

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 50262

วัน,เดือน,ปี 28 เม.ย. 2547

.b.....

.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SYNTHESIS OF ACTIVATED CARBON FROM EUCALYPTUS WOOD
AND UNBURNED CARBON**



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


2002

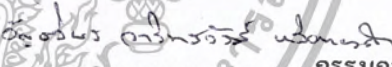
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

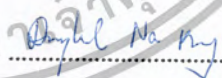
ปริญญาบัตรเรื่อง การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอน
โดย นางสาวกมลชนก ปานสง่า
นางสาวธนัญญา ประสิทธิ์วุฒิสักดิ์
นายธนชนันท์ บุรกรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ

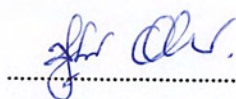
ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร


.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)


.....กรรมการ
(รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ)


.....กรรมการ
(ดร.ดวงกมล ณ ระนอง)


.....กรรมการ
(ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอน	
โดย	นางสาวกมลชนก ปานสง่า	รหัสประจำตัว 42010457
	นางสาวธนิษฐา ประสิทธิ์วุฒิสักดิ์	รหัสประจำตัว 42010467
	นายธนันันท์ บุรกรณ์	รหัสประจำตัว 42010651
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ	
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอน การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การเผาไม้ยูคาลิปตัสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน การกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาทดสอบการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลู จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเผา ไม้ยูคาลิปตัสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน คือ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที จะได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ 25.49 และร้อยละคาร์บอนคงตัว 73.88 สำหรับการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก คือ อุณหภูมิในการกระตุ้น 500 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 120 นาที ในส่วนการทดสอบการดูดซับไอโอดีนของคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และกากคาร์บอน พบว่ามีค่าการดูดซับไอโอดีน 709, 715 และ 670 มิลลิกรัมไอโอดีนที่ดูดซับได้ต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ ตามลำดับ ส่วนการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่ามีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 196, 204 และ 112 มิลลิกรัมเมทิลีนบลูที่ดูดซับได้ต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ ตามลำดับ จากการทดลองดังกล่าว จะเห็นได้ว่า คาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูใกล้เคียงกับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า สำหรับกากคาร์บอนซึ่ง

ไม่ได้ทำการกระตุ้นใด ๆ มีค่าการดูดซับน้อยกว่าคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าและคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักไม่มาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title **Synthesis of Activated Carbon from Eucalyptus Wood and Unburned Carbon**

By **Miss Kamonchanok Pansanga ID. 42010457**
Miss Tanitta Prasitwuttisak ID. 42010467
Mr. Tanuchnun Burakorn ID. 42010651

Advisor **Mr. Kriangsak Kraiwattanawong**

Co-advisor **Assoc.Prof.Dr.Anchaleeporn Waritswat Lothongkum**

Report for **Bachelor Degree of Chemical Engineering**
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This research synthesized activated carbon from eucalyptus wood and unburned carbon. Eucalyptus wood and unburned carbon were carbonized in nitrogen atmosphere and activated by 40-wt% sodium hydroxide solution. The adsorption capacity was studied by adsorption of iodine and methylene blue solution. The best conditions for carbonization in this work are at 500°C for 45 minutes with the heating rate of 10 °C/min obtaining 25.49% yield and 73.88% fixed carbon, and those for activation are at 500 °C for 120 minutes. The iodine numbers of the activated carbon activated by 40-wt% sodium hydroxide solution, commercial activated carbon and unburned carbon are 709, 715 and 670 mg/g activated carbon, respectively. In case of methylene blue, the adsorbed values are 196, 204, 112 mg/g activated carbon, respectively. It is found that the activated carbon activated by 40-wt% sodium hydroxide solution and the commercial one gave almost the same adsorption results. In addition, the unburned carbon which was not activated showed not much different adsorption results.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัยด้วยเงินรายได้คณะ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้วยเงินอุดหนุนโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน ของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคต ปีงบประมาณ 2546

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือในการเผาไม้ยูคาลิปตัส

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์

บริษัท แอ็ควานซ์ อะโกร จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอนบริษัท ลาร์โบทราญจน์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า

คุณไชยยันต์ ไชยยะ นักศึกษาปริญญาเอก The Joint Graduate School of Energy and Environment at King Mongkut's University of Technology Thonburi และ คุณธีระโชติ ศรีธีระวิโรจน์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการ

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือในทุกด้านมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดการทำวิจัย ทั้งนี้หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวกมลชนก ปานสง่า

นางสาวธนินฐา ประติพิริวุฒิสักดิ์

นายธนชนันท์ บุรกรณ์

20 มีนาคม 2546

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 คาร์บอนคัมมันต์	4
2.2 ไม้ยูคาลิปตัส	22
2.3 การดูดซับ	23
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 การทดลอง	35
3.1 ไม้ยูคาลิปตัส	35
3.2 กากคาร์บอน	37
3.3 คาร์บอนคัมมันต์ทางการค้า	37
3.4 การดูดซับไอโอดีน	37
3.5 การดูดซับเมทิลีนบลู	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	44
4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การกระตุ้นด้านซาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และการ ดูดซับไอโอดีน	47
4.3 การดูดซับเมทิลีนบลู	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	62
5.1 การเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน	62
5.2 การกระตุ้นด้านซาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	62
5.3 การทดสอบการดูดซับไอโอดีน	62
5.4 การทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลู	62
5.5 ข้อเสนอแนะ	62
5.6 การดำเนินงานขั้นต่อไป	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบประมาณ	69
ภาคผนวก ข. วิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน	73
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสารเคมีที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของ ตัวดูดซับที่สมดุล	76
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงค่าแก้ไขสำหรับการดูดซับไอโอดีน	79
ภาคผนวก จ. การหาค่าพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ตามวิธีวิเคราะห์ มาตรฐาน BET	81
ภาคผนวก ฉ. มาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดคุณภาพคาร์บอนกัมมันต์	82
ภาคผนวก ช. คุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	วัตถุดิบต่าง ๆ ที่ได้มีการศึกษาใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์	5
2.2	ส่วนประกอบหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่เนื่องจากการเกษตรต่างชนิดกัน	19
2.3	แสดงสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียสของ Arriagada	33
4.1	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 60 นาที	44
4.2	ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	46
4.3	ค่าการดูดซับไอโอดีนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ที่ใช้ในการกระตุ้น	47
4.4	ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	51
4.5	ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า	52
4.6	ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยกากคาร์บอน	53
4.7	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	54
4.8	ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล และปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สมดุล	55
4.9	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า	56
4.10	ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล และปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าที่สมดุล	56
4.11	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยกากคาร์บอน	57
4.12	ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล และปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักกากคาร์บอนที่สมดุล	58
4.13	การเปรียบเทียบงานวิจัย	60
ก.1	ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณองค์ประกอบแบบประมาทที่อุณหภูมิต่าง ๆ	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.2	ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณองค์ประกอบแบบประมาณที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่าง ๆ	71
ข.1	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายไอโอดีน	74
ข.2	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายเมทิลีนบลู	74
ค.1	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการดูดซับไอโอดีน	76
ง.1	ค่าแก้ไขสำหรับค่าการดูดซับไอโอดีน	79
ฉ.1	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์ผง	85
ฉ.2	คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์เม็ด	85
ฉ.3	แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบการบรรจุ	87
ช.1	คุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าของบริษัท คาร์โบกายจน์ จำกัด	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
2.1	โครงสร้างของแกรไฟต์	15
2.2	โครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์	15
2.3	ลักษณะของรูพรุนในคาร์บอนกัมมันต์	16
2.4	ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนผิวคาร์บอนกัมมันต์	18
2.5	ตัวอย่างปฏิกิริยาของคาร์บอนกัมมันต์ที่มีผิวเป็นกรด	18
2.6	ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับโมเลกุลกรด ด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่มีผิวเป็นด่าง	19
2.7	โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู	20
2.8	การดูดซับในลักษณะต่าง ๆ ด้วยแรงทางกายภาพ	24
2.9	กลไกการดูดซับ	25
2.10	ลักษณะเด่น ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบต่าง ๆ	27
2.11	ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง	30
4.1	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 60 นาที	45
4.2	ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	46
4.3	ค่าการดูดซับไอโอดีนที่เวลาต่าง ๆ ณ สภาวะในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	48
4.4	ค่าการดูดซับไอโอดีนที่เวลาต่าง ๆ ณ สภาวะในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	48
4.5	ค่าการดูดซับไอโอดีนที่เวลาต่าง ๆ ณ สภาวะในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	49
4.6	ค่าการดูดซับไอโอดีนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ที่ใช้ในการกระตุ้น	49
4.7	ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	51
4.8	ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า	52
4.9	ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยกากคาร์บอน	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.10	การคำนวณค่าปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อิ่มตัว	55
4.11	การคำนวณค่าปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ ทางการก้ำที่อิ่มตัว	57
4.12	การคำนวณค่าปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของกากคาร์บอนที่อิ่มตัว	59
ข.1	กราฟมาตรฐานของสารละลายไอโอดีน	75
ข.2	กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู	75
ค.1	การหาความเข้มข้นของไอโอดีนที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้น ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	77



