได้

อุณหภูมิของสารละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ คือ อัตราของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลของสารจากสารละลายไปยังตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับและความสามารถในการดูดซับในทิศทางตรงข้ามกัน

ตัวถูกดูดซับอื่น ๆ อาจแข่งขันกับตัวถูกดูดซับที่สนใจในการเกิดการดูดซับบนตัวดูดซับใดๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการจับตัวแข่งขันกันระหว่างตัวถูกดูดซับ โดยเฉพาะเมื่อเกิดการดูดซับแบบกายภาพ ซึ่งผันกลับได้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางโครมาโตกราฟีเพื่อแยกสาร ต่าง ๆ ได้

2.4 คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) [20]

คาร์บอนกัมมันต์หรือถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปเป็นวัสดุที่ประกอบด้วย คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก จัดเป็นถ่านที่มีสมบัติพิเศษที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ เพื่อให้มีสมบัติหรืออำนาจในการดูดซับสูง เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก และขนาดรูพรุนก็แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีในการผลิตและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวดูดซับสารทั้งที่อยู่ในสถานะแก๊สและของเหลวในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด วัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบมักเป็นพวกอินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่มักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจากพืชและต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเช่น แกลบ กะลา มะพร้าว ชี้เลื่อย ชังข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจผลิตจากถ่านหินเช่น ลิกไนต์ แอนทราไซต์ เป็นต้น ส่วนวัตถุดิบที่มาจากสัตว์นั้นมีไม่มาก เช่น กระดุก หรือ เขาสัตว์ เป็นต้น

2.4.1 ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์

ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์สามารถแบ่งโดยใช้หลักต่างๆ ขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ ตัวอย่างการแบ่งชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ ได้แก่

2.4.1.1 แบ่งตามลักษณะรูปร่าง [21]

ก. ชนิดที่เป็นผงละเอียด ซึ่งสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้นำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว ได้แก่

- อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ใช้ในการฟอกสีและทำให้น้ำตาลบริสุทธิ์ขึ้น

- อุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันพืชสำหรับการบริโภค ใช้ในการฟอกสีและทำให้มีรสดีขึ้น
- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในการฟอกสีและดูดกลิ่น
- อุตสาหกรรมเครื่องคั้มและแอลกอฮอล์ เช่น วิสกี้ ไวน์ น้ำอัดลม ใช้ในการดูดกลิ่นและทำให้รสชาติดีขึ้น
- อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ เช่น น้ำคั้ม น้ำประปา

ข. ชนิดที่เป็นเม็ดหรือเกล็ด ซึ่งจะสามารถนำกลับมา Re-used เพื่อนำกลับมาใช้ในครั้งต่อไปได้ ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ขึ้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น

- อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศ ใช้ในการดูดแก๊สต่างๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย
- อุตสาหกรรมการทำน้ำอากาศป้องกันก๊าซพิษทั้งที่ใช้กัน โดยทั่วไปและในด้านการทหาร เพื่อการดูดซับแก๊สพิษและ ไอของสารพิษ
- อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมใยสังเคราะห์ อุตสาหกรรมการพิมพ์ เป็นต้น

• อุตสาหกรรมการผลิตบุหรี่บ้างยี่ห้อ เพื่อกรองแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ และน้ำมันดิน(tar) โดยนำถ่านกัมมันต์มาไว้ที่ก้นกรอง

2.4.1.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุน [22]

การแบ่งกลุ่มขนาดของรูพรุนแบ่งได้ตามระบบ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) เป็น 3 ประเภทดังตาราง 2.6

ตารางที่ 2.6 การแบ่งกลุ่มขนาดรูพรุนตามระบบ IUPAC

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

2.4.1.3 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ [23]

ก. คาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับแก๊ส ใช้ในการดูดซับแก๊สพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท Hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้ และถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูง

ข. คาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับสี ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นการเผาถ่านประเภท Soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากหินน้ำมัน และถ่านจากกากน้ำตาล

ค. คาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับสารประเภทโลหะ โดยใช้เป็นตัวแยกโลหะต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน พัลลัดินัมจากแร่

2.4.2 การผลิตคาร์บอนกัมมันต์ [24-26]

การผลิตคาร์บอนกัมมันต์มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่ต้องการ และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต วิธีการโดยทั่วไปประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้น (Activation)

2.4.2.1 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

ขั้นตอนนี้เป็นการนำวัตถุดิบมาเผาในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อย (Pyrolysis) ทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมี สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน และออกซิเจนจะออกมาในรูปของแก๊ส คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันเป็นผลึก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ขนาดของผลึกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผา องค์ประกอบ และโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อเผาวัตถุดิบ ผลึกคาร์บอนจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนโดยยึดเกาะกัน ในลักษณะหกเหลี่ยมด้วยพันธะ โคเวเลนต์ มีลักษณะคล้ายผลึกแกรไฟต์

ถ่านที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวจะมีสีดำตลอด เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา ปลายที่หักจะแหลมคม ปราศจากผงฝุ่นและเถ้า ถ่านที่ดีจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง และมีความชื้น สารระเหย เถ้า ในปริมาณที่น้อย ถ่านที่ได้จากขั้นตอนนี้จะมีความสามารถในการดูดซับต่ำมาก เพราะว่าการทำให้เป็นถ่านใช้อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส จึงยังคงมีน้ำมันดิน (Tar) ตกค้างอยู่ภายในรูพรุนหรือเกาะอยู่ตามผิว การนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.4.2.2 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้นเป็นขั้นตอนที่ทำให้ความพรุนและพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากน้ำมันดินถูกกำจัดให้หลุดออกมาด้วยวิธีการทางกายภาพหรือวิธีการทางเคมี ทำให้ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีอะตอมคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ด้วย จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น การกระตุ้นมี 2 วิธี คือการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ (Physical activation) และการกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical activation)

ก. การกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ

วิธีนี้ใช้แก๊สที่เป็นตัวออกซิไดส์ เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ หรืออากาศ ไปออกซิไดส์ น้ำมันดินและอะตอมของคาร์บอนบางตัวในโครงสร้างผลึก แก๊สที่เป็นตัวออกซิไดส์จะทำปฏิกิริยา

กับน้ำมันดินและอะตอมของคาร์บอน ทำให้น้ำมันดินถูกกำจัดออก คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จึงมีรูพรุนกว้างมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น

- การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation) ปฏิกริยานี้ใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดส์คาร์บอน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 760-950 องศาเซลเซียส อัตราการออกซิไดส์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะคาร์บอนที่อยู่ภายนอกจำนวนมากจะถูกเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิและความพรุนของอนุภาคลดลง

- การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide activation) ปฏิกริยานี้ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดส์และเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน ปฏิกริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า คือ ประมาณ 850-1,100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่จะสูงขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ด้วย ในการปฏิบัติทางเทคนิคแล้วจะใช้แก๊สเชื้อเพลิงเผาไหม้ซึ่งจะเกิดทั้งไอน้ำ คาร์บอน ไดออกไซด์และอาจมีออกซิเจนส่วนเกินบ้างเล็กน้อย หรืออาจเติมไอน้ำเข้าไปด้วยเพื่อเป็นการกระตุ้นโดยใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน

- การกระตุ้นด้วยอากาศ (Air activation) ปฏิกริยานี้ต้องอาศัยออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดส์คาร์บอน ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นปฏิกริยาคายความร้อน การใช้อากาศกระตุ้นใช้กันน้อยมาก ทั้งนี้เพราะการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยากกว่าปฏิกริยาดูดความร้อน อีกทั้งออกซิเจนจะทำให้ผิวของถ่านไหม้

การกระตุ้นทางกายภาพมีข้อดี คือ หลังจากกระตุ้นแล้วสามารถนำคาร์บอนกัมมันต์ไปใช้งานได้ทันที ส่วนข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าวิธีการกระตุ้นทางเคมี คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จะมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าชนิดที่ผลิตด้วยการกระตุ้นทางเคมี รูพรุนที่ได้เป็นแบบ ไมโครพอร์ เหมาะสำหรับดูดกลิ่น ไอ หรือแก๊สพิษ

ข. การกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี

วิธีนี้เป็นการนำวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบผสมกับสารเคมีที่เรียกว่า สารกระตุ้น (Activating agent) เมื่อให้ความร้อนสารกระตุ้นจะช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ปริมาณน้ำมันดินจะถูกกำจัดให้น้อยลง ปริมาณสารที่ระเหยได้ก็มีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเผาให้เป็นถ่านธรรมดา สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นส่วนใหญ่เป็นเกลืออนินทรีย์ ตัวอย่างสารกระตุ้น เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น

หลักการของวิธีนี้ คือ นำวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบผสมกับเกลืออนินทรีย์ด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ และเผาในที่อับอากาศ จะทำให้วัสดุอินทรีย์สลายตัว เกลืออนินทรีย์จะเป็นตัวเร่งปฏิกริยาการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และยังคงปริมาณน้ำมันดินและสารระเหยได้ เนื่องจากเกลืออนินทรีย์เหล่านี้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง จึงยังคงสภาพอยู่รอบๆ ผิวถ่านและแทรกอยู่ภายใน ทำให้การหดตัวของถ่านเกิดได้จำกัด เมื่อสกัดสารอนินทรีย์ออกก็จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนขึ้น

ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี คือ ใช้อุณหภูมิต่ำและได้ผลผลิตมากกว่าการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ ส่วนข้อเสีย คือ สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นมีราคาค่อนข้างแพง นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องล้างสารเคมีออกจากคาร์บอนกัมมันต์ไม่ให้เหลือตกค้างเพื่อความปลอดภัยก่อนนำไปใช้งาน

2.5 เมโซพอร์สคาร์บอน

เมโซพอร์สคาร์บอน หรือ รีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คาร์บอนเจลเป็นคาร์บอนที่มีคุณสมบัติมีความเป็นรูพรุนสูงและมีปริมาตรแบบเมโซพอร์หรืออาจเรียกว่า เมโซพอร์สคาร์บอน ซึ่งได้จากปฏิกิริยาโซลเจลพอลิคอนเดนเซชันของรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างรูพรุนของรีซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์คาร์บอนเจล มีอยู่หลายปัจจัย เช่น อัตราส่วนของสารตั้งต้น [27] ค่า pH [28] การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย [29] วิธีการทำให้แห้ง [30] อุณหภูมิของการไพโรไลซิส [31] เป็นต้น

2.5.1 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ [32]

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

ฟอร์มัลดีไฮด์หรือเมทานอลมีสูตรโมเลกุลเป็น CH_2O ความหลากหลายของอัตราส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะมีผลต่อคุณสมบัติของเจล

ตัวทำละลายที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำกลั่น หรือน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized water) หรืออาจจะเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น อะซีโตน เมทานอล เอทานอล นอร์มอลโพรพานอล เป็นต้น ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือโซเดียมคาร์บอเนต มีสมบัติเป็นเบสอ่อน

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

2.5.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน [32]

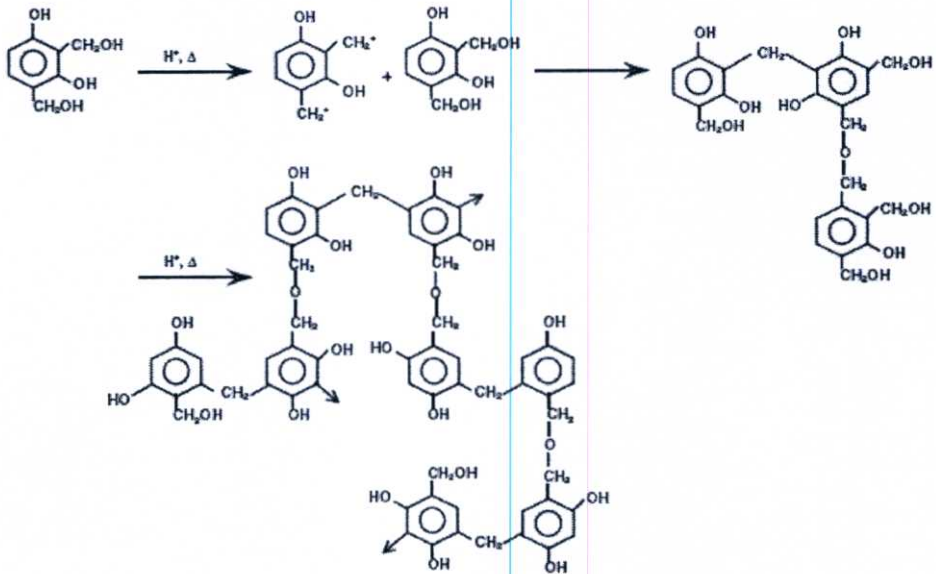
ขั้นตอนการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนประกอบด้วย กระบวนการเกิดเจล การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย การทำให้แห้ง และการไพโรไลซิส ตามลำดับ

ก. กระบวนการเกิดเจล

รีซอร์ซินอลจะเกิดปฏิกิริยาการเติม(Addition reaction) ด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ เกิดเป็นรีซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์มอนอเมอร์ (Resorcinol-formaldehyde monomer) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation reaction) ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเกิดเป็น โครงสร้างร่างแหของพอลิเมอร์ กลายเป็นคอลลอยด์ที่เรียกว่า โซล แล้วฟอร์มตัวกลายเป็นเจล เจลที่ได้มีโครงสร้างเป็นโซ่และเป็นวง แสดงดังรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเติม (Addition reaction) [32]



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation reaction) [32]

เมื่อเกิดเจลขึ้นแล้วเราจะต้องนำมาบ่มเพื่อทำให้เกิด โครงสร้างตาข่ายที่สมบูรณ์ โดยการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่มประมาณ 1 สัปดาห์ แต่ถ้ระยะเวลาบ่มมากกว่านี้ก็จะช่วยทำให้ปฏิกิริยาการเกิด โครงสร้างตาข่ายเกิดขึ้น ได้อย่างสมบูรณ์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของเจลแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของเจล [32]

ปัจจัย	ผลกระทบ
การลดความเข้มข้นของสารตั้งต้น	<ul style="list-style-type: none"> - ขนาดของอนุภาคและรูพรุนเล็กลง - เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของซีโรเจล - เพิ่มความจุทางไฟฟ้า
การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด	<ul style="list-style-type: none"> - เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ การกระจายตัวของขนาดรูพรุนจะกว้าง - เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูง การกระจายตัวของขนาดรูพรุนจะแคบ
การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง	<ul style="list-style-type: none"> - เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำ เจลที่ได้จะมีพื้นที่ผิวดำ อนุภาคมีขนาดใหญ่ และมีความแข็งแรงต่ำ - เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูง เจลที่ได้จะมีพื้นที่ผิวสูง อนุภาคเล็ก และมีความแข็งแรงสูง
การเพิ่มค่า pH	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และความจุทางไฟฟ้า โดยไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวของคาร์บอนซีโรเจล - เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูง เป็นการเพิ่มปริมาตรของรูพรุนของคาร์บอนซีโรเจล - ความจุทางไฟฟ้าของคาร์บอนซีโรเจล ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา
การเพิ่มอุณหภูมิ	<ul style="list-style-type: none"> - ทำให้เกิดเจลเร็วขึ้น

ข. การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

การแลกเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยลดแรงคาปิลารี (Capillary force) หรือแรงดึงผิวที่จะเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการทำให้แห้งได้ ทำได้โดยการเลือกตัวทำละลายอื่นที่มีค่าแรงดึงผิวที่มีค่าน้อยกว่าตัวทำละลายที่อยู่ในรูพรุนของเจล แม้ว่าการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายจะช่วยลดแรงคาปิลารีที่จะส่งผลกระทบต่อความเสียหายของโครงสร้างได้ แต่ก็ยังอาจเกิดแรงจากการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายทำให้โครงสร้างของเจลเกิดความเสียหายได้เช่นกัน ตัวอย่างตัวทำละลายที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ค่าแรงตึงผิวของตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส [33]

ตัวทำละลาย	ค่าแรงตึงผิว (dyne/cm)
น้ำ	67.74
อะซีโตน	21.14
เอทานอล	19.97
เทอร์ทิวทานอล	18.07

ค. การทำให้แห้ง

เจลที่เปียกสามารถทำให้กลายเป็นเจลที่แห้งได้โดยอาศัยวิธีการทำแห้งดังต่อไปนี้

- การให้แห้งแบบซูเปอร์คริติคอลล (Supercritical drying) เป็นวิธีการทำให้แห้งที่ภาวะเหนือวิกฤต ส่วนใหญ่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็นสารสกัดตัวทำละลายออกไปที่สภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งเจลที่เกิดขึ้นจะเรียกว่าแอโรเจล (Aerogel) ข้อดี คือสามารถรักษาโครงสร้างของเจลให้เหมือนก่อนทำแห้งมากที่สุด ทั้งยังได้ปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง ส่วนข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลานานในการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

- การทำให้แห้งแบบแช่แข็ง (Freeze drying) อาศัยหลักการระเหิด โดยทำให้ตัวทำละลายมีอุณหภูมิถึงจุดเยือกแข็งแล้วลดความดันจนเกิดการระเหิดของตัวทำละลายออกไป เรียกเจลที่เกิดขึ้นว่าไครโอเจล (Cryogel) ข้อดี คือ มีการหดตัวของเจลด้อย มีปริมาณเมโซพอร์สูง ส่วนข้อเสีย คือราคาสูงแต่น้อยกว่าการทำแห้งแบบซูเปอร์คริติคอลล และอาจเกิดปัญหากับโครงสร้างชั้นหากตัวทำละลายที่ใช้มีการขยายตัวสูงเมื่อเป็นของแข็ง