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตมักก่อให้เกิดปัญหาต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อม หากไม่มีวิธีการกำจัดที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการกำจัดของเสียในปัจจุบันมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การสกัด การทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่มีอันตรายน้อยกว่า การตกตะกอน การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ (Adsorbent) เป็นต้น การดูดซับเป็นวิธีที่นิยมเพราะมีความสะดวกรวดเร็วและมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก ตัวดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เช่น โมเลกุลาร์ซีฟ ซีโอไลต์ ซิลิกาเจล (Silica gels) คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นต้น ตัวดูดซับเหล่านี้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เพื่อการดูดซับที่ต่างกัน ในบรรดาตัวดูดซับ คาร์บอนกัมมันต์มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการดูดซับสีหรือกลิ่น ใช้ดูดซับสารจำพวกอะโรมาติก โลหะหนักหรือตัวทำละลายต่าง ๆ เป็นต้น คาร์บอนกัมมันต์นั้นสามารถสังเคราะห์ได้จากของเสียหรือวัสดุเหลือใช้ต่าง ๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากของเสีย จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมไปพร้อม ๆ กับการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียหรือวัสดุเหลือใช้

กระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมมักก่อให้เกิดปัญหาทางด้านของเสีย โรงงานผลิตกระดาษก็เป็นอีกโรงงานหนึ่งที่เกิดปัญหาเช่นกัน ในกระบวนการผลิตกระดาษโรงงานจะใช้กระบวนการแยกเยื่อกระดาษจากไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus wood) วัสดุที่เหลือหลังจากทำการแยกจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำในโรงงาน สิ่งที่เหลือจากการเผาไหม้ คือ กากคาร์บอน (Unburned carbon) ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงจำเป็นต้องกำจัดด้วยการฝังกลบและใช้พื้นที่ในการฝังกลบมาก ถ้าหากนำกากคาร์บอนนี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ จะช่วยเพิ่มมูลค่าของของเสียและช่วยลดการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิตที่อาจส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม อีกทั้งไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้โตเร็วและมีมูลค่าน้อย ถ้าหากมีการศึกษาเพื่อเพิ่มมูลค่าแล้ว ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้กับไม้ยูคาลิปตัส ทั้งไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอนมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำมาผลิตคาร์บอนกัมมันต์

ในปัจจุบันผู้ประกอบการยังต้องนำเข้าตัวดูดซับ ทำให้ประเทศต้องสูญเสียเงินตราเป็นจำนวนไม่น้อย ถ้ามีการพัฒนาส่งเสริมการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ในประเทศจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอย่างจริงจังคาดว่าจะช่วยลดการนำเข้าได้อีกทางหนึ่ง จากความสอดคล้องใน

ด้านองค์ประกอบ คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์โดยใช้วัตถุดิบสองประเภท คือ กากคาร์บอนและไม้ยูคาลิปตัส

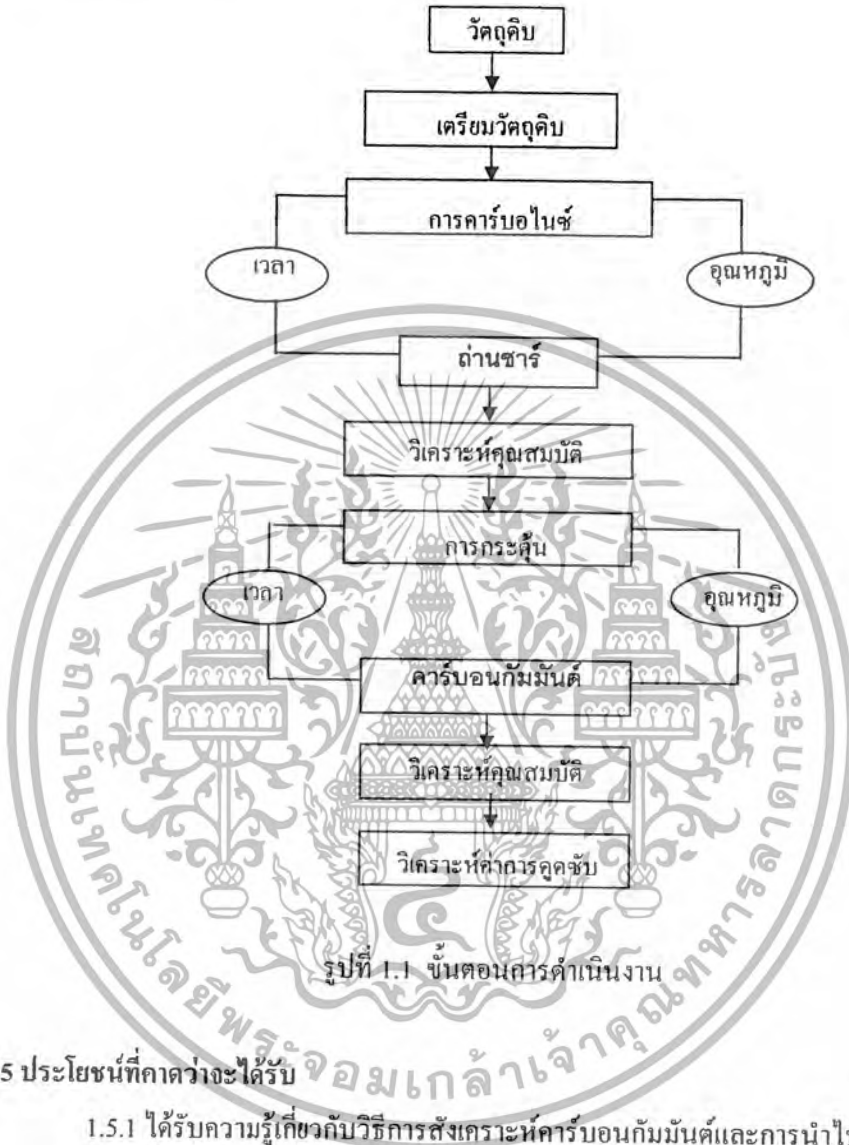
1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและกากคาร์บอน
- 1.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์
- 1.2.3 ศึกษาคุณลักษณะของคาร์บอนกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้
- 1.2.4 ศึกษาคุณสมบัติด้านการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ไม้ยูคาลิปตัสด้วยการเผาในเตาเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน
- 1.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้านซาร์ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติของกากคาร์บอนเพื่อใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์
- 1.3.4 หาค่าการดูดซับไอโอดีนของคาร์บอนกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้
- 1.3.5 ทดสอบคุณสมบัติการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน



1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้รับความรู้เกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์และการนำไปใช้ประโยชน์
- 1.5.2 เพิ่มมูลค่าและลดการกำจัดของเสีย ด้วยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์
- 1.5.3 เพื่อพัฒนาความคิดและทักษะในการวางแผนการทำงาน
- 1.5.4 ได้รับประสบการณ์ในการทำงานและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การบอณกัมมันต์

2.1.1 ความหมายของการบอณกัมมันต์

การบอณกัมมันต์ คือวัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) และกระบวนการกระตุ้น (Activation) คาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้จะเป็นที่รู้จักกันมานาน ในแง่ของการใช้เป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับสูง ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนมาก นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนเหล่านี้ยังมีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุและยึดเหนี่ยว โมเลกุลของสารต่าง ๆ ได้อย่างดี

การบอณกัมมันต์เป็นรูปอสัณฐานของถ่าน คือมีรูปร่างไม่แน่นอน ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวให้มากที่สุด โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ พื้นที่ผิวจะอยู่ระหว่าง 500-2000 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนตั้งแต่ 20 อังสตรอม ถึง 2000 อังสตรอม ใช้สำหรับดูดกลืน คอลลี หรือสารปนเปื้อนอื่น ๆ ความพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจากการกระตุ้นทางเคมีหรือการกระตุ้นทางกายภาพทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึก (Element crystallites) เพิ่มขึ้น มีพื้นที่ผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้น สามารถดูดกลืนและสีได้มากกว่าถ่านธรรมดา [1-3]

ด้วยเหตุนี้ จึงนิยมใช้คาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวดูดซับสารทั้งที่อยู่ในสถานะก๊าซและของเหลวในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยแบ่งการใช้งานตามลักษณะรูปร่างของคาร์บอนกัมมันต์ คือคาร์บอนกัมมันต์ชนิดที่เป็นผงละเอียดจะนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว เช่น ใช้ในการฟอกสีน้ำตาลดิบ ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชเพื่อฟอกสี และทำให้มีรสดีขึ้น ใช้ดูดกลืนและสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ใช้ในการดูดกลืนที่ไม่ต้องการในอุตสาหกรรมแอลกอฮอล์และเครื่องดื่ม และใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นต้น ส่วนคาร์บอนกัมมันต์ที่เป็นเม็ดหรือเกล็ดจะนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดก๊าซต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษทั้งที่ใช้ในกิจการทหารและที่ใช้ในงานทั่วไป เป็นต้น

วัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตคาร์บอนกัมมันต์ควรจะมีปริมาณคาร์บอนสูงและซีเถ้า (Ash) ค่าวัตถุดิบหลักที่มีกำเนิดมาจากพืชที่นิยมใช้ผลิตคาร์บอนกัมมันต์ได้แก่ ถ่านหิน ไม้ พืท และจาก

สัตว์ เช่น กระดูกสัตว์ เลือด เป็นต้น นอกจากนี้ในระยะหลังได้มีนักวิจัยหันมาสนใจศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด เปลือกปาล์ม มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์

2.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ (4-5)

วัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบไม่ว่าจะได้จากสัตว์ พืช และแร่ธาตุต่าง ๆ สามารถนำมาผลิตคาร์บอนกัมมันต์ได้ ซึ่งวัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตคาร์บอนกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมคือ พีท ถ่านหิน ลิกไนต์ ไม้ และกะลามะพร้าว เนื่องจากสามารถผลิตคาร์บอนกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรุกรุนขนาดเล็ก วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นคาร์บอนกัมมันต์ควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- มีปริมาณสารระเหยต่ำ
- มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง
- มีคุณสมบัติคงที่
- มีราคาถูกและหาง่าย

ตัวอย่างแหล่งของวัตถุดิบที่เคยมีผู้นำมาผลิตคาร์บอนกัมมันต์แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วัตถุดิบต่าง ๆ ที่ได้มีการศึกษาใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ [5]

ชานอ้อย (Bagasses)	ไม้ (Wood)
กากของบี๊ท (Beet-sugar sludge)	เขม่า (Lampblack)
เลือด (Blood)	กากหนัง (Leather waste)
กระดูก (Bones)	ลิกนิน (Lignin)
สารจำพวกแป้ง (Carbohydrates)	ถ่านลิกไนต์ (Lignite)
เมล็ดพืช (Cereals)	กากน้ำตาล (Molasses)
ถ่านหิน (Coal)	เปลือกถั่ว (Nut shell)
กะลามะพร้าว (Coconut shell)	หินน้ำมัน (Oil shale)
เมล็ดกาแฟ (Coffee beans)	ถ่านหินพีทรวน (Peat)
ชังข้าวโพด (Cormcobs and corn stalks)	กากกรดปิโตรเลียม (Petroleum acid sludge)
เปลือกเมล็ดฝ้าย (Cotton seed hull)	ถ่านหินน้ำมัน (Petroleum coke)
ของเสียโรงกลั่นสุรา (Distillery waste)	ของเสียจากเยื่อกระดาษ (Pulp-mill waste)
ขี้เลื่อย (Sawdust)	ของเสียจากยาง (Rubber waste)
ฝุ่นจากปล่องไฟ (Flue dust)	แกรไฟต์ (Graphite)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ [6]

สามารถแบ่งได้โดยใช้หลักต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ ตัวอย่างการแบ่งชนิดของคาร์บอนกัมมันต์ ได้แก่

ก. แบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น

- กระตุ้นทางเคมี (Chemical activated carbon)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน มักเป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ สารกระตุ้นที่ใช้ เช่น $ZnCl_2$ และ $NaCl$

- กระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical activated carbon)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ คาร์บอน ไดออกไซด์ คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดก๊าซ และไอระเหย