- การทำให้แห้งแบบซับคริติคอลล (Subcritical drying) เช่น การอบแห้ง (Evaporative drying) การทำให้แห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave drying) การทำให้แห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) เป็นต้น เรียกเจลที่เกิดขึ้นว่าซีโรเจล (Xerogel) ข้อดี คือ สะดวกและมีราคาถูกลง ส่วนข้อเสีย คือ เกิดการหดตัวสูง เกิดการพังของโครงสร้างรูพรุนเนื่องจากแรงคาปิลลารี

- การทำแห้งที่สภาวะสุญญากาศ (Vacuum drying) เป็นวิธีการหนึ่งของการทำแห้งแบบซับคริติคอลล เมื่อความดันลดลง ของเหลวจะเกิดการเปลี่ยนเฟสกลายเป็นไอ ทำให้ตัวทำละลายที่อยู่ในรูพรุนของเจลระเหยออกไป ข้อดี คือสามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง และมีความรวดเร็ว ส่วนข้อเสีย คือหากความดันลดลงอย่างรวดเร็วอาจส่งผลให้เกิดแรงคาปิลลารีสูง ทำให้โครงสร้างของซีโรเจลเสียหาย

ง. การไฟโรไลซิส

เป็นกระบวนการเปลี่ยนเจลให้เป็นคาร์บอนบริสุทธิ์ โดยการกำจัดสารประเภทออกไซด์ และไฮโดรเจนกลุ่มต่างๆ ที่อยู่ในเจลออกไป โดยใช้อุณหภูมิสูง ในสภาวะไร้อากาศ เกิดการหลุดออก

ของน้ำภายในโครงสร้างที่จับกันด้วยพันธะเคมี เป็นกระบวนการทางเคมีที่ผันกลับไม่ได้ โดยทั่วไป เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เจลที่ผ่านการทำไพโรไลซิสจะเรียกว่า คาร์บอนเจล เช่น เจลที่สังเคราะห์ จากรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ เมื่อผ่านการทำไพโรไลซิสจะเรียกว่า รีซอร์ซินอลฟอร์มัลดีไฮด์ คาร์บอนเจล โดยส่วนใหญ่การทำไพโรไลซิสนั้นจะใช้เตาเผา โดยขั้นตอนแรกจะให้เกิดเนื้อ เช่น ไนโตรเจน อาร์กอน หรือ ฮีเลียมผ่านในเตาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อไล่อากาศออกจากเตาเผา หลังจากนั้นจะเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 600-2100 องศาเซลเซียส โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการไพโรไลซิสนี้มีดังนี้

- อุณหภูมิ แบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงแรก อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ช่วงนี้สารที่ระเหยออกมามีส่วนมากเป็นความชื้นที่อยู่ในวัสดุ น้ำหนักลดลงไป 7 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ช่วงที่สองเป็นช่วงอุณหภูมิ 80-300 องศาเซลเซียส ช่วงนี้สารอินทรีย์จะระเหยออก น้ำหนักลดลงไป 3 เปอร์เซ็นต์โดยมวล และสุดท้ายช่วงอุณหภูมิ 300-750 องศาเซลเซียส น้ำหนักลดลงไป 36 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

- ขนาดของวัสดุที่จะทำการไพโรไลซิส มีผลโดยตรงคือ ถ้าวัสดุมีขนาดเล็กจะมีพื้นผิวมาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว กรณีที่วัสดุมีขนาดใหญ่ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิต่างกันไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้อัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์ไม่คงที่

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้

Ahmad A.L. และคณะ [34] ทำการศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับซิลิกา เจล (silica gel) และฟลอริซิล (Florasil) ในเบต้าแคโรทีนที่เจือจางด้วยสารละลายเอthin-เฮกเซน ให้มีความเข้มข้น 50-300 ppm โดยใช้ตัวดูดซับซิลิกา เจลปริมาณ 0.2 กรัม ส่วนฟลอริซิลใช้ปริมาณ 0.1 กรัม ต่อปริมาณสารละลายเบต้าแคโรทีน 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าซิลิกา เจล เข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนเมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง ส่วนฟลอริซิลเข้าสู่สมดุลการดูดซับเมื่อเวลาผ่านไป 32 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับพบว่าฟลอริซิลมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าซิลิกาเจล คือสามารถดูดซับได้ 86.207 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับ ส่วนซิลิกาเจลดูดซับได้ 25.316 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับ

Chan K.W. และคณะ [35] ศึกษาการดูดซับแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์ ได้แก่ ตัวดูดซับเรซิน HP-20, Exa 31, Exa32, และ Exa 50 ทำการทดลองโดยนำน้ำมันปาล์มดิบมาละลายในเฮกเซน ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผสมจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำสารละลายน้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้นของแคโรทีนแตกต่างกัน ใส่

ในหลอดแก้วทดลองที่มีเรซิน ปริมาณ 1 กรัม บรรจุอยู่ นำไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 70 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และ 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ Chan และคณะ ได้เปลี่ยนตัวทำละลายจากเฮกเซนเป็น ไอโซโพรพานอลแทน จากการทดลองพบว่า การใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายทำให้เกิดการดูดซับได้มากกว่าการใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายในเรซินทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้ ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแคโรทีนอยด์ได้ดีที่สุดโดยใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายคือ เรซิน HP-20 ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่ได้จากการใช้เรซิน HP-20 เป็นตัวดูดซับ เมื่อใช้เฮกเซนและไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายคือ 0.06 และ 0.325 มิลลิกรัมต่อกรัมเรซิน ตามลำดับ

Latip R.A. และคณะ [36] ได้ศึกษาการใช้ตัวดูดซับสังเคราะห์ชนิดต่างๆ ในการสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์ม โดยทดสอบความสามารถในการดูดซับ และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับระหว่างตัวดูดซับต่อน้ำมันปาล์มดิบ พบว่าตัวดูดซับ Diaion HP-20 และ SP 850 สามารถแยกแคโรทีนอยด์ได้ดีที่สุด ในขณะที่ SP 207 และ Relite Exa 31 มีความสามารถในการแยกต่ำมาก จากการผสมตัวดูดซับ Diaion HP-20 และ SP 850 เข้าด้วยกันพบว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดแคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ และอัตราส่วนที่เหมาะสมในการสกัดแคโรทีนอยด์ระหว่างตัวดูดซับต่อน้ำมันปาล์มดิบเป็น 4 ต่อ 1

Khoo L.E. และคณะ [37] ทำการศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนที่ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน โดยใช้ Bleaching earth เช่น tonsil, fuller's earth, kaolin และ silica เป็นตัวดูดซับ โดยเปรียบเทียบการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด พบว่า tonsil มีความสามารถในการดูดซับได้สูงสุด รองลงไปเป็น fuller's earth, silica และ kaolin ตามลำดับ ซึ่ง silica และ kaolin มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน ส่วน fuller's earth มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า silica และ kaolin ประมาณ 10 เท่า แต่จากการศึกษาพบว่าการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ Bleaching earth เป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากตัวดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไป สังเกตจากสีของตัวดูดซับหลังจากดูดซับเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเขียวออกดำ และการดูดกลืนแสงของสารเบต้าแคโรทีนหลังการดูดซับที่ความยาวคลื่น 453 นาโนเมตรลดลง และปรากฏพีคใหม่ขึ้นที่ความยาวคลื่น 330 นาโนเมตร และ 360 นาโนเมตร

ดวงใจ ตั้งวงศ์เจริญกิจ [38] ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเบต้าแคโรทีนจากน้ำมันปาล์มด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ คือ การใช้คาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการบำบัดด้วยสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันเป็นตัวดูดซับ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 1 ต่อ 4 โดยน้ำหนัก ภายใต้อุณหภูมิในการดูดซับ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการชะสารแคโรทีนออกจากคาร์บอนกัมมันต์ คือ ทำการชะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้โทลูอีนเป็นตัวชะ จากการ

ใช้สภาวะดังกล่าวสามารถสกัดสารแคโรทีนได้ผลดีผลกลับคืน 30 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าการเติม Tween 80 ในโทลูอีนทำให้การชะสารแคโรทีนเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 3

อุปกรณ์และการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ทำการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนเพื่อใช้ในการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ
2. ทำการทดลองศึกษาตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์และเมโซพอร์สคาร์บอน
3. ทำการทดลองศึกษาตัวทำละลายน้ำมันปาล์มดิบที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีน
4. ทำการทดลองศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ
5. ทำการทดลองศึกษาการคายซับเบต้าแคโรทีนออกจากตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์และเมโซพอร์สคาร์บอน

3.2 อุปกรณ์การทดลอง

1. ขวดแก้ว ขนาด 5 มิลลิลิตรและ 100 มิลลิลิตร
2. หลอดหยด
3. ขวดวัดปริมาตร
4. บีเปต
5. เครื่องชั่ง Mettler Toledo รุ่น AX 205 ที่มีความแม่นยำ ± 0.0001 กรัม
6. เครื่องเขย่า JANKE & KUNKEL รุ่น HS 500
7. เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) (Thermo Electron Corporation)
8. ตู้อบ
9. เครื่องอบแห้งแบบสูญญากาศ (vacuum dry)
10. เตาเผา
11. ถาดตะแกรงร่อน (sieve tray) ขนาด 12 และ 20 mesh
12. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
13. แท่งแก้วคนสาร
14. เครื่องดูดซับแก๊สไนโตรเจน (Micromeritics, ASAP 2020, Surface area and porosity analyzer)
15. เครื่อง scanning electron microscope (SEM) (JEOL รุ่น JSM-6400 scanning microscope)

3.3 สารเคมี

1. น้ำมันปาล์มดิบ
2. สารมาตรฐานเบต้าแคโรทีน 95%, รีซอร์ซินอล $\geq 99.0\%$, โซเดียมคาร์บอเนต 99.8% , เทอร์ทิวทานอล $\geq 99.0\%$ จากบริษัท Sigma – Aldrich Co., Ltd.
3. เมโซพอร์สคาร์บอน 12 ตัวอย่าง
4. คาร์บอนกัมมันต์ (Ac) ค่า Iodine Number =1150 จากบริษัทคาร์โบกาญจน์ ขนาด 12 ถึง 20 mesh
5. เฮกเซน, ไฮโครเฮกเซนเฮน, เอทานอล, บิวทิว-อะซิเตท, โทลูอิน, เบนซีน, เตตระไฮโดรฟูแรน เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Labscan Asia Co.,Ltd.
6. เฮกเซน เมทานอล เกรด HPLC จากบริษัท Labscan Asia Co.,Ltd.
7. ฟอรั่มลดีไฮด์ ความเข้มข้น 37.0% จากบริษัท Merck KGaA Co.,Ltd.
8. น้ำกลั่น
9. แก๊สไนโตรเจน 99.5%
10. น้ำมันถั่วเหลือง

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนด้วยวิธีการโซลเจล

ทำการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน 12 ตัวอย่าง คือ RF 1 ถึง RF 12 โดยมีอัตราส่วนของสารตั้งต้น ตัวทำละลาย และวิธีการอบแห้งที่ต่างกัน ตามตาราง 3.1 ซึ่งมีวิธีการสังเคราะห์ดังนี้

1. นำ รีซอร์ซินอล (R) น้ำ (W) โซเดียมคาร์บอเนต (C) และฟอรั่มลดีไฮด์ (F) มาผสมแล้วเขย่าให้เข้ากันลงในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปล่อยให้แห้งตัวเป็นเจลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 1 วัน 50 องศาเซลเซียส 1 วัน และ 90 องศาเซลเซียส 3 วัน
3. นำเจลที่ได้มาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วมาแลกเปลี่ยนด้วยตัวทำละลายเทอร์ทิวทานอล (TBA) หรือ อะซิโตน (Ace) หรือ เอทานอล (EtOH) ตามตารางที่ 3.1 จำนวน 6 ครั้ง ครั้งละ 1 วัน
4. จากนั้นนำเจลที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งแบบสูญญากาศ (Vacuum drying) เป็นเวลา 1 วัน หรือการอบแห้ง (Oven drying) เป็นเวลา 3 วัน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่อัตราการไหล 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะได้ เมโซพอร์สคาร์บอนออกมา
5. บดเมโซพอร์สคาร์บอนที่ได้เป็นชิ้นเล็กกลวงกว่าเดิม แล้วทำการคัดขนาดโดยถาดตะแกรงร่อน (sieve tray) ขนาด 12 ถึง 20 mesh ก่อนนำไปใช้ดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ

ตาราง 3.1 อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน

Sample	Solvent Exchange	Drying	C/W (mol/mol)	R / F (mol/mol)	R / C (mol/mol)	R/W (mol/cm ³)
RF 1	TBA	Vacuum dry	1000/0.25	0.5	1000	0.25
RF 2	EtOH	Vacuum dry	800/0.25	0.5	800	0.25
RF 3	TBA	Oven dry	800/0.25	0.5	800	0.25
RF 4	Ace	Oven dry	800/0.25	0.5	800	0.25
RF 5	EtOH	Oven dry	800/0.25	0.5	800	0.25
RF 6	TBA	Vacuum dry	500/0.5	0.5	500	0.50
RF 7	TBA	Vacuum dry	500/0.25	0.5	500	0.25
RF 8	TBA	Oven dry	500/0.25	0.5	500	0.25
RF 9	Ace	Oven dry	500/0.25	0.5	500	0.25
RF 10	ETOH	Oven dry	500/0.25	0.5	500	0.25
RF 11	TBA	Vacuum dry	200/0.5	0.5	200	0.50
RF 12	TBA	Vacuum dry	200/0.25	0.5	200	0.25

3.4.2 วิธีการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับ

1. นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยเฮกเซน โดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 50 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 5 มิลลิลิตร ปริมาณ 2 กรัม
 2. ชั่งคาร์บอนกัมมันต์ ปริมาณ 0.05 กรัม เติมลงในขวดที่ชั่งน้ำมันไว้ แล้วไล่อากาศด้านบนขวดด้วยไนโตรเจน ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน พร้อมปิดด้วยฝาขวด
 3. นำขวดตัวอย่างไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บขวดตัวอย่างออกจากเครื่องเขย่าที่เวลา 24 ชั่วโมง
 4. แยกสารละลายน้ำมันปาล์มออกจากคาร์บอนกัมมันต์ แล้วนำสารละลายน้ำมันปาล์มที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนออกซ์หลังจากการดูดซับ โดยใช้เครื่อง HPLC
- ทำการทดลองซ้ำเหมือนที่กล่าวไปข้างต้น แต่เปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์ เป็นเมโซพอร์สคาร์บอน 12 ตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นมา

3.4.3 วิธีหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.4.2 โดยเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายน้ำมันปาล์มดิบจากเฮกเซนเป็นไอโซโพรพานอล แล้วทำการเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.4 วิธีหาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีน

1. นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยไอโซโพรพานอล โดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 50 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 5 มิลลิลิตร ปริมาณ 2 กรัม
2. ชั่งคาร์บอนกัมมันต์และเมโซพอร์สคาร์บอน RF 7, RF 8 และ RF 9 ปริมาณ 0.05 กรัม เติมลงในขวดที่ชั่งน้ำมันไว้ แล้วไล่อากาศด้านบนขวดด้วยไนโตรเจน และปิดด้วยฝาขวดป้องกันการเกิดออกซิเดชัน
3. นำขวดตัวอย่างไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บขวดตัวอย่างออกจากเครื่องเขย่าที่เวลา 1, 5, 10, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ
4. แยกสารละลายน้ำมันปาล์มออกจากตัวดูดซับ แล้วนำสารละลายน้ำมันปาล์มที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์หลังจากการดูดซับ โดยใช้เครื่อง HPLC

$$q_A = \left[\frac{(C_{A0} - C_{Ai})}{m \times d \times 1000} \right] \times m_{\text{sol}} \quad 3.1$$

- โดยที่ q_A = ปริมาณของเบต้าแคโรทีนที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัมตัวดูดซับ)
- C_{A0} = ความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
- C_{Ai} = ความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัม/ลิตร)
- m = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)
- m_{sol} = น้ำหนักของสารละลายน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)
- d = ความหนาแน่นของสารละลายน้ำมันปาล์มดิบ (กรัม/มิลลิลิตร)

3.4.5. วิธีการกายซั้บเบต้าแคโรทีน

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 การดูดซั้บ

1. นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยไอโซโพรพานอล โดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 50 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 5 มิลลิลิตร ปริมาณ 2 กรัม จำนวน 6 ขวด
2. ชั่งเมโซพอร์สคาร์บอน RF 7, RF 8, RF 9 และ RF 10 ปริมาณ 0.05 กรัม เติมลงในขวดที่ชั่งน้ำมันไว้ แล้วไล่อากาศด้านบนขวดด้วยไนโตรเจน และปิดด้วยฝาขวดป้องกันการเกิดออกซิเดชัน
3. นำขวดตัวอย่างไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บขวดตัวอย่างออกจากเครื่องเขย่าที่เวลา 24 ชั่วโมง
4. หลังจากดูดซั้บแล้วนำตัวดูดซั้บเมโซพอร์สคาร์บอนมาล้างด้วยสารละลายไอโซโพรพานอล 2 มิลลิลิตร 3 ครั้ง
5. นำสารละลายไอโซโพรพานอลที่ล้างเมโซพอร์สคาร์บอนไปวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนโดยใช้เครื่อง HPLC