ข. แบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์

- รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับก๊าซ หรือไอระเหย

- รูพรุนขนาดกลาง (Transitional pore หรือ Mesopore)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 100 นาโนเมตร มักนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction) ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี

- รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 100 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่าง ๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสีและการผลิตยา

ค. แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

- ประเภทเป็นผง (Powder activated carbon หรือ PAC)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่นสารละลายได้หลายชนิด

- ประเภทเป็นเม็ด (Granular activated carbon หรือ GAC)

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำเป็นเกล็ด ใช้สำหรับทำก๊าซ

ให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซ และใช้ทำ หน้ากากป้องกันก๊าซและไอพิษต่าง ๆ

ง. แบ่งตามความหนาแน่นของคาร์บอนกัมมันต์

- ความหนาแน่นต่ำ

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มักใช้ประโยชน์ในสภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือทำน้ำให้บริสุทธิ์

- ความหนาแน่นสูง

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซ หรือไอระเหย

จ. แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- Gas adsorbent activated carbon

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่ เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท Hard artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จาก เมล็ดผลไม้ และถ่าน ไม้ที่เผาด้วยความดันสูง

- Colour adsorbent activated carbon

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นการเผาถ่านประเภท Soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่าน ไม้ ถ่านขานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากหินน้ำมัน และถ่านจาก กากน้ำตาล

- Metal adsorbent activated carbon

เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะต่าง ๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน พัลลเดียมจากแร่ นอกจากนี้ยังแบ่งตามสภาวะที่ใช้ เช่น Liquid-phase carbon และ Gas-phase carbon

2.1.4 ประโยชน์ของคาร์บอนกัมมันต์ [7]

ในอุตสาหกรรมมีการใช้คาร์บอนกัมมันต์อย่างแพร่หลาย ซึ่งคาร์บอนกัมมันต์มี คุณสมบัติในการฟอกสีและดูดซับสารได้หลายชนิด ซึ่งสามารถดูดซับได้ทั้งที่เป็นก๊าซและ ของเหลว หน้าที่ของคาร์บอนกัมมันต์ในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

คาร์บอนกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับก๊าซหรือไอ

- ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหาร และที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะคาร์บอนกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษหรือไอของสารอินทรีย์ได้

- ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ

- ใช้แยกเบนซอล (Benzol) ออกจากก๊าซอุตสาหกรรม

- ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยคาร์บอนกัมมันต์ จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำ ๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมัก อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น
 - กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น
 - อุตสาหกรรมทำนุหรี โดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ทำเป็นกั้นกรองของนุหรี
 - อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยคาร์บอนกัมมันต์จะดูดมลทินในอากาศ เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และอะเซทิลีน
- คาร์บอนกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดซับของเหลว จะใช้สำหรับฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์ ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น
- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลเพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
 - ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้ว ยังใช้ในการแยกเอาสบูและเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย
 - แยกสิ่งเจือปนจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น เจลาติน น้ำส้ม เพ็คติน ซ็อกโกแลต น้ำผลไม้ เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
 - ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องเค็มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้คาร์บอนกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเทอร์ ทำให้เครื่องดื่มที่ได้มีรสชาติดีขึ้น
- ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยา และเคมีภัณฑ์อื่น ๆ เช่น สเตรปโตมัยซิน (Streptomycin) คาเฟอีน (Caffeine) โซเดียมอะซิเตท (Sodium acetate) รวมทั้งกรดต่าง ๆ
- ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
 - ใช้แยกโลหะจากสารละลายที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ เป็นต้น
 - ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst carrier) เช่น เป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst support) สำหรับซิงค์อะซิเตท ในโรงงานผลิตไวนิลอะซิเตท
 - ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ให้ยาถูกดูดซับบนคาร์บอนกัมมันต์ ยาจะค่อย ๆ ออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่าง คือ ไฮดรอกซีอะมิโนฟีนิลาโซนิคแอซิด (Hydroxylamino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

phenylarsonic acid) สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้ออะมีบาและพาราไซต์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่ได้รับยาเกินขนาด หรือกินยาพิษ นอกจากนี้ยังใช้รักษาอาการมีก๊าซในกระเพาะมาก

- ใช้ดูดสารพวกไนโตรจีนัส และไลอะฟิลลิกคอลลอยด์ (Nitrogenous and Lyaphilic colloids) จากน้ำอ้อยและสารละลายน้ำตาล โดยตรวจสอบได้จากการวัดปริมาณกัม (Gum) และเพกติน (Pectin) การวัดค่าความหนืดของสารละลายน้ำตาล และการทดสอบการข้อมลี่

2.1.5 กระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์

ในปัจจุบันการผลิตคาร์บอนกัมมันต์มีวิธีหลากหลาย ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่ต้องการและวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต แต่โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

2.1.5.1 กระบวนการคาร์บอนไนซ์

กระบวนการคาร์บอนไนซ์ เป็นการไพโรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นในที่อับอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นของเหลวและก๊าซออกมาด้วย โดยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลัก (Aromatic ring) ที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันหาร์ท และก๊าซต่าง ๆ

ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ จัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ เนื่องจากในการคาร์บอนไนซ์จะเป็นการสร้างโครงสร้างของรูพรุน โดยกำจัดธาตุและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหย เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ ออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของก๊าซและน้ำมันหาร์ท จากนั้นจะได้ถ่านชาร์ซึ่งมีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ โครงสร้างนี้จะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยจะมีสารอินทรีย์ที่เป็นหาร์ทไปอุดช่องว่างเหล่านั้น ซึ่งในส่วนประกอบของถ่านชาร์ที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนคือไฮโดรเจน และคาร์บอนต่อออกซิเจน เพิ่มมากขึ้นจากวัตถุดิบในตอนแรกด้วย ขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอนไนซ์แบ่งได้ชัดเจนเป็น 3 ขั้นตอนคือ [8]

1. มีการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบที่ช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 135 องศาเซลเซียส
2. เข้าสู่ขั้นตอนการไพโรไลซิส โดยเกิดก๊าซและน้ำมันหาร์ทในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 135-400 องศาเซลเซียส
3. มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลงไปมาก ที่ช่วงอุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์จะมีลักษณะดังนี้ [9]

- มีสีดำตลอด (Uniformly black)
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา
- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

กระบวนการคาร์บอนไนซ์ให้ได้ถ่านชาร์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการทำได้โดยการปรับสภาวะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปร คือ [10]

1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์จะลดลง ส่วนน้ำมันชาร์และก๊าซที่ได้เพิ่มขึ้น และคุณสมบัติของน้ำมันชาร์จะมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น

2. อัตราการให้ความร้อน

อัตราการให้ความร้อน จะมีผลต่อคุณสมบัติ ปริมาณของน้ำมันชาร์และสารระเหย การเพิ่มอัตราความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า เพราะถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์ด้วยอัตราเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนจะเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ทำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อทำการกระตุ้น สารกระตุ้นจะเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่าย