ขั้นตอนที่ 2 การกายซั้บ

1. นำเมโซพอร์สคาร์บอนที่ล้างแล้วมาทำการกายซั้บด้วยสารละลาย cyclo hexane, n-butyl acetate, toluene, ethanol, benzene, tetrahydrofuran และ น้ำมันถั่วเหลือง ปริมาณ 2 กรัม
2. เขย่าด้วยอัตราเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำสารละลายที่กายซั้บไปวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีน โดยใช้เครื่อง HPLC

$$\text{ปริมาณที่กายซั้บ (mg)} = \frac{\text{ปริมาณการกายซั้บ (mg/L)} \times \text{ปริมาณตัวทำละลาย (g)}}{1000 \times \text{ความหนาแน่นตัวทำละลาย}} \quad 3.2$$

3.4.6. การทำกราฟมาตรฐานสารละลายเบต้าแคโรทีน

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนเข้มข้น 500 ppm โดยชั่งสารมาตรฐานเบต้าแคโรทีนปริมาณ 0.025 กรัม เติมหะเสนเป็นตัวทำละลาย นำสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมหะเสนจนมีปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าจนเป็นเนื้อเดียวกัน
2. เตรียมสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนเข้มข้น 100, 200, 300 และ 400 ppm โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนในข้อ 1 ปริมาณ 2, 4, 6 และ 8 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร

ขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรสารละลายแต่ละขวดให้ได้ 10 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนตามลำดับที่กล่าวมา

3. นำสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่เตรียมที่ความเข้มข้นต่างๆ ไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC

4. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่พีคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC กับค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีน

3.4.7. การวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนโดยใช้เครื่อง HPLC

1. กรองสารที่ต้องการวิเคราะห์ผ่าน Syring filters ที่มีขนาดของรูที่สารผ่านได้เท่ากับ 0.45 ไมโครเมตร และนำสารที่ทำการกรองแล้วไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC

2. อุปกรณ์และสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์

คอลัมน์ : ODS-2-HYPERSIL

เครื่องตรวจวัด : UV-Visible ที่ค่าความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร

สารตัวพา : เมทานอล : เฮกเซน 85 : 15 v/v

อัตราการไหลของสารตัวพา : 1 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาณสารที่ใช้ในการวิเคราะห์ : 20 ไมโครลิตร

3.4.8. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ

ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุน และรูปร่างของรูพรุนด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) [39] โดยใช้เครื่องรุ่น Micromeritics, ASAP 2020, Surface area and porosity analyzer โดย

หาพื้นที่ผิวจำเพาะ จาก Single point surface area

หาปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์ (V_{mc}) การกระจายตัวของรูพรุน จากสมการบีเจเอช (BJH) [40]

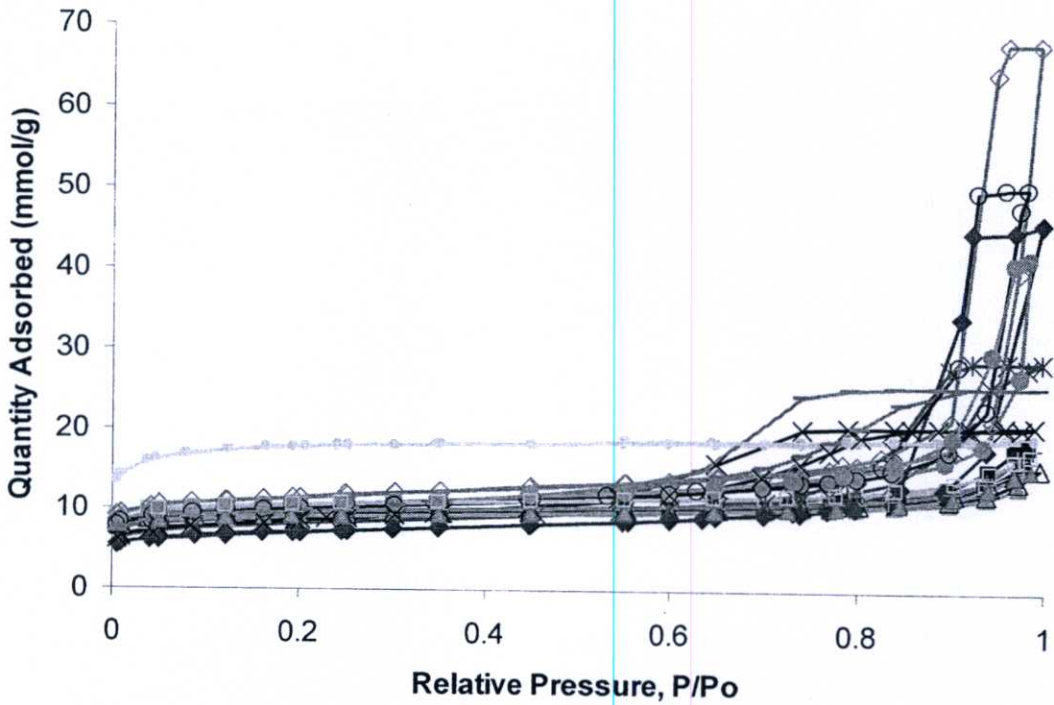
หาปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ (V_{mi}) ด้วยวิธีทีพล็อต (t-plot method) [41]

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

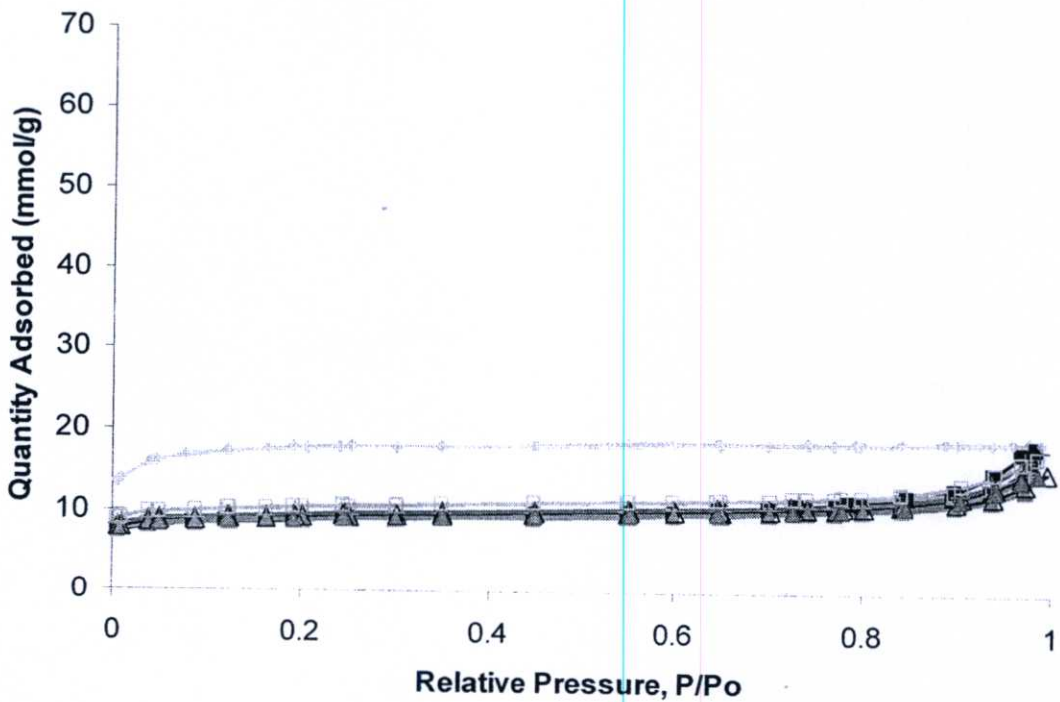
4.1 การสังเคราะห์เมโซพอร์รัสคาร์บอนเพื่อใช้ในการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า (Ac) และเมโซพอร์รัสคาร์บอน 12 ตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้น โดยมีอัตราส่วนของปริมาณสารตั้งต้นต่างกัน เมื่อพิจารณาไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 องศาเซลวิน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของไนโตรเจนที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ของแก๊สไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 4.1 สามารถแยกพิจารณาไอโซเทอร์มของตัวดูดซับที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันออกเป็น 3 รูป คือ รูปที่ 4.2 - 4.4 และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดรูพรุนโดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของการคายซับแก๊สไนโตรเจนกับรัศมีของรูพรุน แสดงดังรูป 4.5 และสามารถแยกพิจารณาตัวดูดซับที่มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนใกล้เคียงกันได้ดังรูปที่ 4.6-4.8 ทำการวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ Ac และตัวดูดซับ RF 1 ถึง RF 12 ได้แก่ ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์และเมโซพอร์ ด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) โดยปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะคำนวณจาก Single point surface area ปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์ (V_{me}) และปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ (V_{mi}) คำนวณจากสมการบีเจเอช (BJH) และวิธีที่พล็อตตามลำดับ และได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1



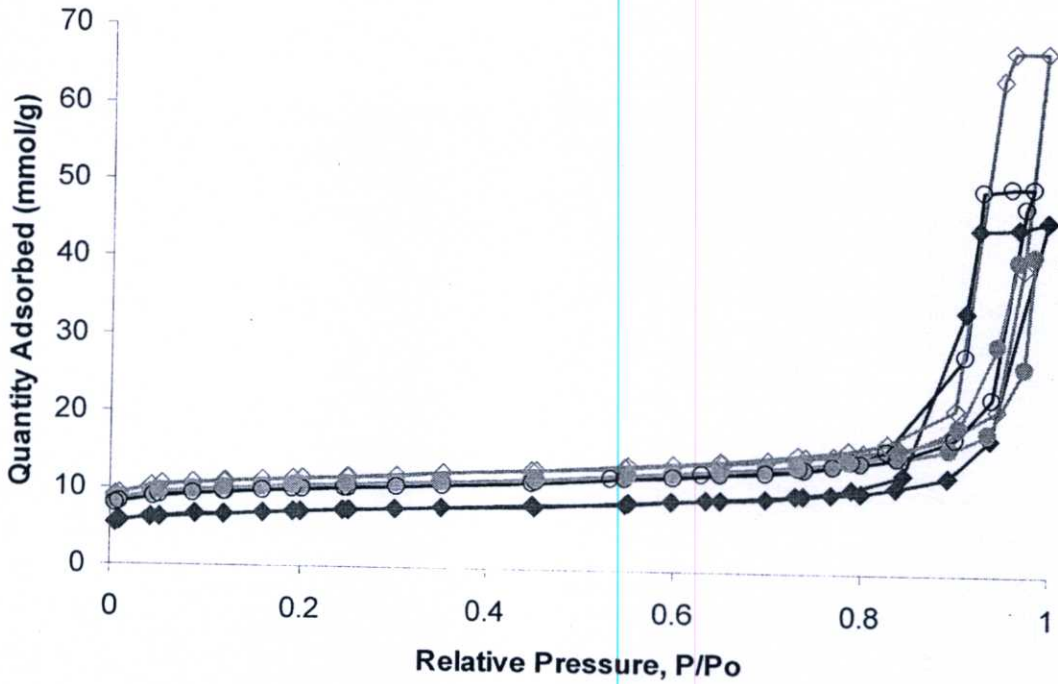
รูปที่ 4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ Ac และ RF 1- RF 12

โดยที่ * คือ Ac ■ คือ RF 1 □ คือ RF 2 ▲ คือ RF 3 △ คือ RF 4 + คือ RF 5 * คือ RF 6
 ◆ คือ RF 7 ◇ คือ RF 8 ● คือ RF 9 ○ คือ RF 10 X คือ RF 11 - คือ RF 12

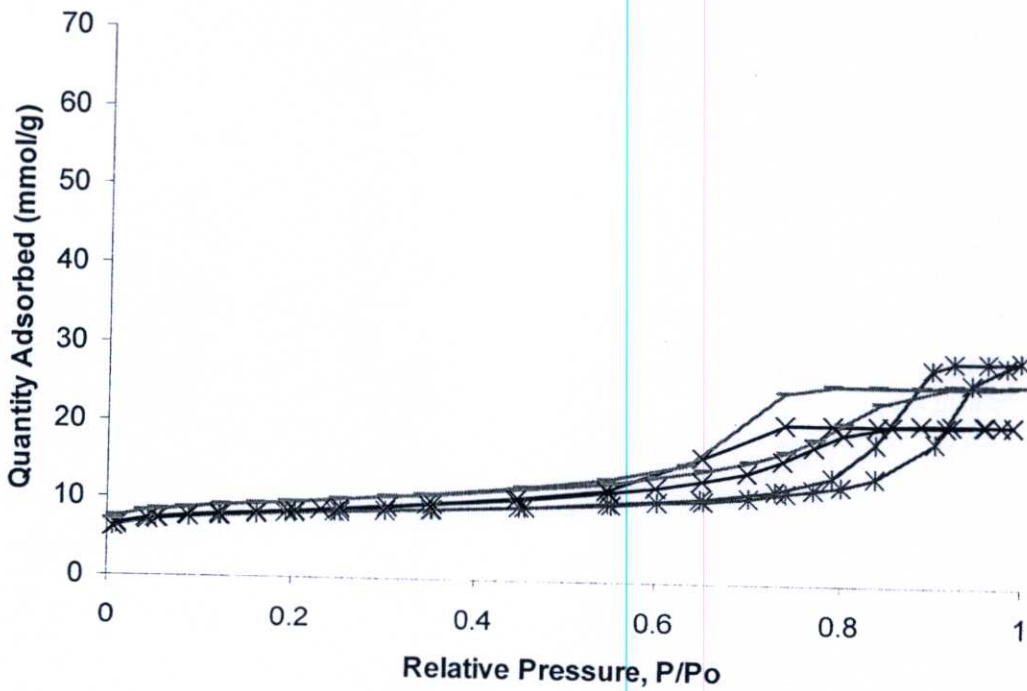


รูปที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ Ac และ RF 1- RF 5

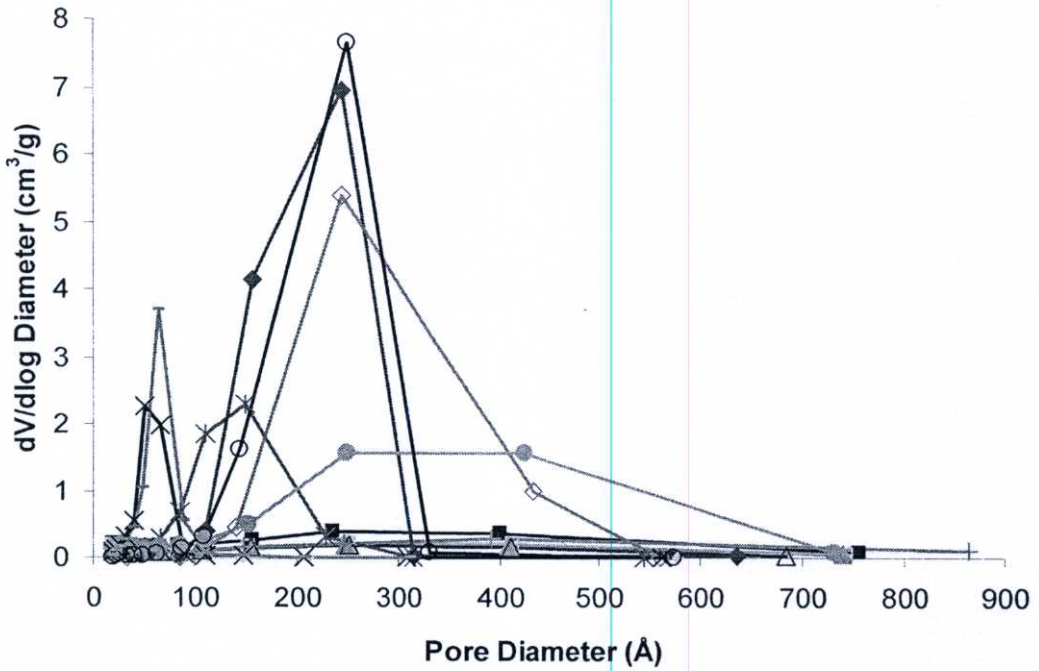
โดยที่ * คือ Ac ■ คือ RF 1 □ คือ RF 2 ▲ คือ RF 3 △ คือ RF 4 + คือ RF 5



รูปที่ 4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 7 - RF 10 โดยที่ \blacklozenge คือ RF 7 \diamond คือ RF 8 \bullet คือ RF 9 \circ คือ RF 10

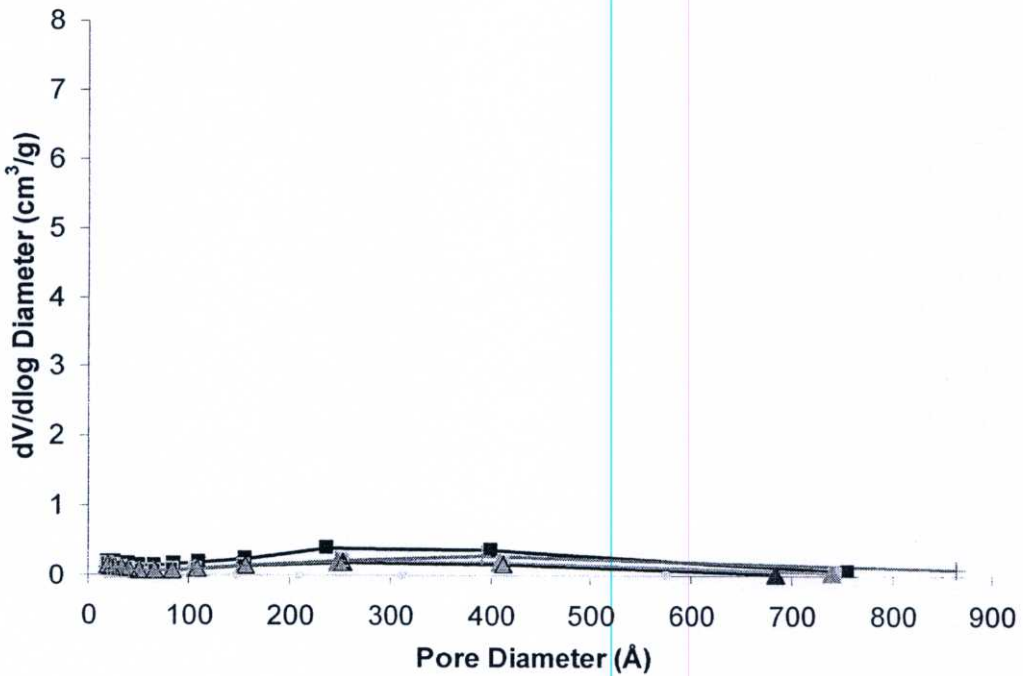


รูปที่ 4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สในโตรเจนของตัวดูดซับ RF 6 และ RF 11 - RF 12 โดยที่ * คือ RF 6 X คือ RF 11 - คือ RF 12



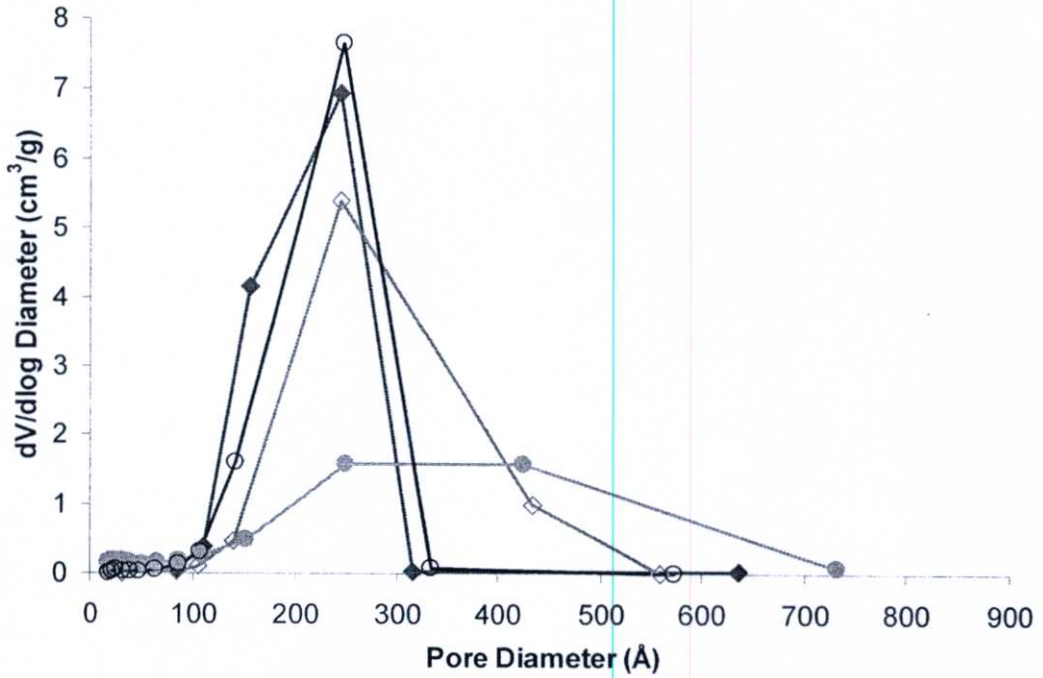
รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ Ac และ RF 1- RF 12 โดยที่

* คือ Ac ■ คือ RF 1 □ คือ RF 2 ▲ คือ RF 3 △ คือ RF 4 + คือ RF 5 * คือ RF 6
 ◆ คือ RF 7 ◇ คือ RF 8 ● คือ RF 9 ○ คือ RF 10 × คือ RF 11 - คือ RF 12



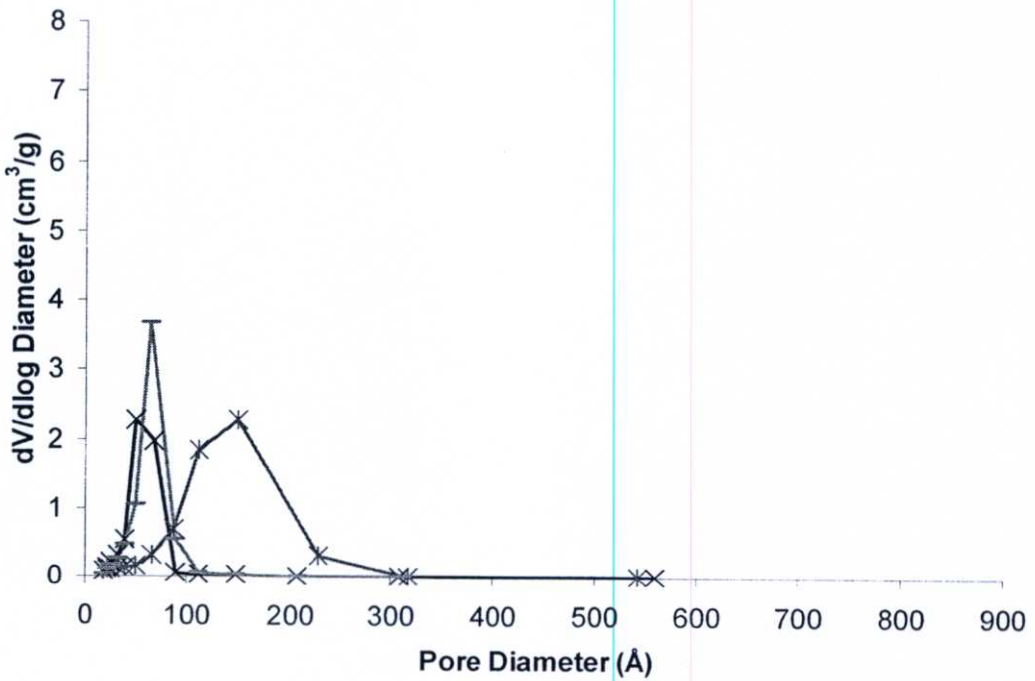
รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ Ac และ RF 1 - RF 5 โดยที่

* คือ Ac ■ คือ RF 1 □ คือ RF 2 ▲ คือ RF 3 △ คือ RF 4 + คือ RF 5



รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ RF 7 - RF 10 โดยที่

◆ คือ RF 7 ◇ คือ RF 8 ● คือ RF 9 ○ คือ RF 10



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ RF 6, RF 11 และ RF 12 โดยที่

* คือ RF 6 x คือ RF 11 - คือ RF 12

ตาราง 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ Ac และตัวดูดซับ RF 1 ถึง RF 12

Sample	Average diameter (Å)	Surface Area (m ² /g)	Micropore Volume (cm ³ /g)	Mesopore Volume (cm ³ /g)
Ac	19.8	991.3	0.39	0.10
RF 1	236.0	625.8	0.22	0.41
RF 2	251.8	590.3	0.23	0.24
RF 3	247.6	503.3	0.20	0.22
RF 4	252.1	523.8	0.20	0.22
RF 5	291.1	536.8	0.21	0.29
RF 6	150.0	587.5	0.16	0.87
RF 7	244.2	515.8	0.14	1.50
RF 8	244.7	657.0	0.29	1.73
RF 9	250.4	597.3	0.19	0.99
RF 10	248.8	574.5	0.18	1.26
RF 11	50.6	628.4	0.14	0.65
RF 12	64.8	710.3	0.16	0.81

รูปที่ 4.1 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ Ac และ ตัวดูดซับ RF 1 ถึง RF 12 เพื่อความสะดวกในการพิจารณาจะแยกตัวดูดซับที่มีไอโซเทอร์มลักษณะคล้ายกันไว้ด้วยกันตามรูปที่ 4.2-4.4 จากรูปที่ 4.1 พบว่าตัวดูดซับ Ac มีขนาดรูพรุนส่วนใหญ่เป็นไมโครพอร์พิจารณาได้จากเส้นกราฟของการดูดซับและการคายซับของแก๊สไนโตรเจนซ้อนทับกันเกือบทั้งหมด ส่วนตัวดูดซับ RF 1 ถึง RF 5 มีรูพรุนขนาดเมโซพอร์เพียงเล็กน้อย จากข้อมูลฮิสเทอรีซิสลูปที่มีขนาดเล็กในช่วง P/P₀ สูง และพบว่าตัวดูดซับ RF 6 ถึง RF 12 มีไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนเป็นชนิดที่ 4 (Type 4) [42] ตามระบบ IUPAC ซึ่งมีขนาดรูพรุนทั้งแบบไมโครพอร์และเมโซพอร์ เนื่องจากที่ค่า P/P₀ มาก จะเกิดการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบคาปิลลารี ทำให้ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิสลูปขึ้น ซึ่งเกิดจากเส้นกราฟของการดูดซับและการคายซับไม่ทับกัน เพราะการคายซับเกิดได้ยากกว่าเนื่องจากต้องเอาชนะแรงคาปิลลารี และจากไอโซเทอร์มการดูดซับแสดงให้เห็นอีกว่าตัวดูดซับ RF 8 มีปริมาตรรูพรุนมากที่สุด

จากรูปที่ 4.5 แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ Ac และ RF 1- RF 12 พบว่าตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ตัวทำละลายเทอร์ทิวทานอลเหมือนกันและใช้

วิธีการทำให้แห้งด้วยวิธีการทำให้แห้งแบบสูญญากาศเช่นเดียวกัน แต่มีอัตราส่วนของปริมาณสารตั้งต้น(R/C) ต่างกัน ได้แก่ตัวดูดซับ RF 1, RF 7 และ RF 12 โดยมีอัตราส่วน R/C เป็น 1000, 500 และ 200 ตามลำดับ พบว่าเมื่ออัตราส่วนของปริมาณสารตั้งต้นลดลง ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ยมีขนาดเล็กลง โดยเจลที่ได้จากการเตรียมสารละลายตั้งต้นที่มีอัตราส่วน R/C เท่ากับ 1000 จะมีขนาดของอนุภาคเจลขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมาเป็นตัวดูดซับที่มีอัตราส่วน R/C เท่ากับ 500 และตัวดูดซับที่มีอัตราส่วน R/C เท่ากับ 200 มีขนาดของอนุภาคเจลขนาดเล็กที่สุด แสดงว่าอัตราส่วนของปริมาณสารตั้งต้นมีผลต่อโครงสร้างของรูพรุน และจากรูปที่ 4.5 ยังพบว่าตัวดูดซับ RF1 -RF 5 และ RF 9 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนกว้างมากคือตั้งแต่ประมาณ 19 อังสตรอมจนถึงประมาณ 750 อังสตรอม แสดงว่าตัวดูดซับ RF 1-RF 5 และ RF 9 มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์ไปจนถึงรูพรุนขนาดมาโครพอร์ และจากรูปแสดงให้เห็นว่า RF 1-RF 5 มีปริมาตรรูพรุนน้อยกว่า RF 9 มาก

ตัวดูดซับ RF 6 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงเมโซพอร์ต้นๆ คือตั้งแต่ 20-300 อังสตรอม

ตัวดูดซับ RF 7 และ RF 10 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนใกล้เคียงกัน ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเมโซพอร์ ตั้งแต่ 100-320 อังสตรอม

ตัวดูดซับ RF 8 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ในช่วงเมโซพอร์ตั้งแต่ 100-550 อังสตรอม โดยมีรูพรุนขนาดมาโครพอร์ (>500 อังสตรอม) ด้วยเล็กน้อย

ตัวดูดซับ RF 11 และ RF 12 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนใกล้เคียงกัน และมีขนาดรูพรุนค่อนข้างสม่ำเสมอ อยู่ในช่วง 20-100 อังสตรอม

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ Ac และตัวดูดซับ RF 1 - RF 12 พบว่าตัวดูดซับ Ac มีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวดูดซับ RF 1 - RF 12 ทั้งนี้เนื่องจากตัวดูดซับ Ac มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นแบบไมโครพอร์ ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก เมื่อพิจารณาตัวดูดซับประเภทเมโซพอร์สคาร์บอนพบว่าตัวดูดซับ RF 12 มีพื้นที่ผิวมากที่สุด และยังพบว่าตัวดูดซับ RF 8 มีปริมาตรเมโซพอร์มากที่สุด รองลงมาคือ RF 7 และ RF 10 ตามลำดับ ส่วนตัวดูดซับ RF 2 - RF 5 มีปริมาตรไมโครพอร์และปริมาตรเมโซพอร์ใกล้เคียงกัน

4.2 ศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ

ศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบระหว่างตัวทำละลายชนิดมีขั้วและไม่มีขั้ว โดยตัวทำละลายที่ใช้เป็นตัวแทนตัวทำละลายมีขั้ว ได้แก่ ไอโซโพรพานอล ส่วนตัวทำละลายที่ใช้เป็นตัวแทนตัวทำละลายไม่มีขั้ว ได้แก่ เฮกเซน ทำการเตรียมน้ำมันปาล์มดิบให้มีความเข้มข้นร้อยละ 50 ด้วยตัวทำละลายไอโซโพรพานอล หรือเฮกเซน ใช้อัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับต่อสารละลายน้ำมันปาล์มดิบเป็น 0.05 กรัม ต่อ 2 กรัม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลดังตารางที่ 4.2

เมื่อพิจารณาผลการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันปาล์มดิบที่ละลายในไอโซโพรพานอลกับที่ละลายในเฮกเซน พบว่าตัวดูดซับทุกตัวสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยไอโซโพรพานอล ได้มากกว่า เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบประกอบด้วยโมเลกุลกลีเซอไรด์ของกรดไขมันที่มีส่วนของไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก การมีส่วนของโมเลกุลที่เป็นไฮโดรคาร์บอนนี้ทำให้น้ำมันปาล์มดิบเป็นโมเลกุลที่แสดงความไม่มีขั้ว แต่อย่างไรก็ตาม โมเลกุลของกลีเซอไรด์ในน้ำมันยังประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของเอสเทอร์ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงความมีขั้วปานกลาง ดังนั้นการเจือจางน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวทำละลายไอโซโพรพานอลซึ่งเป็นตัวทำละลายที่มีขั้ว ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำมันปาล์มดิบให้แสดงความมีขั้วเพิ่มมากขึ้น เบต้าแคโรทีนที่เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วจึงมีความแตกต่างของความมีขั้วในโมเลกุลต่างจากน้ำมันปาล์มดิบมากขึ้น การที่โมเลกุลของเบต้าแคโรทีนจะเกิดการดูดซับบนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์หรือตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ไม่มีขั้วจึงเกิดได้ดีกว่าในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ในขณะที่เฮกเซนเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วทำให้ไม่สามารถเหนี่ยวนำโมเลกุลของกลีเซอไรด์ให้แสดงความมีขั้วเพิ่มขึ้น โมเลกุลของกลีเซอไรด์จึงอาจถูกดูดซับได้บางส่วน ทำให้ดูดซับเบต้าแคโรทีนได้ลดลง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายน้ำมันปาล์มดิบเพื่อศึกษาสมมูลการดูดซับเบต้าแคโรทีน

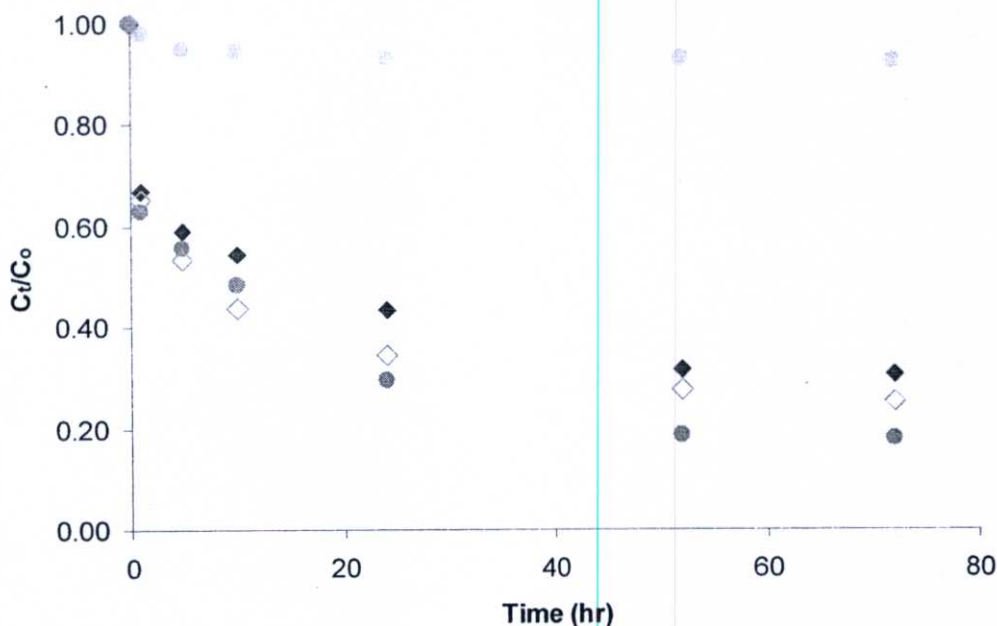
ตารางที่ 4.2 ปริมาณเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่ถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ ที่เวลา 24 ชั่วโมง