3. ตัวกลางของปฏิกิริยา

จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา ถ้าก๊าซและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยก๊าซที่เป็นตัวกลาง เช่น ก๊าซไนโตรเจน (เมื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ถ้าตัวกลางเป็นก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะน้อยกว่าในสภาวะที่ใช้ตัวกลางที่เป็นก๊าซไนโตรเจน แต่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า

4. ธรรมชาติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีสภาวะที่เหมาะสมต่างกันสำหรับกระบวนการคาร์บอนไนซ์ โดยคาร์บอนกับมันต์จากวัตถุดิบที่ต่างกันอาจใช้วิธีกระตุ้นที่ต่างกันเพื่อที่จะได้คาร์บอนกับมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุดซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ในระบบที่เหมาะสมต่อไป

ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะมีความสามารถในการดูดซับต่ำมาก เพราะว่ากระบวนการคาร์บอนไนซ์ใช้อุณหภูมิ 300–700 องศาเซลเซียส จึงยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในรูพรุน หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์นี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.1.5.2 กระบวนการกระตุ้น

การกระตุ้นเป็นขั้นตอนที่ทำให้ถ่านชาร์มีความพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจำนวนมาก เพราะเป็นการกำจัดน้ำมันทาร์ที่ตกค้างอยู่ภายในรูพรุนให้หลุดออกมา ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จะมีอะตอมคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ด้วย จึงทำให้คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการกระตุ้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องจากวิธีการกระตุ้นนั้นมีมากมายหลายวิธี ซึ่งประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการอื่นๆ ก่อนที่จะทำการกระตุ้นอีกด้วย โดยทั่วไปแล้วกระบวนการที่นำมาใช้ในการกระตุ้นมี 2 วิธีคือ

1. กระบวนการกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี [11–12]

การกระตุ้นด้วยสารเคมี เป็นวิธีการที่นิยมมากในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ในทางการค้า โดยปกติแล้ววัตถุดิบที่ใช้ในการกระตุ้นแบบนี้มักเป็นไม้จำพวกต่าง ๆ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นอยู่ในช่วง 500–900 องศาเซลเซียส การกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

- ทำความถี่ไปกับการคาร์บอนไนซ์ โดยการเติมสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้นลงไปผสมคลุกเคล้ากับวัตถุดิบ สารเคมีที่เติมจะมีส่วนช่วยในการคาร์บอนไนซ์ คือ ทำให้เกิดน้ำมันทาร์ลดน้อยลง

- ทำหลังจากการคาร์บอนไนซ์ โดยนำวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนไนซ์แล้ว มากระตุ้นด้วยสารเคมีอีกครั้ง

สารเคมีที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นได้แก่

กรดบอริก (H_3BO_3)	ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
เกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)	กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)	โปตัสเซียมไธโอไซยาเนต ($K_2S_2O_3$)
แคลเซียมฟอสเฟต ($Ca(PO_3)_2$)	เกลือแมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2$)
ไซยาไนด์ (CN^-)	โปตัสเซียมซัลไฟด์ (K_2S)
ปูนโดโลไมต์ ($CaMg(CO_3)_2$)	กรดไนตริก (HNO_3)
เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$)
กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

ตัวอย่างการกระตุ้นด้วยสารเคมี

การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ [11]

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง โดยการใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ผสมกับวัตถุดิบที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิที่ต่ำในช่วงนี้มีผลอย่างมากต่อสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตได้ หลังจากนั้นจะนำไปทำการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 – 850 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมจะคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำเอาซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่เป็นอย่างมาก ด้วยประสิทธิภาพของการนำซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ที่ค่อนข้างจำกัด ประกอบกับปัญหาการกัดกร่อนต่อเครื่องปฏิกรณ์ทำให้การใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นในระยะหลังจึงลดลง

การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

กระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น จะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ค่อนข้างต่ำคือ 400 – 500 องศาเซลเซียส ซึ่งการใช้กรดฟอสฟอริกนั้นสามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่โดยกรดฟอสฟอริกยังมีความเข้มข้นสูง พบว่าวัตถุดิบที่เป็นไม้สามารถผลิตเป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพดีโดยวิธีนี้

การกระตุ้นด้วยสารประกอบของโซเดียม หรือโปตัสเซียม [13]

เมื่อให้ความร้อนแก่วัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นคาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งผสมสารละลายที่มีไอออนของโซเดียมหรือโปตัสเซียม ไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของแกรไฟต์ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ และออกซิเจน จะหลุดออกทำให้ได้คาร์บอนกัมมันต์ตามที่ต้องการ

มีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาวิธีการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ โดยใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งวัตถุดิบที่ได้ทำการศึกษาคือ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและไม้ชนิดต่าง ๆ อย่างไรก็ตามกระบวนการกระตุ้นที่ได้ทำก็มีหลายกระบวนการที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะให้ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น ซึ่งเราพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้ คือ

- อัตราส่วนของลิกนินต่อเซลลูโลสในวัตถุดิบ
- อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ
- อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น
- อัตราการให้ความร้อนในการกระตุ้น

2. กระบวนการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ

กระบวนการนี้ใช้ก๊าซ เช่น ไออน้ำ อากาศ หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไปทำการออกซิไดซ์น้ำมันคาร์ และอะตอมของคาร์บอนบางตัวในโครงสร้างผลึกในสภาวะที่ควบคุมไว้ ทำให้รูพรุนกว้างมากขึ้นและทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น

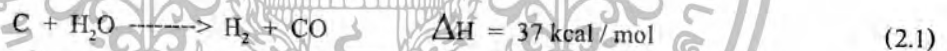
ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้น คือ [5,14]

- โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น
- สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในเนื้อถ่านชาร์
- ชนิดของก๊าซออกซิไดซ์
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ความดันของก๊าซ
- เวลาในการเกิดปฏิกิริยา
- ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

ตัวอย่างการกระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพ

การกระตุ้นด้วยไออน้ำ (Activation with steam)

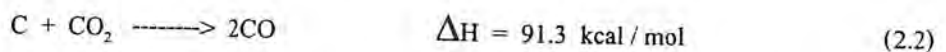
ปฏิกิริยานี้ใช้ไออน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคูความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ 760 - 950 องศาเซลเซียส ดังสมการ



อัตราการออกซิไดซ์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรให้อุณหภูมิเกิน 1000 องศาเซลเซียส เพราะปฏิกิริยาจะกลายเป็นการควบคุมด้วยอัตราการแพร่ ซึ่งอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกจำนวนมากจะถูกเผาไหม้ ทำให้ขนาดและความพรุนของอนุภาคลดลง

การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Activation with carbon dioxide)

ปฏิกิริยานี้ใช้ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ปฏิกิริยาคูความร้อน ดังสมการ

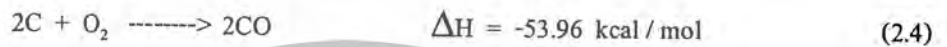
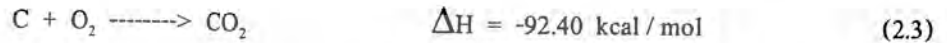