Sample	ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ถูกดูดซับ (mg/g)	
	ในตัวทำละลายเฮกเซน	ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล
Ac	0.98	1.08
RF 1	3.68	5.11
RF 2	5.75	6.10
RF 3	3.78	4.46
RF 4	4.29	5.29
RF 5	4.07	5.30
RF 6	5.41	5.86
RF 7	7.42	8.04
RF 8	8.27	8.33
RF 9	8.43	8.94
RF 10	8.00	8.25
RF 11	6.30	6.51
RF 12	7.03	7.14

4.3 ศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ

การศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนของตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน RF 7, RF 8 และ RF 9 ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบได้ปริมาณมาก จึงใช้เป็นตัวแทนของเมโซพอร์สคาร์บอนเพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ Ac โดยใช้อัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับต่อสารละลายน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยไอโซโพรพานอล เข้มข้นร้อยละ 50 เป็น 0.05 กรัมต่อ 2 กรัม อัตราเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 5, 10, 24, 52 และ 72 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าอัตราการดูดซับเบต้าแคโรทีนของคาร์บอนกัมมันต์ เริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ส่วนอัตราการดูดซับเบต้าแคโรทีนของตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน RF 7, RF 8 และ RF 9 เริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 72 ชั่วโมง การที่ตัวดูดซับ Ac เข้าสู่สมดุลการดูดซับเร็วกว่าตัวดูดซับ RF 7, RF 8 และ RF 9 เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์เป็นส่วนใหญ่มวมถึงมีปริมาตรรูพรุนน้อยทำให้เบต้าแคโรทีนซึ่งเป็นสารที่มีขนาดใหญ่ ถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนได้ในปริมาณที่จำกัด ส่วนเมโซพอร์สคาร์บอนทั้ง 3 ตัว ซึ่งมีรูพรุนขนาดทั้งไมโคร

พอร์ เมโซพอร์ ไปจนถึงมาโครพอร์ รวมทั้งมีปริมาตรรูพรุนมากกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จึงทำให้ใช้เวลามากกว่าในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับ แม้ว่าจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนานกว่า แต่การที่ตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนมีรูพรุนขนาดใหญ่ และมีปริมาตรรูพรุนมากทำให้สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้มากกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์มาก



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ โดยที่

◆ คือ RF 7 ◇ คือ RF 8 ● คือ RF 9

4.4 ศึกษาตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ

จากผลการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบพบว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เข้าสู่สมดุลการดูดซับเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ส่วนเมโซพอร์สคาร์บอนเข้าสู่สมดุลการดูดซับเมื่อเวลาผ่านไป 72 ชั่วโมง ดังนั้นจึงทำการศึกษาหาตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเบต้าแคโรทีน ณ เวลาสมดุลที่แท้จริงคือ 72 ชั่วโมง ในน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยไอโซโพรพานอลเข้มข้นร้อยละ 50 โดยตัวดูดซับ Ac และตัวดูดซับ RF 1 ถึง RF 12 อัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับต่อน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยไอโซโพรพานอลเข้มข้นร้อยละ 50 เป็น 0.05 กรัม ต่อ 2 กรัม อัตราเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ได้ผลดังตารางที่ 4.4 พบว่าตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนทั้ง 12 ตัวอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นมา สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบได้มากกว่าคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้าเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากเบต้าแคโรทีนเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (17 อังสตรอม) แม้ว่าคาร์บอนกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวมาก แต่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าโมเลกุลของเบต้าแคโรทีนไม่มาก (19 อังสตรอม) เมื่อเกิดการดูดซับ เบต้าแคโรทีนเข้าไปในรูพรุนได้ยาก ทำให้เกิดการดูดซับได้น้อย ส่วนตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน RF 1 ถึง RF 12 มี

ขนาดรูพรุนทั้งแบบไมโครพอร์และเมโซพอร์ทำให้สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้มากกว่าตัวดูดซับ Ac โดยสามารถแบ่งกลุ่มเมโซพอร์สคาร์บอนที่มีความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกันออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มเมโซพอร์สคาร์บอนที่มีปริมาณเมโซพอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 0.2 - 0.4 ลูกบาศก์เซ็นติเมตรต่อกรัม ได้แก่ RF 1 - RF 5 สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้ปริมาณ 5.9 - 7.2 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับ

กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มเมโซพอร์สคาร์บอนที่มีปริมาณเมโซพอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 0.6 - 1.7 ลูกบาศก์เซ็นติเมตรต่อกรัม ได้แก่ RF 6 - RF 12 สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้ปริมาณ 8.8 - 10.6 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับ

พบว่าตัวดูดซับ RF 9 สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้ปริมาณมากที่สุดเป็น 10.6 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับ รองลงมาเป็น RF 8 ดูดซับได้ 10.30 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับ ส่วน RF 7 และ RF 10 ดูดซับได้ปริมาณมากใกล้เคียงกัน คือ 9.4 และ 9.3 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อ การดูดซับเบต้าแคโรทีนของตัวดูดซับ RF 7 - RF 10 พบว่า จากตาราง 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ พบว่าตัวดูดซับ RF 7 - RF 10 เป็นกลุ่มของตัวดูดซับที่มีปริมาณเมโซพอร์มาก จึงทำให้สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้ในปริมาณมาก แต่การที่ตัวดูดซับ RF 9 ซึ่งมีปริมาณเมโซพอร์น้อยกว่าตัวดูดซับ RF 7, RF 8 และ RF 10 แต่สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้ในปริมาณมากที่สุด ทั้งนี้เมื่อพิจารณารูป 4.7 แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุน พบว่าตัวดูดซับ RF 9 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงเมโซพอร์ที่มีขนาดใหญ่มากกว่า RF 7, RF 8 และ RF 10 จึงทำให้เบต้าแคโรทีน ซึ่งเป็นสารที่มีขนาดใหญ่ สามารถถูกดูดซับเข้าไปได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ดูดซับเบต้าแคโรทีนเข้าไปได้มากที่สุด ส่วน RF 8 ดูดซับได้รองลงมา เนื่องจากมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงเมโซพอร์ขนาดใหญ่รองลงมา จึงดูดซับได้รองลงมา ส่วนตัวดูดซับ RF 7 และ RF 10 ซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วงเมโซพอร์ที่มีขนาดเล็กกว่า จึงดูดซับได้ปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวดูดซับ RF 9 และ RF 8

ตารางที่ 4.3 ปริมาณเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่ถูกดูดซับโดยตัวดูดซับ ที่เวลา 72 ชั่วโมง

Sample	ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ถูกดูดซับ (mg/g)
Ac	1.07
RF 1	6.33
RF 2	7.16
RF 3	5.90
RF 4	7.00
RF 5	6.43
RF 6	8.76
RF 7	9.35
RF 8	10.30
RF 9	10.59
RF 10	9.32
RF 11	8.79
RF 12	9.14

4.5 การศึกษาการคายซับ

จากการศึกษาการคายซับเบต้าแคโรทีน โดยเลือกตัวดูดซับที่สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบได้มากที่สุด 4 ตัว ได้แก่ ตัวดูดซับ RF 7, RF 8, RF 9 และ RF 10 ทำการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับปริมาณ 0.05 กรัม ในสารละลายน้ำมันปาล์มดิบเข้มข้นร้อยละ 50 เจือจางด้วยตัวทำละลายไอโซโพรพานอลปริมาณ 2 กรัม อัตราเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแยกสารละลายน้ำมันปาล์มดิบออกจากตัวดูดซับ แล้วนำสารละลายน้ำมันปาล์มดิบไปวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน และทำการคายซับด้วยสารละลาย cyclo hexane, n-butyl acetate, toluene, ethanol, benzene, THF และน้ำมันถั่วเหลือง ปริมาณ 2 กรัม โดยใช้เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลดังตารางที่ 4.4 พบว่าตัวดูดซับที่นำมาศึกษาทุกตัวสามารถคายซับได้ด้วยโทลูอีนมากที่สุด รองลงมาคือน้ำมันถั่วเหลือง แต่เนื่องจากโทลูอีนเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูง ดังนั้นการคายซับด้วยน้ำมันถั่วเหลืองจึงมีความปลอดภัยมากกว่า เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป และจากตาราง 4.4 จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับ RF 10 สามารถคายซับด้วยน้ำมันถั่วเหลืองมากที่สุด รองลงมาเป็น RF 7 และ RF 8 ส่วน RF 9 คายซับเบต้าแคโรทีนได้ปริมาณน้อยที่สุด ดังนั้นในการศึกษารั้งนี้ ตัวดูดซับ RF 10 จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการสกัดเบต้าแคโรทีนจากน้ำมันปาล์มดิบมากที่สุด

เนื่องจากสามารถคายซับเบต้าแคโรทีนออกมาใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด การที่ตัวดูดซับ RF10 และ RF 7 จะสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้ในปริมาณน้อยกว่าตัวดูดซับ RF 8 และ RF 9 แต่สามารถคายซับเบต้าแคโรทีนออกมาได้ในปริมาณมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับดังรูปที่ 4.7 พบว่าตัวดูดซับ RF 7 และ RF 10 ซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนใกล้เคียงกัน และมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงเมโซพอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าตัวดูดซับ RF 8 และ RF 9 โดย Martin และ คณะ [43] ได้กล่าวไว้ว่าตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนที่มีรูพรุนขนาดเหมาะสมกับขนาดของสารที่ต้องการดูดซับในที่นี้หมายถึงตัวดูดซับ RF 7 และ RF 10 ในขั้นตอนของการดูดซับจะเกิดการควบแน่นในรูพรุน ส่งผลให้การคายซับเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ในขณะที่ตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุนใหญ่เกินไป อาจเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวจึงทำให้การคายซับเกิดขึ้นได้ยากกว่า

ตาราง 4.4 ปริมาณการคายซับเบต้าแคโรทีนจากตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	ตัวทำละลายที่ใช้ในการคายซับ	ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ถูกคายซับ (mg/g)
RF 7	cyclo hexane	6.67	0.12
	n-butyl acetate	7.01	0.13
	toluene	6.37	1.58
	ethanol	7.17	ไม่เกิดการคายซับ
	benzene	6.87	0.30
	THF	6.98	0.14
	น้ำมันถั่วเหลือง	7.08	0.98
RF 8	cyclo hexane	8.41	ไม่เกิดการคายซับ
	n-butyl acetate	8.10	ไม่เกิดการคายซับ
	toluene	8.61	1.31
	ethanol	8.51	ไม่เกิดการคายซับ
	benzene	8.78	0.11
	THF	8.38	ไม่เกิดการคายซับ
	น้ำมันถั่วเหลือง	8.36	0.75

ตาราง 4.4 ปริมาณการคายซ้บเบต้าแคโรทีนจากตัวคูดซ้บ (ต่อ)

ตัวคูดซ้บ	ตัวทำละลายที่ใช้ในการคายซ้บ	ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ถูกคูดซ้บ (mg/g)	ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ไม่เกิดการคายซ้บ (mg/g)
RF 9	cyclo hexane	9.20	ไม่เกิดการคายซ้บ
	n-butyl acetate	9.39	ไม่เกิดการคายซ้บ
	toluene	9.53	1.03
	ethanol	9.28	ไม่เกิดการคายซ้บ
	benzene	9.72	0.09
	THF	9.26	ไม่เกิดการคายซ้บ
	น้ำมันถั่วเหลือง	9.46	0.40
RF 10	cyclo hexane	6.59	0.10
	n-butyl acetate	6.33	0.11
	toluene	6.72	1.61
	ethanol	6.98	ไม่เกิดการคายซ้บ
	benzene	6.36	0.19
	THF	7.00	0.13
	น้ำมันถั่วเหลือง	7.12	0.94

เอกสารอ้างอิง

- [1] Slattery, M.L., Benson J., Curtin K., Ma K.N., Schaeffer D. and Potter J.D., "Carotenoids and colon cancer.", American Journal of Clinical Nutrition, Vol. 71, 2000, pp. 575-582.
- [2] Goh, S.H., "Carotene controversy.", Malaysian Oil Science and Technology, Vol. 5, 1996, pp.17.
- [3] Walton, J., "On The Mechanism of β -Carotene Conversion to Vitamin A.", Nutrition Reviews., Vol.6, 1988, pp. 327-329.
- [4] Swoboda, P.A.T., "Chemical of Refining.", Journal of The American Oil Chemistry Society, Vol 62, 1985, pp. 287-298.
- [5] Hermann Stage., "The Physical Refining Process.", Journal of The American Oil Chemistry Society, Vol. 62, 1985, pp. 299-330
- [6] Boon S.C., Sosaku I, Sumiyo K and Mitsutoshi N., "Preparation of Protein-Stabilized β -Carotene Nanodispersions by Emulsification–Evaporation Method." , Journal of The American Oil Chemistry Society, 2007, pp. 1053-1062
- [7] Beta-Carotene [online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Beta-Carotene>
- [8] Marty, C., and Berset, C., "Factor Effecting The Thermal Degradation of All-Trans- β -carotene.", Journal of Agricultural and Food Chemistry, Vol. 38, 1980, pp. 1063-1067
- [9] ศิริวรรณ สุทธิจิต, "วิตามิน อาหาร ยาและเครื่องสำอาง.ภาควิชาเภสัช คณะเภสัชศาสตร์" มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547.
- [10] Neal, E.C, Joseph H.S., "Relative Solubility and Absorptivity of Lutein and β -carotene in Organic Solvent.", Journal of Agricultural and Food Chemistry, Vol 40, 1992, pp. 431-434
- [11] จุกเริ่มต้น [online]. Available : <http://www.sportronfamily.com/images/1210824048/ConsumerGuide1IssueJune2008.doc>
- [12] ยุวดี จอมพิทักษ์, "เบต้าแคโรทีน เสริมความสมบูรณ์แข็งแรงแห่งสตรีระ สารอาหารที่มีเกราะป้องกันมะเร็ง", กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์น้ำฝน, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2545, 262 หน้า.
- [13] ธีระ เอกสมทราเมษฐ์ ชัยรัตน์ นิลนนท์ ธีระพงศ์ จันทรนิยม ประกิจ ทองคำ และ สมเกียรติ สีสนอง, "เส้นทางสู่ความสำเร็จ : การผลิตปาล์มน้ำมัน.", ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตปาล์มน้ำมัน คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2548.
- [14] Choo Yuen May., " Palm oil carotenoids. ", Food and nutrition bulletin, Vol 15, No. 2, June 1993/1994.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] Puah Chiew Wei., “Supercritical Fluid Extraction of Palm Carotenoids.”, American Journal of Environmental Sciences, Vol 4, No. 1, 2005, pp.264-269
- [16] Palm oil [Online]. Available : http://www.en.wikipedia.org/wiki/Palm_oil. 2007
- [17] Frank L. Slejko., “Adsorption Technology : A Step-by-Step Approach to Process Evaluation and Application.”, New York and Basel : Tall Oaks Publishing, Inc., 1985, pp. 9-40.
- [18] Douglas M.R., “Encyclopedia of Separation Technology, A Kirk-Other Encyclopedia.”, New York, John Wiley & Sons, Vol. 1, 1997
- [19] วิไลพร วณิชชัชวโรดม., “การบำบัดสีของน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอโดยขบวนการดูดซับด้วย Activated Carbon.”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา, กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2536.
- [20] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์กระทรวงอุตสาหกรรม.2532
- [21] มั่นสิน ดัณฑุลเวศม์, “วิศวกรรมการประปา.”, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์ ก.วิวรรธน์, 2527, เล่ม 2. หน้า 189-219
- [22] Gregg S.J. and Sing K.S.W., “Adsorption Surface Area and Porosity.”, New York: Academic Press A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich Publishers, 1982, 2nd ed, pp.25.
- [23] เกศรา นุตาลัย และคณะ., “การผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ.”, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วารสารการวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 4 ฉบับที่ 3, 2532, หน้า 67-68
- [24] Hassler J.W., “Purification with Activated Carbon.”, New York:Chemical Publishing Co. Inc., 1974, pp. 87-191.
- [25] Samuel D.F. and Osman M.A., “Adsorption Processes for Water Treatment.”, Stoneham: Butterworth Publishers, 1987, pp.14-23.
- [26] Douglas M.R., “Encyclopedia of Separation Technology, A Kirk-Othmer Encyclopedia.”, New York:John Wiley & Sons, 1997, Vol.1, pp.72-172.
- [27] Job N., They A., Pirard R., Marien J, Kocon L., Rouzaud J.N., Begeuin F., Pirard J.P., “Carbon aerogels, cryogels and xerogels: Influence of the drying method on the textural properties of porous carbon materials.”, Carbon, Vol. 43, 2005, pp.2481-2494.
- [28] Job N., Pirard R., Marien J. and Pirard J.P., “Porous carbon xerogels with texture tailored by pH control during sol-gel process.”, Carbon, Vol. 42 , 2004, pp.619-628.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [29] Lin C. and Ritter J.A., "Carbonization and activation of sol-gel derived carbon xerogels.", *Carbon*, Vol. 38, 2000, pp.849-861.
- [30] Tamon H., Ishizaka H., Yamamoto T., and Suzuki T., "Preparation of mesoporous carbon by freeze drying." *Carbon*, Vol. 37, 1999, pp.2049-2055.
- [31] Czakkel O., Marthi K., Geissler E. and Laszlo K., "Influence of drying on the morphology of resorcinol-formaldehyde-based carbon gels.", *Microporous and mesoporous Mat.*, Vol. 86, 2005, pp.124-133.
- [32] Al-Muhtaseb S.A. and Ritter J.A., "Preparation and Properties of Resorcinol-Folmaldehyde Organic and Carbon Gels.", *Adv. Mater.*, Vol. 15, 2003, pp.101.
- [33] C.L. Yaws. "Physical, Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety, and Health Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals.", *Chemical Properties Handbook*, McGraw-Hill, 1999, pp.218-220.
- [34] Ahmad A.L., Chana C.Y., Abd Shukora S.R. and Mashitaha M.D., "Adsorption kinetics and thermodynamics of β -carotene on silica-based adsorbent.", *Chemical Engineer Journal*, Vol. 148, 2009, pp.378-384.
- [35] Chan, K.W., Baharin, B.S., Che Man, Y.B. " Adsorption Isotherm Studies of Palm Carotene Extraction by Synthetic Polymer Adsorbent.", *Journal of Food Lipids*, No 7, March, 2001, pp. 127-140.
- [36] Latip, R.A., Baharin, B.S., Che Man, Y.B., and Abdul Rahman, R. " Evaluation of Different Types of Synthetic Adsorbents for Carotene Extraction from Crude Palm Oil. " *Journal of The American Oil Chemistry Society*, Vol. 77, no 12, 2000, pp. 1277-1280.
- [37] Khoo L.E., Morsingh F., and Liew K.Y., "The Adsorption of β -carotene I. by Bleaching Earths.", *Journal of The American Oil Chemistry Society*, Vol .56, 1979, pp. 672-675.
- [38] ดวงใจ ตั้งวงศ์เจริญกิจ., "การสกัดเบต้า-แคโรทีนจากน้ำมันปาล์มโดยใช้คาร์บอนกัมมันต์", *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีทางชีวภาพ, กรุงเทพฯ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.*
- [39] Brunauer S., Emmett P.H. and Teller E., *Journal of The American Oil Chemistry Society* Vol.60, 1938, pp. 309.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [40] Barrett E.P., Joyner L.G. and Halenda P.H., “ The determination of pore volume and area distribution in pure substances.”, Journal of The American Oil Chemistry Society, Vol.73, 1951, pp. 373.
- [41] De Boer J.H., Linsen B.G. and Osinga T.J., “ Studies on pore systems in catalysts VI. The universal t curve.” , Journal of Catalysis, Vol. 4, 1965, pp.643.
- [42] จตุพร วิทยาคุณ , นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์., “การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์.” พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
- [43] Martin A., Vinu A. and Chandrasekar G., “Adsorption of Vitamin E on Mesoporous Carbon Molecular Sieves.” , Journal of American Oil Chemical Society, Vol. 4, 2005, pp 829–833

ภาคผนวก

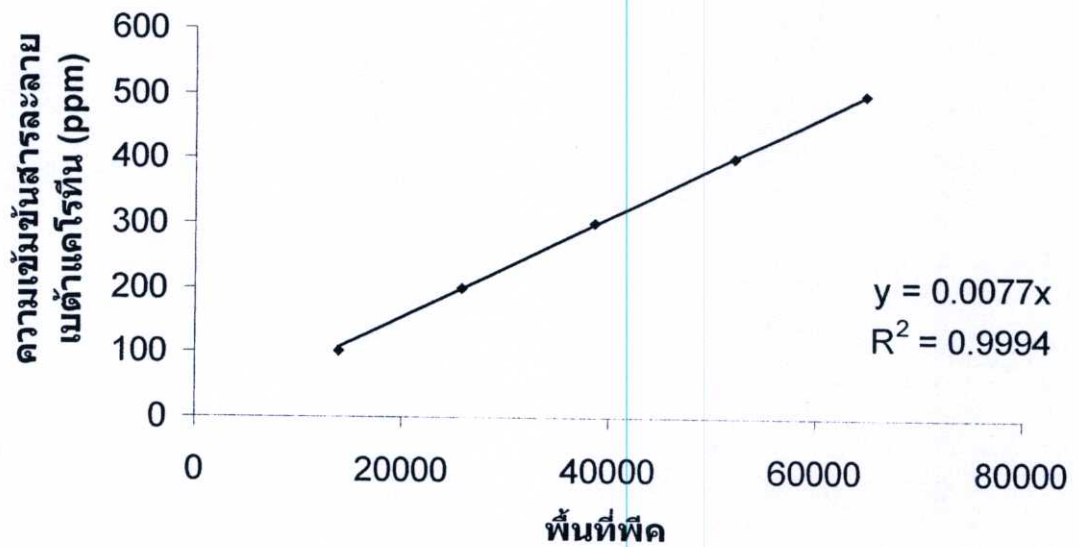
ภาคผนวก ก

พื้นที่พืคและกราฟของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีน
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก. พื้นที่พืชของสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นสารละลายเบต้าแคโรทีน (ppm)	พื้นที่พืช
100	13934.36
200	25829.4
300	38753
400	52160.6
500	64831.5



รูปที่ ก. กราฟสารละลายมาตรฐานเบต้าแคโรทีน

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับด้วยวิธีการดูดซับแก๊ส
ไนโตรเจน

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับด้วยวิธีการดูดซับแก๊สไนโตรเจนโดยใช้เครื่อง Micromeritics, ASAP 2020, Surface area and porosity analyzer

ข.1 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจน

ตาราง ข-1 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ Ac

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0058	13.3927	0.9901	19.0089
0.0096	13.9808	0.9594	18.9814
0.0405	15.9167	0.9229	18.8998
0.0793	16.8567	0.8879	18.8416
0.1240	17.3816	0.8403	18.7927
0.1652	17.6450	0.7908	18.7537
0.2078	17.8171	0.7403	18.7223
0.2544	17.9448	0.6457	18.6706
0.3027	18.0416	0.5507	18.6072
0.3519	18.1211	0.4541	18.2851
0.4508	18.2354	0.3494	18.1152
0.5500	18.3204	0.2425	17.9022
0.6002	18.3668	0.1933	17.7501
0.6505	18.4031	0.1228	17.3499
0.7002	18.4431	0.0478	16.1257
0.7406	18.4784		
0.7703	18.5070		
0.8002	18.5382		
0.8405	18.5833		
0.8999	18.6728		
0.9400	18.7738		
0.9773	18.9038		
0.9901	19.0089		

ตาราง ข-2 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 1

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0060	7.2730	0.9840	18.2309
0.0100	7.5095	0.9686	17.6634
0.0441	8.1207	0.9398	15.1442
0.0874	8.4064	0.8977	13.0507
0.1233	8.5709	0.8463	12.0085
0.1628	8.7236	0.7838	11.3045
0.2023	8.8668	0.7284	10.9040
0.2520	9.0301	0.6481	10.4829
0.3022	9.1909	0.5517	10.0949
0.3521	9.3451	0.4519	9.7460
0.4495	9.6476	0.3510	9.4169
0.5503	9.9671	0.2460	9.0701
0.6002	10.1462	0.1932	8.8910
0.6507	10.3391	0.1208	8.6249
0.7002	10.5498	0.0517	8.2592
0.7402	10.7509		
0.7705	10.9236		
0.8001	11.1259		
0.8401	11.4417		
0.8967	12.1301		
0.9373	13.0809		
0.9778	16.2026		
0.9840	18.2309		

ตาราง ข-3 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 2

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0062	8.8891	0.9863	17.1523
0.0105	9.1498	0.9679	16.4759
0.0389	9.7190	0.9420	14.9470
0.0880	10.0576	0.9048	13.5961
0.1237	10.2117	0.8416	12.6219
0.1627	10.3478	0.7780	12.1587
0.2023	10.4668	0.7252	11.9108
0.2514	10.5993	0.6466	11.6458
0.3017	10.7278	0.5514	11.3851
0.3516	10.8489	0.4511	11.1355
0.4503	11.0682	0.3510	10.8809
0.5501	11.2921	0.2453	10.6111
0.6002	11.4159	0.1933	10.4680
0.6503	11.5492	0.1211	10.2319
0.7004	11.6984	0.0510	9.8681
0.7403	11.8373		
0.7703	11.9609		
0.8005	12.1041		
0.8402	12.3246		
0.8978	12.8415		
0.9383	13.5727		
0.9713	15.0838		
0.9863	17.1523		

ตาราง ข-4 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 3

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0062	7.6155	0.9868	15.1417
0.0097	7.7900	0.9677	14.4783
0.0396	8.2799	0.9414	13.0008
0.0887	8.5505	0.9030	11.7745
0.1230	8.6802	0.8449	10.9521
0.1625	8.8014	0.7777	10.4848
0.2018	8.9071	0.7248	10.2559
0.2513	9.0271	0.6471	10.0143
0.3013	9.1426	0.5511	9.7781
0.3516	9.2545	0.4512	9.5531
0.4499	9.4550	0.3508	9.3372
0.5500	9.6577	0.2452	9.1053
0.6000	9.7747	0.1930	8.9839
0.6505	9.9016	0.1209	8.7896
0.7002	10.0372	0.0508	8.4996
0.7401	10.1720		
0.7704	10.2920		
0.8003	10.4241		
0.8401	10.6366		
0.8983	11.1204		
0.9381	11.8056		
0.9718	13.2468		
0.9868	15.1417		

ตาราง ข-5 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 4

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0063	7.9080	0.9965	15.3832
0.0096	8.0849	0.9682	14.8264
0.0393	8.6038	0.9418	13.5046
0.0885	8.8932	0.9050	12.3341
0.1231	9.0310	0.8436	11.4246
0.1626	9.1582	0.7798	10.9665
0.2019	9.2713	0.7269	10.7255
0.2514	9.3970	0.6488	10.4688
0.3017	9.5204	0.5528	10.2170
0.3517	9.6388	0.4525	9.9769
0.4505	9.8524	0.3519	9.7294
0.5506	10.0740	0.2456	9.4782
0.6009	10.2012	0.1940	9.3481
0.6511	10.3331	0.1212	9.1396
0.7010	10.4832	0.0506	8.8254
0.7413	10.6233		
0.7714	10.7476		
0.8015	10.8911		
0.8417	11.1180		
0.8995	11.6213		
0.9395	12.3435		
0.9728	13.8856		
0.9965	15.3832		

ตาราง ข-6 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 5

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0059	8.1130	0.9876	18.0126
0.0108	8.3617	0.9725	16.9316
0.0398	8.8368	0.9379	13.7957
0.0886	9.1250	0.9030	12.5327
0.1230	9.2611	0.8341	11.5480
0.1625	9.3892	0.7762	11.1502
0.2015	9.5010	0.7240	10.9216
0.2513	9.6282	0.6463	10.6706
0.3015	9.7519	0.5506	10.4271
0.3514	9.8684	0.4512	10.1975
0.4499	10.0791	0.3508	9.9629
0.5498	10.2940	0.2467	9.7246
0.5999	10.4178	0.1935	9.5953
0.6501	10.5528	0.1209	9.3905
0.7000	10.7009	0.0504	9.0821
0.7399	10.8462		
0.7702	10.9777		
0.8000	11.1196		
0.8396	11.3611		
0.8973	11.9135		
0.9372	12.7262		
0.9789	15.7403		
0.9876	18.0126		

ตาราง ข-7 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 6

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0058	6.2011	0.9977	28.7399
0.0097	6.4546	0.9611	28.6156
0.0435	7.1449	0.9234	28.5367
0.0862	7.5003	0.8999	27.7561
0.1216	7.7215	0.8384	18.0059
0.1620	7.9423	0.7907	13.7561
0.2025	8.1482	0.7299	11.9484
0.2521	8.3901	0.6463	10.8313
0.3026	8.6325	0.5460	10.0284
0.3507	8.8663	0.4565	9.4910
0.4488	9.3489	0.3524	8.9395
0.5499	9.8999	0.2462	8.4168
0.6007	10.2350	0.1936	8.1598
0.6509	10.6170	0.1209	7.7814
0.7004	11.0830	0.0514	7.3024
0.7407	11.5660		
0.7709	12.0300		
0.8006	12.6210		
0.8381	13.6980		
0.9027	18.2930		
0.9421	25.7900		
0.9819	28.0600		
0.9977	28.7400		

ตาราง ข-8 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 7

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0061	5.3872	0.9985	45.7019
0.0101	5.6018	0.9674	44.7370
0.0408	6.1859	0.9233	44.5186
0.0887	6.5610	0.9104	33.9852
0.1208	6.7461	0.8453	12.8488
0.1611	6.9469	0.7897	10.8957
0.2016	7.1321	0.7302	10.0142
0.2511	7.3491	0.6347	9.1994
0.3009	7.5619	0.5541	8.7073
0.3510	7.7715	0.4517	8.1859
0.4487	8.1865	0.3511	7.7251
0.5491	8.6468	0.2461	7.2629
0.5991	8.9117	0.1933	7.0290
0.6492	9.2063	0.1204	6.6800
0.6986	9.5431	0.0506	6.2280
0.7388	9.8697		
0.7684	10.1713		
0.7986	10.5193		
0.8373	11.1253		
0.8921	12.6508		
0.9379	17.6726		
0.9985	45.7019		
0.0061	5.3872		

ตาราง ข-9 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 8

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0060	9.0112	0.9959	67.6960
0.0097	9.3245	0.9610	67.6566
0.0427	10.2185	0.9482	64.0049
0.0861	10.6617	0.9003	21.4351
0.1227	10.9279	0.8263	16.8238
0.1624	11.1760	0.7848	15.8448
0.2028	11.4081	0.7319	15.0798
0.2520	11.6803	0.6505	14.2525
0.3026	11.9563	0.5525	13.5112
0.3526	12.2303	0.4521	12.8846
0.4489	12.7583	0.3519	12.2951
0.5499	13.3473	0.2501	11.7226
0.6007	13.6797	0.1935	11.4042
0.6507	14.0393	0.1210	10.9676
0.7005	14.4491	0.0522	10.4080
0.7406	14.8389		
0.7706	15.1852		
0.8007	15.5838		
0.8398	16.2398		
0.8942	17.7010		
0.9445	21.3559		
0.9729	39.7448		
0.9959	67.6960		

ตาราง ข-10 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 9

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0061	8.1912	0.9836	41.3038
0.0100	8.4833	0.9675	40.6015
0.0439	9.2797	0.9441	29.6363
0.0872	9.6735	0.9036	19.0133
0.1222	9.9062	0.8408	15.6681
0.1623	10.1374	0.7863	14.4843
0.2023	10.3517	0.7314	13.7536
0.2518	10.6081	0.6501	13.0042
0.3024	10.8652	0.5528	12.3305
0.3523	11.1201	0.4524	11.7388
0.4489	11.6128	0.3513	11.1863
0.5496	12.1651	0.2495	10.6617
0.6003	12.4786	0.1935	10.3717
0.6502	12.8123	0.1209	9.9741
0.6997	13.1907	0.0514	9.4567
0.7399	13.5599		
0.7702	13.8742		
0.7998	14.2425		
0.8391	14.8535		
0.8941	16.1872		
0.9341	18.1792		
0.9735	26.8844		
0.9836	41.3038		

ตาราง ข-11 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 10

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0059	8.1130	0.9876	18.0126
0.0108	8.3617	0.9725	16.9316
0.0398	8.8368	0.9379	13.7957
0.0886	9.1250	0.9030	12.5327
0.1230	9.2611	0.8341	11.5480
0.1625	9.3892	0.7762	11.1502
0.2015	9.5010	0.7240	10.9216
0.2513	9.6282	0.6463	10.6706
0.3015	9.7519	0.5506	10.4271
0.3514	9.8684	0.4512	10.1975
0.4499	10.0791	0.3508	9.9629
0.5498	10.2940	0.2467	9.7246
0.5999	10.4178	0.1935	9.5953
0.6501	10.5528	0.1209	9.3905
0.7000	10.7009	0.0504	9.0821
0.7399	10.8462		
0.7702	10.9777		
0.8000	11.1196		
0.8396	11.3611		
0.8973	11.9135		
0.9372	12.7262		
0.9789	15.7403		
0.9876	18.0126		

ตาราง ข-12 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ RF 11

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0059	6.1977	0.9898	20.5861
0.0107	6.5227	0.9583	20.5739
0.0414	7.2343	0.9216	20.5455
0.0842	7.6821	0.8867	20.5115
0.1209	7.9795	0.8397	20.4628
0.1619	8.2752	0.7905	20.3975
0.2024	8.5549	0.7405	20.3128
0.2523	8.8909	0.6494	15.9529
0.3033	9.2444	0.5452	11.6358
0.3536	9.6053	0.4486	10.4465
0.4467	10.3300	0.3475	9.5948
0.5476	11.3339	0.2305	8.7672
0.6003	12.0634	0.1955	8.5307
0.6498	12.9795	0.1212	8.0151
0.6980	14.2381	0.0523	7.4201
0.7381	15.7956		
0.7704	17.5087		
0.8036	19.3024		
0.8569	20.3457		
0.9162	20.4693		
0.9571	20.5329		
0.9763	20.5659		
0.9898	20.5861		