จากค่า ΔH จะเห็นว่าปฏิกิริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าการกระตุ้นด้วยไออน้ำ จึงต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า โดยใช้ประมาณ 850 - 1100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ด้วย ในทางเทคนิคการปฏิบัติแล้วจะใช้ก๊าซเชื้อเพลิงเผาไหม้ ซึ่งจะให้ทั้ง

ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และอาจจะมียออกซิเจนส่วนเกินบ้างเล็กน้อย หรืออาจจะมีคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเชื้อเพลิงเป็นสารกระตุ้นร่วมกันเข้าไปด้วย

การกระตุ้นด้วยอากาศ (Activation with air)

ปฏิกิริยานี้อาศัยออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการ



การใช้อากาศเพื่อทำการกระตุ้นไม่เป็นที่นิยม เพราะว่าการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยากกว่าปฏิกิริยาชนิดคูดความร้อน อีกทั้งออกซิเจนจะทำให้ผิวของถ่านไหม้ ทำให้เกิดการสูญเสียอย่างมาก

การกระตุ้นทางกายภาพ มีข้อดีคือ หลังจากการกระตุ้นแล้วสามารถนำคาร์บอนกัมมันต์ไปใช้ได้ทันที ไม่ต้องมีปัญหาในการล้างสารที่อาจเป็นอันตราย ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาสูงกว่าการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี รูปพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จะเล็กกว่าชนิดที่ผลิตด้วยวิธีทางเคมี รูปพรุนเป็นประเภทรูปพรุนขนาดเล็ก ซึ่งเหมาะสำหรับดูดกลืน ไอ หรือก๊าซพิษ

2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์ [15]

ก. ชนิดของวัตถุดิบ

การผลิตคาร์บอนกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิด และคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้ก็จะมีคุณภาพแตกต่างกันไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้าง ลักษณะ และองค์ประกอบของวัตถุดิบในแต่ละชนิด

ข. วิธีการในการกระตุ้น

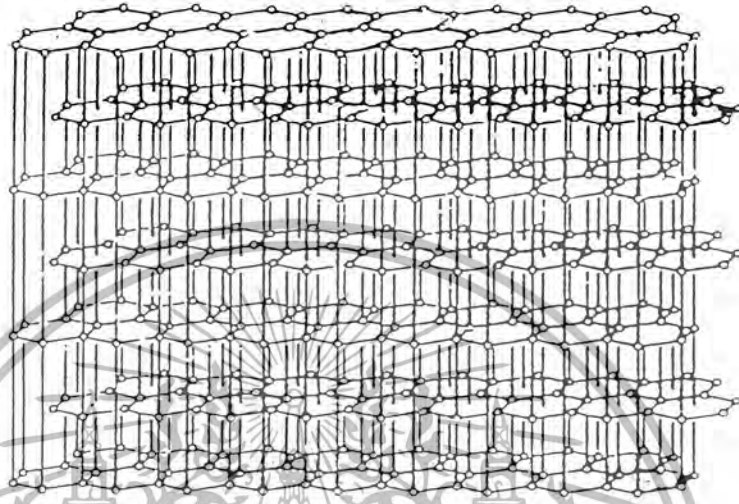
ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์ในกระบวนการผลิตด้วยวิธีการทางเคมีนั้นมีดังนี้

- ชนิดและปริมาณของสารกระตุ้น
- เวลาในการกระตุ้น
- อุณหภูมิในการกระตุ้น

2.1.7 โครงสร้างรูปพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ [16-17]

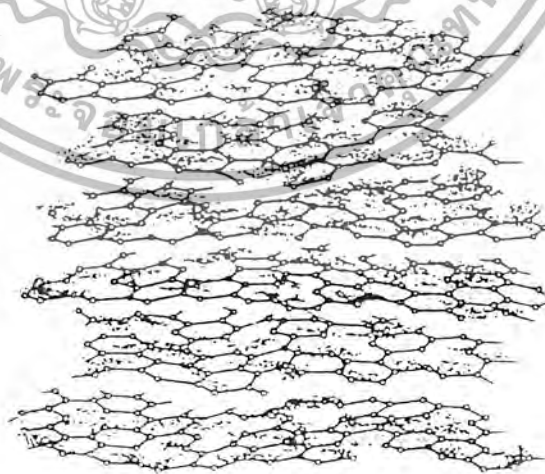
คาร์บอนกัมมันต์ มีโครงสร้างที่เป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของคาร์บอนกัมมันต์ซึ่งมีมากมาย แกรไฟต์ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนซึ่งเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular hexagons) ระยะห่าง

ระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 3.35 อังสตรอม อิเล็กตรอนของคาร์บอน 3 ตัวจะสร้างพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่อิเล็กตรอนอีก 1 ตัวที่เหลือจะเคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแกรไฟต์ [18]

โครงสร้างของคาร์บอนกับมันต์แตกต่างจากแกรไฟต์ ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็ก ๆ มีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างผลึกเล็ก ๆ นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของคาร์บอนกับมันต์ [18]

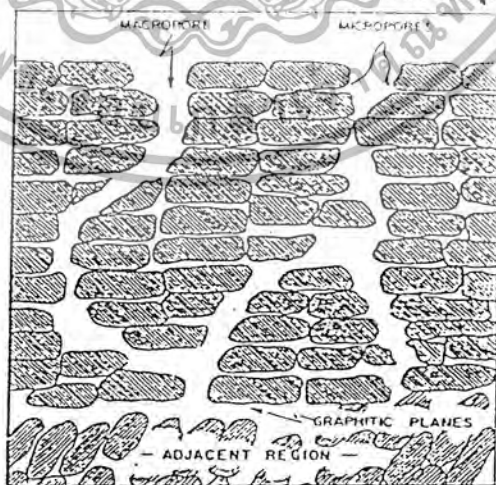
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาลักษณะของคาร์บอนกัมมันต์ จะพบว่ามีรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะเข้าไปในเนื้อของคาร์บอนกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเหล่านี้เปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่เสียบเข้าไปในเนื้อของคาร์บอนกัมมันต์ โดยปกติแล้วคาร์บอนกัมมันต์โดยทั่วไปมีปริมาตรความพรุนอยู่ระหว่าง 0.5-1.5 มิลลิลิตรต่อกรัม จากลักษณะและขนาดของรูพรุนสามารถแบ่งรูพรุนได้เป็น 3 ขนาด คือ

1. รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) รัศมีของรูพรุนมากกว่า หรือ เท่ากับ 1000 – 2000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นรูพรุนขนาดใหญ่จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูที่เล็กกว่า

2. รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) ขนาดรัศมีของรูพรุนอยู่ระหว่าง 15-16 อังสตรอมถึง 1000-2000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างตัวดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนขนาดกลางได้แก่ ซิลิกาเจล อะลูมินาเจล (Alumina gels) อะมิโนซิลิเกตอะคทีฟ (Aminosilicate catalyst)

3. รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) ขนาดรัศมีของรูพรุนน้อยกว่า 15-16 อังสตรอม ปริมาตร 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก บางครั้งถึง 1500 ตารางเมตรต่อกรัม รูพรุนขนาดกลางมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุดทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่ำ ๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกกันว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น



รูปที่ 2.3 ลักษณะของรูพรุนในคาร์บอนกัมมันต์ [18]

ในรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของรูพรุนในคาร์บอนกัมมันต์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น รูพรุนขนาดใหญ่จะเป็นรอยแตกที่ผิวของคาร์บอน รูพรุนขนาดกลางจะแตกสาขาออกมาจากรูพรุนขนาดใหญ่และรูพรุนขนาดเล็ก ก็จะแตกสาขาออกมาจากรูพรุนขนาดกลาง

2.1.8 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์ [19]

คาร์บอนกัมมันต์เตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส เรียกกระบวนการนี้ว่าการคาร์บอนไนซ์ ซึ่งอะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน ได้แก่ ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกในรูปของก๊าซ อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นจะประกอบด้วยวงหกเหลี่ยม เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงซึ่งเป็นที่อยู่ของพวกน้ำมันทาร์ และสารอื่น ๆ ที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างรูพรุนเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับโดยการกระตุ้น ซึ่งจะเป็นการล้างพวกน้ำมันทาร์ และสารต่างๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรง แล้วจะสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทน ดังนั้นโครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วย

โดยทั่วไปผิวของคาร์บอนกัมมันต์เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจน ที่เรียกว่า ฝิวออกไซด์ มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก คือประมาณ 400 - 500 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนผิวคาร์บอนกัมมันต์จะมีคุณสมบัติคล้ายกรด ได้แก่ Carbonyls, Phenols, Lactones, Aldehyde, Ketone, Quinones, Hydroquinone, Anhydride เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์แบบนี้ค่อนข้างเสถียรแม้จะอยู่ในสูญญากาศ โดยทั่วไปจะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อย จะสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำและถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มาก ๆ จะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน

I : Carbonyl group,

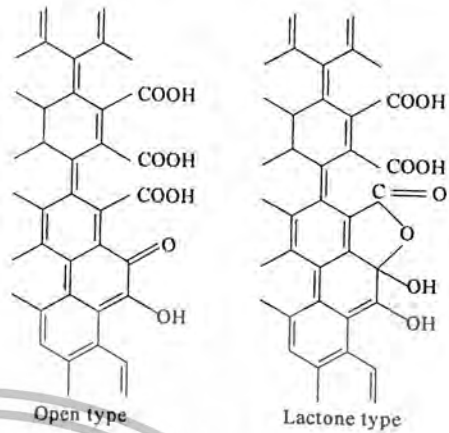
a : Removed by 200 °C

b : Removed above 325 °C

II : Carboxyl group which exists as lactol group

III : Phenolic hydroxyl group

IV : Carbonyl group



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนผิวคาร์บอนกัมมันต์

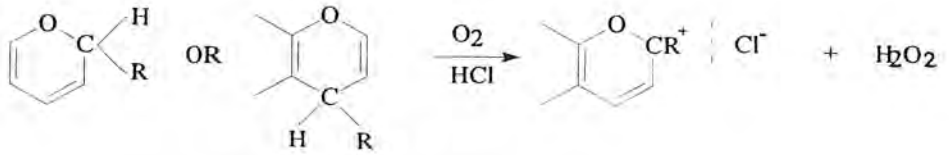
Surface oxides on carbon surface [20]



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างปฏิกิริยาของการคาร์บอนกัมมันต์ที่มีผิวเป็นกรด [21]

2. ชนิดที่เป็นค่า เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ Hydroxide, Carbonate เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างปฏิกิริยาการออกซิเดชัน โมเลกุลกรด ด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่มีผิวเป็นค่าง [22]

จากการศึกษาของ K.Gergove [23] พบว่าถึงแม้จะทำการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ด้วยวิธีการเดียวกันจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน หมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์จะมีความแตกต่างกันดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่เหลือจากการเกษตรต่างชนิดกัน [24]

วัตถุดิบ	Content of surface functional groups, mg-eq g ⁻¹	
	=C=O 0.03	-OH 0.05
Apricot stones	3.27	0.02
Grape seeds	1.32	2.05
Cherry stones	1.42	1.90

2.1.9 การวิเคราะห์คุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์

การวิเคราะห์หาคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์นั้น สามารถพิจารณาได้จากคุณสมบัติต่าง ๆ คือ พื้นที่ผิว คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) คุณสมบัติในการดูดซับ เช่น การดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทิลีนบลู และคุณสมบัติด้านเคมีฟิสิกส์ เช่น ปริมาณสารระเหย ปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้า

ก. คุณสมบัติในการดูดซับ

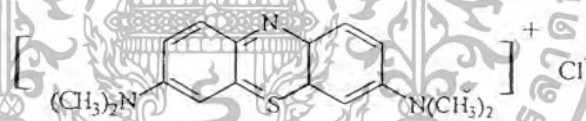
คุณสมบัติในการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์นั้น หาได้จากไอโซเทอมของการดูดซับของ คาร์บอนกัมมันต์เพื่อนำไปดูดซับของเหลว ตัวอย่างของคุณสมบัติในการดูดซับ คือ

- การดูดซับไอโอดีน

การศึกษาการดูดซับไอโอดีนเป็นวิธีที่ง่ายในการหาพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ โดยเป็นการหาจำนวนโมลลิกรัมของสารละลายไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อคาร์บอนกัมมันต์ 1 กรัม ในบางครั้งคาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็กสูง อาจมีค่าไอโอดีนต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของไอโอดีนไม่สามารถเข้าไปสู่รูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรได้

- การดูดซับเมทิลีนบลู

ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูจะสามารถบอกค่าการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ได้สำหรับโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับโมเลกุลของเมทิลีนบลู ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงของรูพรุนขนาดกลาง คือ จะมีขนาดใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร โดยโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเมทิลีนบลูแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู [5]

ข. คุณสมบัติทางค่านีลส์

- ปริมาณสารระเหย

เป็นค่ามาตรฐานที่ใช้กำหนดค่าสารระเหยที่อยู่ในถ่านหินและโค้ก โดยนำมาประยุกต์ใช้กับคาร์บอนกัมมันต์ได้ ทำการทดสอบได้โดยนำตัวอย่างมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.1 นาโนเมตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ค่าของปริมาณสารระเหยจะเป็นมวลที่หายไปอันเกิดจากการให้ความร้อนที่สภาวะดังกล่าวแก่คาร์บอนกัมมันต์

- ปริมาณความชื้น

เป็นการหาปริมาณน้ำที่มีในคาร์บอนกัมมันต์ โดยการอบให้แห้งในเตาอบ ทำการวิเคราะห์โดยบดคาร์บอนกัมมันต์ชนิดผงปริมาณ 1-2 กรัม หรือชนิดเม็ด 5-10 กรัม นำไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ (ประมาณ 3 ชั่วโมง) สามารถคำนวณปริมาณความชื้นได้จากน้ำหนักที่หายไป