ตาราง ข-13 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สในโครเจนของตัวดูดซับ RF 12

Adsorption		Desorption	
Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)	Relative Pressure (P/Po)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g)
0.0059	7.0858	0.9946	25.5489
0.0105	7.4611	0.9588	25.5550
0.0403	8.2692	0.9225	25.5227
0.0829	8.7680	0.8874	25.4868
0.1214	9.1022	0.8402	25.4394
0.1622	9.4190	0.7915	25.3344
0.2031	9.7207	0.7405	24.3913
0.2530	10.0868	0.6337	15.0957
0.3042	10.4629	0.5450	12.9733
0.3543	10.8531	0.4532	11.8238
0.4474	11.6331	0.3424	10.8180
0.5488	12.6822	0.2514	10.1115
0.6016	13.4141	0.1947	9.6908
0.6513	14.3086	0.1214	9.1342
0.6999	15.5204	0.0523	8.4788
0.7408	16.9773		
0.7723	18.5505		
0.8028	20.5229		
0.8451	23.3844		
0.9162	25.3908		
0.9570	25.4864		
0.9946	25.5489		
0.0059	7.0858		

ข.2 การกระจายตัวของรูพรุน (Pore size distribution)

ตาราง ข-14 การกระจายตัวของรูพรุนของตัวดูดซับ Ac

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
578.1345	0.0018
314.4843	0.0104
210.5016	0.0176
148.4047	0.0250
111.5321	0.0394
88.8075	0.0561
66.6653	0.0753
51.0133	0.1113
40.6557	0.3771
32.6048	0.4755
26.5590	0.5657
23.0395	0.8607
19.7944	1.2021

ตาราง ข-15 การกระจายตัวของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 1

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
756.3130	0.0757
400.1110	0.3714
235.9750	0.3937
155.6847	0.2529
109.9782	0.2036
85.2493	0.1691
66.2300	0.1557
51.1616	0.1531
40.4567	0.1675
32.6826	0.1856
26.4731	0.2095
22.9295	0.2050
19.7454	0.1999

ตาราง ข-16 การกระจายตัวของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 2

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
744.3430	0.0580
412.5476	0.1989
251.7719	0.2178
153.6240	0.1561
107.0647	0.1081
83.8648	0.0885
65.8012	0.0791
51.0732	0.0841
40.4025	0.0988
32.6664	0.1260
26.4452	0.1391
22.9219	0.1491
19.7594	0.1749

ตาราง ข-17 การกระจายตัวของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 3

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
740.3243	0.0542
408.7045	0.1909
247.6400	0.1943
155.9717	0.1420
107.4636	0.1033
83.7703	0.0817
65.8448	0.0727
51.0602	0.0744
40.3947	0.0888
32.6584	0.1018
26.4411	0.1163
22.9104	0.1203
19.7459	0.1354

ตาราง ข-18 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 4

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
684.3365	0.0185
411.7667	0.1683
252.1131	0.1908
155.3457	0.1499
108.0671	0.1074
84.4501	0.0866
66.2152	0.0781
51.2841	0.0812
40.5232	0.0960
32.7346	0.1235
26.4728	0.1268
22.9492	0.1328
19.7727	0.1438

ตาราง ข-19 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 5

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
865.6525	0.0976
391.1545	0.2980
245.4357	0.2194
147.3580	0.1432
105.2891	0.0976
83.4094	0.0752
65.6687	0.0691
50.9799	0.0704
40.3848	0.0841
32.6583	0.1077
26.4993	0.1149
22.9519	0.1202
19.7521	0.1367

ตาราง ข-20 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 6

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
542.9717	0.0041
316.7698	0.0110
228.4876	0.3051
150.0302	2.2783
111.2209	1.8322
86.3850	0.6795
66.0607	0.2936
50.5643	0.1606
40.5740	0.1149
32.8413	0.1177
26.5035	0.1122
22.9471	0.0948
19.7570	0.0815

ตาราง ข-21 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 7

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
636.6493	0.0282
317.0658	0.0214
244.1717	6.9354
156.8615	4.1271
111.0999	0.3779
85.2997	0.0509

ตาราง ข-22 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 8

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
559.6130	0.0013
434.9433	0.9886
244.7364	5.3801
140.9622	0.4471
106.6837	0.1095
85.9889	0.0129
32.7285	0.0061
26.6478	0.0418
23.0107	0.0366
19.7562	0.0301

ตาราง ข-23 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 9

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
731.7790	0.0753
425.4719	1.5627
250.4155	1.5669
152.7027	0.4866
110.0227	0.2479
86.1985	0.1735
66.7091	0.1432
51.3358	0.1358
40.5193	0.1523
32.7038	0.1762
26.6158	0.1774
23.0026	0.1658
19.7534	0.1478

ตาราง ข-24 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF10

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
573.5865	0.0008
332.9203	0.0783
248.7853	7.6382
143.3245	1.6107
108.4329	0.3142
87.2892	0.1389
64.0979	0.0498
48.8937	0.0154
40.0131	0.0162
32.7361	0.0343
26.5901	0.0441
22.9869	0.0296
19.7586	0.0125

ตาราง ข-25 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 11

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
561.3690	0.0008
308.7856	0.0044
207.8548	0.0096
147.5881	0.0153
111.4032	0.0282
88.8182	0.0479
67.1756	1.9694
50.6152	2.2662
40.0740	0.5430
32.4505	0.3000
25.8104	0.1913
22.7096	0.1160
19.7894	0.0665

ตาราง ข-26 การกระจายตัวขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ RF 12

เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน Pore Diameter (Å)	ปริมาตรของรูพรุน Pore Volume (cm ³ /g)
312.1595	0.0051
209.2340	0.0100
148.1592	0.0147
111.8860	0.0463
88.9333	0.5452
64.8246	3.6774
49.9766	1.0443
40.3382	0.4506
32.2967	0.2607
26.5427	0.1593
23.0682	0.0929
19.7836	0.0270

ภาคผนวก ก

ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปลาเม็ดบดด้วยตัวดูดซับ

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยเฮกเซนเข้มข้นร้อยละ 50 ที่เวลา 24 ชั่วโมง

Sample	ความเข้มข้นเบต้าแคโรทีนเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นเบต้าที่ถูกดูดซับ (ppm)	ปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ถูกดูดซับ (mg/g)
Ac	251.90	20.02	0.98
RF 1	251.90	74.22	3.68
RF 2	258.25	117.19	5.75
RF 3	277.48	76.34	3.78
RF 4	277.48	87.38	4.29
RF 5	277.48	82.86	4.07
RF 6	251.90	110.22	5.41
RF 7	251.90	150.05	7.42
RF 8	277.48	168.53	8.27
RF 9	277.48	172.78	8.43
RF 10	277.48	161.40	8.00
RF 11	251.90	127.39	6.30
RF 12	251.90	143.34	7.03

ตารางที่ ค-2 ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยไอโซโพรพานอล
เข้มข้นร้อยละ 50 ที่เวลา 24 ชั่วโมง

Sample	ความเข้มข้นเบต้า แคโรทีนเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นเบต้า ที่ถูกดูดซับ (ppm)	ปริมาณเบต้าแคโรทีน ที่ถูกดูดซับ (mg/g)
Ac	213.69	17.18	1.08
RF 1	223.69	98.54	5.11
RF 2	213.69	109.43	6.10
RF 3	223.69	84.96	4.46
RF 4	213.69	102.56	5.29
RF 5	223.69	102.09	5.30
RF 6	223.69	112.31	5.86
RF 7	213.69	129.86	8.04
RF 8	213.69	154.72	8.33
RF 9	213.69	173.09	8.94
RF 10	223.69	137.42	8.25
RF 11	223.69	125.56	6.51
RF 12	213.69	128.36	7.14

ตารางที่ ค-3 ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยไอโซโพรพานอล
เข้มข้นร้อยละ 50 ที่เวลา 72 ชั่วโมง

Sample	ความเข้มข้นเบต้า แคโรทีนเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นเบต้า ที่ถูกดูดซับ (ppm)	ปริมาณเบต้าแคโรทีน ที่ถูกดูดซับ (%)
Ac	213.70	20.87	1.07
RF 1	231.26	121.59	6.33
RF 2	231.26	136.48	7.16
RF 3	231.26	112.94	5.90
RF 4	231.26	134.95	7.00
RF 5	231.26	124.09	6.43
RF 6	231.26	168.36	8.76
RF 7	231.26	180.20	9.35
RF 8	231.26	196.47	10.30
RF 9	231.26	204.42	10.59
RF 10	231.26	180.82	9.32
RF 11	231.26	170.14	8.79
RF 12	231.26	176.96	9.14

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีน
ด้วยตัวดูดซับ

ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบที่เจือจางด้วยไอโซโพรพานอลร้อยละ 50

ตารางที่ ง-1 ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ Ac

เวลา (hr)	ความเข้มข้นเบต้าแคโรทีนเริ่มต้น (C_0) (ppm)	ความเข้มข้นเบต้าแคโรทีนที่เหลือ (C_t) (ppm)	C_t/C_0
0	214.77	214.77	1.00
1	214.77	210.25	0.98
5	214.77	203.29	0.95
10	214.77	202.54	0.94
24	214.77	199.65	0.93
52	214.77	198.81	0.93
72	214.77	197.49	0.92

ตารางที่ ง-2 ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ RF 7

เวลา (hr)	ความเข้มข้นเบต้าแคโรทีนเริ่มต้น (C_0) (ppm)	ความเข้มข้นเบต้าแคโรทีนที่เหลือ (C_t) (ppm)	C_t/C_0
0	214.77	214.77	1.00
1	214.77	143.91	0.67
5	214.77	126.40	0.59
10	214.77	116.48	0.54
24	214.77	92.91	0.43
52	214.77	67.79	0.32
72	214.77	65.62	0.31

ตารางที่ ง-3 ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ RF 8

เวลา (hr)	ความเข้มข้นเบต้าแคโรทีน เริ่มต้น (C_0) (ppm)	ความเข้มข้นเบต้าแคโรทีน ที่เหลือ (C_t) (ppm)	C_t/C_0
0	214.77	214.77	1
1	214.77	140.32	0.65
5	214.77	114.68	0.53
10	214.77	94.24	0.44
24	214.77	73.82	0.34
52	214.77	58.69	0.27
72	214.77	54.03	0.25

ตารางที่ ง-4 ข้อมูลการทดลองการหาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับ RF 9

เวลา (hr)	ความเข้มข้นเบต้าแคโรทีน เริ่มต้น (C_0) (ppm)	ความเข้มข้นเบต้าแคโรทีน ที่เหลือ (C_t) (ppm)	C_t/C_0
0	214.77	214.77	1
1	214.77	135.48	0.63
5	214.77	119.25	0.56
10	214.77	103.75	0.48
24	214.77	63.66	0.30
52	214.77	39.68	0.18
72	214.77	38.11	0.18

ภาคผนวก จ
ผลงานทางวิชาการ



วิศวกรรมลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร. 02-13061000 E-mail: ladkrabang

ปีที่ 26 ฉบับที่ 3

กันยายน 2552

วิศวกรรมโทรคมนาคม

1. การหาประสิทธิภาพบนโครงข่าย MPLS/VPN เปรียบเทียบกับโครงข่าย IP แบบดั้งเดิม
บัณฑิต จิวแย้ม กอบชัย เดชหาญ 1
2. การออกแบบวงจรเทอร์นารีชนิดตั่วทริกเกอร์
สมปอง วิเศษพานิชกิจ ชัยณรงค์ หาญชนะ กอบชัย เดชหาญ 7
3. กลไกควบคุมคุณภาพการให้บริการ โดยใช้ DiffServ-aware Traffic Engineering
วิรัช ชัยขุนพล กอบชัย เดชหาญ 13
4. การออกแบบระบบควบคุมอุปกรณ์และระบบไฟฟ้าในตู้ Mini DSLAM ระยะไกลผ่านโครงข่าย TCP/IP
วีรพันธ์ กรโยธิน สุวิพล สิริชีวะภาค นฤทธิสมเจริญ สำภาพล 19
5. การประเมินช่องสัญญาณแบบหลายเส้นทางของระบบสื่อสารผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ถูกลดทอนจากสัญญาณรบกวนโคโรน่า
พงศ์พันธุ์ อังคนานุพงศ์ เศรษฐกร กามเมือง สุวิพล สิริชีวะภาค 25

วิศวกรรมไฟฟ้า

6. การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสองตัวโดยการมอดดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์
สาธิต สมญาดี วิจิตร กิณเรศ 31

วิศวกรรมเครื่องกล

7. การศึกษาปล่องผนังโซลาร์เซลล์ระบายอากาศแบบธรรมชาติร่วมกับพัดลมกระแสตรงภายใต้สภาวะอากาศของกรุงเทพมหานคร
ปรีดา จันทพงษ์ 37

วิศวกรรมเคมี

8. การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน
สลิตา บุรีรักษ์ เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒน์วงศ์ ประกอบ กิจไชยา 43
9. คุณสมบัติด้านรีโอโลยีของผลิตภัณฑ์สเปรดจากน้ำมันมะพร้าวอินทรีย์
พรรณนิภา ฤาไชคชัย มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ 49

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

10. การศึกษาลำดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อการประยุกต์ใช้กลยุทธ์โลจิสติกส์แบบย้อนกลับ
ปรารภณา ปุณณกิติเกษม พงศ์พัฒน์ ดั่งคะประเสริฐ ตริทิศ เหล่าศิริพงษ์ทอง 55

การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับ เมโซพอร์สคาร์บอน

Adsorption of β - carotene in crude palm oil using mesoporous carbon adsorbents

ลลิตา บุรีรักษ์ เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ ประกอบ กิจไชยา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กทม.10520

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ โดยเตรียมน้ำมันปาล์มดิบเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาณ 2 กรัม ใช้ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ (Ac) และตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน (RF 1, RF 2 และ RF 3) 0.05 กรัม ดูดซับที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการเขย่า 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ Ac เข้าสู่สมดุลการดูดซับเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนทุกตัวยังสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนต่อไปได้อีกแม้เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์ มีขนาดรูพรุนส่วนใหญ่เป็นไมโครพอร์และมีปริมาตรรูพรุนน้อย ส่วนตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนมีขนาดรูพรุนเป็นทั้งไมโครพอร์และเมโซพอร์ รวมถึงมีปริมาตรรูพรุนมาก ทำให้สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้ในปริมาณมาก การศึกษาครั้งนี้ยังพบว่าตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนทุกตัวสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนได้มากกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ โดยตัวดูดซับ RF 3 ดูดซับได้สูงสุดเป็น 6.81 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูดซับ

คำสำคัญ : เมโซพอร์สคาร์บอน, คาร์บอนกัมมันต์, เบต้าแคโรทีน, น้ำมันปาล์มดิบ

Abstract

This research concentrated on a study of adsorption of β -carotene in crude palm oil (CPO) using mesoporous carbon (RF 1, RF 2 and RF 3) and activated carbon (Ac) adsorbents. 0.05 g of adsorbent was added into CPO is diluted with the same amount of hexane solvent to determine the adsorbate concentration at 40° C, shaker speed of 180 rpm for 1, 2, 3, 4, 8, 12 and 24 hours. It was found that adsorption equilibrium of Ac was reached within 4 hour. While all mesoporous carbon adsorbent could still adsorb β -carotene even after 24 hours. Most of the pore size in Ac was micropore and pore volume was small, while most of the pore size in mesoporous carbon adsorbent was micropore, mesopore and pore volume was large. β - carotenes could be adsorbed by mesoporous carbon adsorbent more than Ac adsorbent, β - carotenes adsorption on the RF 3 was 6.81 mg β - carotenes /g adsorbent.

Keywords : Mesoporous carbon, Activated carbon, β -carotene, Crude palm oil

1. บทนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำมันปาล์มมีแนวโน้มที่จะขยายตัวอย่างมาก โดยส่วนประกอบในน้ำมันปาล์มดิบจะมีแคโรทีนอยด์ อยู่ 500-700 ppm ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเบต้าแคโรทีน (β -carotene) ถึง 56% แคโรทีนอยด์ ที่เหลือจะประกอบไปด้วยแอลฟาแคโรทีน แกมมาแคโรทีน แซนโทฟิล และไลโคฟิล [1,2]

เบต้าแคโรทีน มีบทบาทสำคัญในการรักษาสุขภาพ และเพิ่มระบบภูมิคุ้มกันให้แข็งแรง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้เบต้าแคโรทีนเป็นสารที่ได้รับความสนใจและเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องสำอางค์เป็นอย่างมาก [3]

เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มให้บริสุทธิ์นั้น จะใช้ตัวดูดซับในการกำจัดสีออกจากน้ำมันปาล์ม เพื่อให้ น้ำมันปาล์มคุณภาพรับประทาน ในขั้นตอนนี้จะทำให้สูญเสียเบต้าแคโรทีน ซึ่งเป็นสารที่มีคุณค่าไปอย่างเปล่าประโยชน์ [4,5] ดังนั้นถ้าสามารถนำเบต้าแคโรทีน กลับมาใช้ประโยชน์ได้ก่อนที่จะถูกทำลายจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ ซึ่งการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแยกเบต้าแคโรทีนออกจากน้ำมันปาล์ม โดยการดูดซับเป็นวิธีที่มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย หรือการกลั่น โมเลกุลพบว่าวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่สะดวก และใช้พลังงานต่ำเหมาะสำหรับการแยกสารที่มีปริมาณความเข้มข้นน้อยๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเบต้าแคโรทีนเป็นสารที่ไม่มีขั้ว และมีขนาดประมาณ 17 อังสตรอม [6] ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาการดูดซับเบต้าแคโรทีนด้วยตัวดูดซับที่ไม่มีขั้ว ได้แก่ คาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้า จากบริษัท คาร์โบกาญจน์ และเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการโซลเจล (sol-gel method) ซึ่งมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า และมีปริมาตรรูพรุนมากกว่าตัวดูดซับสังเคราะห์ เช่น เรซิน จึงเป็นตัวดูดซับที่มีความน่าสนใจสำหรับนำมาใช้ดูดซับเบต้าแคโรทีน

2. วิธีการทดลอง

2.1 การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน

นำ รีซอร์ซินอล (R) น้ำ (W) โซเดียมคาร์บอเนต (C) และฟอร์มัลดีไฮด์ (F) มาผสมในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 1 แล้วเขย่าให้เข้ากันจากนั้นปล่อยให้แห้งตัวเป็นเจลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 1 วัน 50 องศาเซลเซียส 1 วัน และ 90 องศาเซลเซียส 3 วัน นำเจลที่ได้มาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วมาแลกเปลี่ยนด้วยตัวทำละลายบิวทานอล 6 ครั้ง ครั้งละ 1 วัน จากนั้นนำเจลที่ได้ไปผ่านกระบวนการทำให้แห้งแบบสุญญากาศเป็นเวลา 1 วัน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสนาน 4 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่อัตราการไหล 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะได้เมโซพอร์สคาร์บอนออกมา จากนั้นคัดขนาดเม็ดเมโซพอร์สคาร์บอนโดยถาดตะแกรงร่อน (sieve tray) ขนาด 12 ถึง 20 mesh ก่อนนำไปใช้ดูดซับเบต้าแคโรทีน ในน้ำมันปาล์มดิบ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน

ตัวอย่าง	R / F (mol/mol)	R / C (mol/mol)	R / W (mol/cm ³)
RF 1	0.5	500	0.5
RF 2	0.5	200	0.5
RF 3	0.5	200	0.25

2.2 วิธีการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับ

นำน้ำมันปาล์มดิบมาเจือจางด้วยเฮกเซน โดยมีความเข้มข้นของน้ำมันปาล์มร้อยละ 50 ซึ่งสารละลายน้ำมันปาล์มที่เตรียมไว้ใส่ลงในขวดแก้วขนาด 5 มิลลิลิตร ปริมาณ 2 กรัมจำนวน 7 ขวด และชั่งคาร์บอนกัมมันต์ Ac ปริมาณ 0.05 กรัม เติมนลงในขวดที่ชั่งน้ำมันไว้ ไล่อากาศด้านบนขวดด้วยไนโตรเจน และปิดด้วยฝาขวดป้องกันการเกิดออกซิเดชัน จากนั้นนำขวดตัวอย่างไปเขย่าด้วยอัตราเร็ว 180

รอบก่อนหน้าที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เก็บขวดตัวอย่างออกจากเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ แยกสารละลายน้ำมันปาล์มออกจากคาร์บอนกัมมันต์

ทำการทดลองซ้ำเหมือนที่กล่าวไปข้างต้น แต่เปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์ Ac เป็นเมโซพอร์ริสคาร์บอน RF1, RF 2 และ RF3

2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนโดยใช้เครื่อง HPLC

นำสารละลายน้ำมันปาล์มที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนหลังจากการดูดซับ โดยใช้เครื่อง HPLC โดยกรองสารที่ต้องการวิเคราะห์ผ่าน Syring filters ที่มีขนาดของรูที่สารผ่านได้เท่ากับ 0.45 ไมโครเมตร และนำสารที่ทำการกรองแล้วไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC โดยใช้อุปกรณ์และสภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

คอลัมน์ : ODS-2-HYPERSIL

เครื่องตรวจวัด : UV-Visible ความยาวคลื่น 450 nm

สารตัวพา : เมทานอล : เฮกเซน 85 : 15 V/V
อัตราการไหลของสารตัวพา : 1 มิลลิลิตรต่อนาที
ปริมาณสารที่ใช้ในการวิเคราะห์ : 20 ไมโครลิตร

2.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ

ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุน และรูปร่างของรูพรุนด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) โดยใช้เครื่องรุ่น Micromeritics, ASAP 2020, Surface area and porosity analyzer

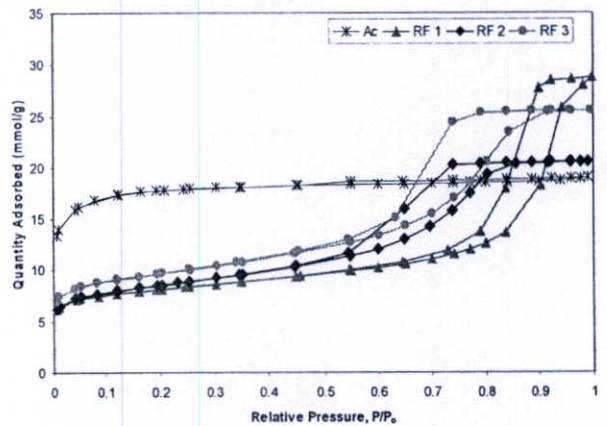
3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลการสังเคราะห์เมโซพอร์ริสคาร์บอน

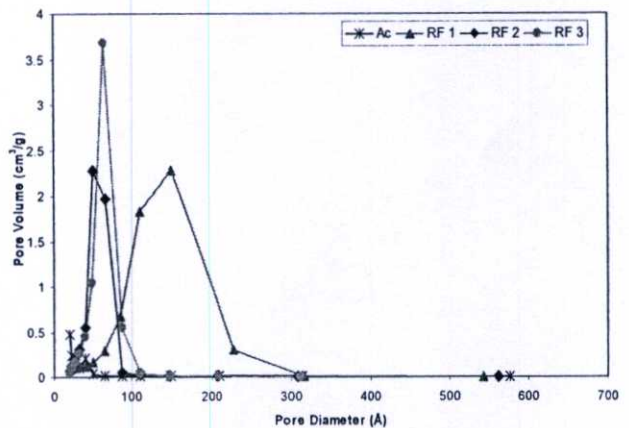
ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุน และรูปร่างของรูพรุนด้วย BET ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ Ac เกรดการค้า และตัวดูดซับเมโซพอร์ริสคาร์บอน RF 1, RF 2 และ RF 3 แสดงผลดังตารางที่ 2 รูปที่ 1 และรูปที่ 2

ตาราง 2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน โดยวิธี BET

Sample	Diameter (Å)	Surface Area (m ² /g)	Mesopore Volume (cm ³ /g)	Micropore Volume (cm ³ /g)
Ac	19	877	0.10	0.40
RF 1	150	587	0.87	0.16
RF 2	51	628	0.65	0.14
RF 3	65	710	0.81	0.16



รูปที่ 1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับและการคายซับไนโตรเจนที่ 77 เคลวิน ของเมโซพอร์ริสคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 2 การกระจายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของเมโซพอร์ริสคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้

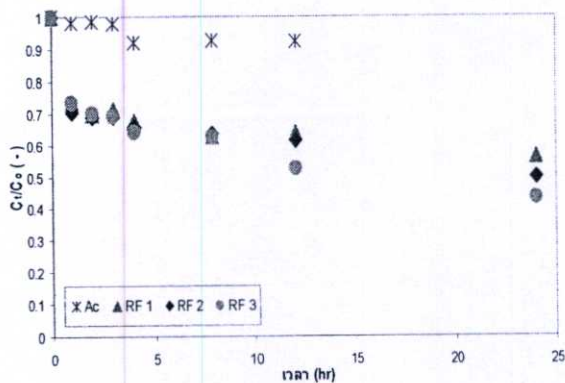
จากตารางที่ 2 พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ Ac มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนน้อยกว่า 20 อังสตรอม คือมีรูพรุนขนาดไมโครพอร์ (Micropore) ส่วนเมโซพอร์สคาร์บอนทั้ง 3 ตัว คือ RF 1 , RF 2 และ RF 3 มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนตั้งแต่ 20-500 อังสตรอม นั่นคือมีรูพรุนขนาดเมโซพอร์ (Mesopore) เมโซพอร์สคาร์บอนทั้ง 3 ตัวมีขนาดรูพรุนที่แตกต่างกันเพราะขนาดของรูพรุนของเมโซพอร์สคาร์บอนสามารถควบคุมได้ด้วยการใช้อัตราส่วนของสารตั้งต้นต่างกัน

จากรูปที่ 1 พบว่าไอโซเทอร์มของเมโซพอร์สคาร์บอนทั้ง 3 ตัวเป็นแบบ Type 4 ตามระบบ IUPAC ซึ่งมีขนาดรูพรุนทั้งแบบไมโครพอร์และเมโซพอร์ จากรูปพบว่า RF 1 มีปริมาณเมโซพอร์มากที่สุด รองลงมาคือ RF 3 และ RF 2 ตามลำดับ ดูได้จากขนาดของฮิสเตอรีซิสลูป (Hysteresis loop) ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด

จากรูปที่ 2 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนพบว่าตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน RF 2 และ RF 3 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนค่อนข้างสม่ำเสมอโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ที่ 51 และ 65 อังสตรอม ส่วนตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอน RF 1 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนกว้างกว่าและมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ที่ 150 อังสตรอม

3.2 การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับ

เมื่อพิจารณาเวลาในการเข้าสู่สมดุลและตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นมา และตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้าได้ผลดังรูปที่ 3 และตารางที่ 3



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีน (mg/g) ในน้ำมันปาล์มดิบของตัวดูดซับชนิดต่างๆ ที่ 24 ชั่วโมง

ชนิดตัวดูดซับ	ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีน (mg/g)
Ac*	0.91
RF 1	5.23
RF 2	6.08
RF 3	6.81

*หมายเหตุ ปริมาณการดูดซับเบต้าแคโรทีนของ Ac ที่เวลา 12 ชั่วโมง

จากรูปที่ 3 พบว่า คาร์บอนกัมมันต์ Ac เข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนทุกตัวยังสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีนต่อไปได้อีกแม้เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง การที่คาร์บอนกัมมันต์ Ac เข้าสู่สมดุลการดูดซับเร็วขึ้น เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์มีรูพรุนขนาดไมโครพอร์รวมถึงมีปริมาตรรูพรุนน้อยทำให้เบต้าแคโรทีนซึ่งเป็นสารที่มีขนาดใหญ่ ประมาณ 17 อังสตรอม ถูกดูดซับเข้าไปภายในรูพรุนได้ในปริมาณที่จำกัด ส่วนเมโซพอร์สคาร์บอนทั้ง 3 ตัว มีรูพรุนขนาดทั้งไมโครพอร์และเมโซพอร์ รวมทั้งมีปริมาตรรูพรุนมากกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จึงทำให้เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงตัวดูดซับเมโซพอร์สคาร์บอนทั้ง 3 ตัวยังสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีน ต่อไปได้

จากตารางที่ 3 พบว่าตัวดูดซับเมโซพอร์รัสคาร์บอน ที่สังเคราะห์ขึ้นมาทั้ง 3 ตัว สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีน ได้มากกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้าค่อนข้างมาก โดยตัวดูดซับเมโซพอร์รัสคาร์บอน RF 3 สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีน ได้มากกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ Ac ถึงประมาณเกือบ 7 เท่า ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปัจจัยทางกายภาพของตัวดูดซับที่น่าจะส่งผลกระทบต่อ การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบออกป็นกรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อพิจารณาตัวดูดซับ RF 1 และ RF 3 ที่มี ปริมาตรเมโซพอร์ใกล้เคียงกันแต่มีขนาดของรูพรุน ต่างกัน ดังตารางที่ 2 พบว่าตัวดูดซับ RF 3 ซึ่งมีรูพรุน ส่วนใหญ่ขนาด 65 อังสตรอม สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีน ได้ปริมาณมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าตัวดูดซับ RF 3 มีขนาดรูพรุนที่มีความจำเพาะเจาะจงสำหรับการ ดูดซับเบต้าแคโรทีน มากกว่าตัวดูดซับ RF 1 ที่มีขนาดรูพรุนส่วนใหญ่ขนาด 150 อังสตรอม ซึ่งอาจเป็นขนาด ของรูพรุนที่ใหญ่เกินไปสำหรับการดูดซับเบต้าแคโรทีน ในทำนองเดียวกันตัวดูดซับ Ac ที่มีขนาดรูพรุนส่วนใหญ่เพียง 19 อังสตรอมอาจเป็นขนาดของรูพรุนที่เล็กเกินไปสำหรับการดูดซับ

กรณีที่ 2 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของตัวดูดซับดังรูปที่ 2 พบว่าตัวดูดซับที่มีการกระจาย ตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงเมโซพอร์คือ RF 1 และ RF 3 จะสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีน ได้มากกว่าตัวดูดซับที่ มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงไมโครพอร์ ดังตัวดูดซับ Ac และเมื่อพิจารณาตัวดูดซับ RF 1 และ RF 3 ที่มีปริมาตรเมโซพอร์ใกล้เคียงกันแต่มีการกระจายตัว ของขนาดรูพรุนต่างกัน พบว่าตัวดูดซับ RF 3 ที่มีการ กระจายตัวของขนาดรูพรุนสม่ำเสมอกว่าสามารถดูด ซับเบต้าแคโรทีน ได้ดีกว่าตัวดูดซับ RF 1 ที่มีการกระจาย ตัวของขนาดรูพรุนกว้างกว่า แสดงว่าความสม่ำเสมอ ของการกระจายตัวของขนาดรูพรุนมีผลต่อการดูดซับเบต้า แคโรทีน

กรณีที่ 3 เมื่อพิจารณาตัวดูดซับเมโซพอร์รัส คาร์บอน RF 2 และ RF 3 ซึ่งมีการกระจายตัวของขนาดรู

พรุนค่อนข้างสม่ำเสมอใกล้เคียงกันแต่มีปริมาตรเมโซพอร์ ต่างกัน พบว่าตัวดูดซับ RF 3 ที่มีปริมาตรเมโซพอร์มากกว่า ตัวดูดซับ RF 2 จะสามารถดูดซับเบต้าแคโรทีน ได้มากกว่า แสดงว่าปริมาตรเมโซพอร์มีผลต่อการดูดซับเบต้าแคโรทีน เช่นเดียวกัน

ดังนั้นลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับที่ส่งผลกระทบต่อ การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบ ได้แก่ ขนาดของรูพรุน ความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของขนาดรูพรุน และ ปริมาตรเมโซพอร์

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเบต้าแคโรทีนจากน้ำมันปาล์มดิบพบว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ Ac ซึ่งมีรูพรุนส่วนใหญ่ขนาดไมโครพอร์ และมีปริมาตรรูพรุน น้อย ทำให้เข้าสู่สมดุลการดูดซับได้เร็ว ส่วนตัวดูดซับเมโซพอร์รัสคาร์บอนทั้ง 3 ตัวซึ่งมีขนาดรูพรุนเป็นทั้งไมโครพอร์ และเมโซพอร์ รวมถึงมีปริมาตรเมโซพอร์มาก ทำให้สามารถ ดูดซับเบต้าแคโรทีน ได้ในปริมาณมาก และใช้เวลานานใน การเข้าสู่สมดุล

จากการพิจารณาหาตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูด ซับเบต้าแคโรทีน พบว่าตัวดูดซับที่สามารถดูดซับเบต้าแคโรทีน ในน้ำมันปาล์มดิบได้ปริมาณมากที่สุดคือ RF 3 สามารถ ดูดซับได้ปริมาณ 6.81 มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อกรัมตัวดูด ซับ มากกว่าตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์เกรดการค้าถึง ประมาณ 7 เท่า

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัย แห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทางการเงินทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.L. Slattery, J. Benson., K. Curtin, K.N. Ma, D. Schaeffer and J.D. Potter, "Carotenoids and colon cancer". American Journal of Clinical Nutrition, Vol.71, pp. 575-582. 2000.

- [2] S.H. Goh, "Carotene controversy". Malaysian Oil Science and Technology, Vol.5, No.17.,1996.
- [3] Y.M. Choo, " Palm oil carotenoids ". Food and nutrition bulletin., Vol.15, No.2., June., 1993/1994
- [4] S. Hermann, "The Physical Refining Process". Journal of The American Oil Chemistry Society , Vol. 62. pp. 299-330. 1985.
- [5] S.Frank L, "Adsorption Technology : A Step-by-Step Approach to Process Evaluation and Application". New York and Basel : Tall Oaks Publishing, Inc. pp. 9-40, 1985
- [6] S.C Boon, I. Sosaku, K. Sumiyo and N. Mitsutoshi , "Preparation of Protein-Stabilized β -Carotene Nanodispersions by Emulsification-Evaporation Method" Journal of The American Oil Chemistry Society , pp. 1053-1062, 2007

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวลลิตา บุรีรักษ์
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 16 ตุลาคม 2526
ที่อยู่	214/3 ต.น้ำร้อน ถ.พหลโยธิน อ.เมือง จ.ตาก 63000 โทร. 086-8388077
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2548
ผลงานทางวิชาการ	“ การลดปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ” การประชุมวิชาการ วิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 17, 2550 “ การดูดซับเบต้าแคโรทีนในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวดูดซับเม โซพอร์สคาร์บอน ” วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง, ฉบับที่ 3 , กันยายน, 2552