- ปริมาณเถ้า

ปริมาณเถ้าในคาร์บอนกัมมันต์อาจมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบ คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง และเวลาสูง ปริมาณเถ้าของคาร์บอนกัมมันต์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เถ้าโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยออกไซด์ นอกจากนี้จะเป็นสารประกอบพวกซิลิเกต คาร์บอนเนต และสารประกอบอื่น ๆ ของเหล็ก อะลูมิเนียม แคลเซียม โซเดียม โปตัสเซียม แมกนีเซียม และโลหะอื่น ๆ ซึ่งจะมีสารประกอบเหล่านี้อยู่ในปริมาณเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะประกอบด้วย ซิลิกอน ซึ่งวิธีการที่จะใช้ในการกำจัดเถ้าออกจากคาร์บอนกัมมันต์นั้นจะใช้กรด หากมีเถ้าที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อนมากจะใช้กรดที่ผสมกัน เช่น ใช้กรดที่ผสมกันระหว่าง กรดไฮโดรฟลูออริกและกรดไฮโดรคลอริก การหาปริมาณเถ้าสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างใส่ในครุชชีเบต และนำไปใส่ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-16 ชั่วโมง ซึ่งมวลของเถ้าจะคงที่ในเวลาเท่าใดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ

ค. พื้นที่ผิว

ในการวัดพื้นที่ผิวจะต้องใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ ซึ่งไอโซเทอมนี้จะมีรูปแบบตามธรรมชาติของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะทำให้การทดสอบที่อุณหภูมิคงที่ ที่ความดันย่อยต่าง ๆ เพื่อสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ จากไอโซเทอมของการดูดซับข้อมูลที่ได้คือ

- ค่าของพื้นที่ผิว
- ค่าของปริมาตรรูพรุน
- ลักษณะเคมีพื้นที่ผิว (Surface chemistry) ของตัวดูดซับ
- ข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับ
- ประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบการแยกหรือการทำให้บริสุทธิ์

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพ ทั้งหมดสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม โดยในตอนแรกเสนอโดย Brunauer, Deming, and Teller (BDDT) ในปัจจุบันการแบ่งกลุ่มได้ถูกเรียกว่า Brunauer, Emmett and Teller (BET) classification ในทุกกรณีเมื่อค่าความดันย่อยมีค่าเพิ่มขึ้นปริมาณการดูดซับก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายชั้น

2.2 ไม้ยูคาลิปตัส (25-26)

ไม้ยูคาลิปตัสมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Eucalyptus Camaldulensis* Dehnh. อยู่ในวงศ์ Myrtaceae มีชื่อสามัญแตกต่างกันไปเช่น red lever gum, red gum, murray red gum และ river gum เป็นไม้ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีความสูง 24-26 เมตร หรืออาจจะสูงถึง 50 เมตรก็มี ถ้าขึ้นในที่โล่ง จะมีเรือนยอดโปร่งบาง แผ่กว้าง กล้าไม้และใบอ่อนเกิดเป็นคู่ตรงข้าม 3-4 คู่ แล้วเรียงสลับกัน ลักษณะใบเรียวยาว ใบอ่อนมีสีเขียวปนเทา มีขน ใบแก่เรียงสลับกัน ลักษณะใบเป็นรูปหอก มีขนาดตั้งแต่ 12-2.5 x 0.3-0.8 นิ้ว ใบสีเขียวอ่อนอมสีเทา ใบบางและห้อยลง เส้นใบมองเห็นได้ชัด เปลือกมีลักษณะเรียบ เป็นมัน สีเทาสลับขาวและน้ำตาลแดงเป็นบางแห่งสลับกัน ขาวตามลำต้น เปลือกนอกจะแตกออกเป็นแผ่นออกจากผิวของลำต้นเมื่อถึงฤดูแต่ละปี เปลือกนอกหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตร เมล็ดมีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร สีเหลือง เมล็ดจำนวน 1 กรัม มีเมล็ดประมาณ 773 เมล็ด ช่อดอกเกิดตรงระหว่างกิ่งกับใบ มีก้านดอกเรียวยาว ก้านดอกย่อย ดอกมีกลีบรองดอกที่มีโคนกลีบติดกันแบบรูปถ้วย ดอกมีสีขาวเหลือง และมีลักษณะครึ่งวงกลมหรือรูปถ้วย มีขนาด 0.2-0.3 x 0.2-0.3 นิ้ว ผิวนอกแข็ง เมื่อยังอ่อนอยู่จะมีสีเขียวและจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เมื่อผลแก่ผ่าจะแยกออกทำให้เมล็ดที่อยู่ภายในร่วงหล่นออกมา ลักษณะเนื้อไม้มีสีน้ำตาลอ่อน น้ำตาลแดง กระพี้และแก่นสีต่างกัน เนื้อไม้ค่อนข้างละเอียด เย็นสน (Interlocked grain) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.9-1.0

ไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส จัดว่าเป็นไม้โคเร็วชนิดหนึ่งที่นิยมปลูก เพราะมีผลตอบแทนทางเศรษฐกิจได้รวดเร็ว และมีลักษณะการใช้ประโยชน์หลาย ๆ อย่าง ได้รับความนิยมนิยมและปลูกกันแพร่หลายกระจายตามภูมิภาคต่าง ๆ ของโลก เช่น ในออสเตรเลีย จีน แองโกลาบราซิล พม่า โคโลมเบีย เอธิโอเปีย โลบิเรีย มาลาวี มาลากัสการ์ ไนเจอร์ ไนจีเรีย ปากีสถาน ศรีลังกา ชูดาน เวียดนาม อินเดีย สเปน โปรตุเกส ฮาร์เจนตินา สหรัฐอเมริกา และประเทศอื่น ๆ อีกมากมาย ปลูกเป็นสวนป่า ในพื้นที่แห้งแล้ง บางประเทศปลูกไว้ริมสองข้างทาง นำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน ไม้ใช้สอย และเพื่ออุตสาหกรรม ซึ่งการปลูกไม้ชนิดนี้สามารถขยายพันธุ์ได้ดี เติบโตเร็วในเกือบทุกประเทศ เป็นไม้สำคัญชนิดหนึ่งที่แก้ปัญหามลภาวะทางอากาศและดินเพื่อทำเป็นเชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้ยังเป็นแนวป้องกันลมและปกคลุมดิน เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ จากการที่ได้รับความนิยมนิยมปลูกกันกว้างขวาง ทำให้เกิดปัญหาการบุกรุกพื้นที่ป่า พื้นที่การเกษตร เพื่อนำมาปลูกยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการต่อต้านการปลูกยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส โดยมีเหตุผลต่าง ๆ เช่น เป็นพืชใช้น้ำมาก ทำให้ดินสูญเสียธาตุอาหาร ทำให้มีผลกระทบต่อกรเจริญเติบโตของพืชข้างเคียง ทำลายสภาพแวดล้อม เป็นต้น เหตุผลดังกล่าวนี้ ได้มีนักวิชาการทำการศึกษาและชี้แจงให้เห็นข้อเท็จจริงแล้ว และถ้าหากทำการปลูกไม้ยูคาลิปตัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คามาลคูเลนซิส ในพื้นที่ดินทราย พื้นที่บริเวณน้ำท่วม พื้นที่ดินเค็ม พื้นที่ดินเปรี้ยว พื้นที่หินปูน เป็นต้น จะให้คุณภาพประโยชน์มากกว่าการปลูกพืชชนิดอื่น เพราะสภาพพื้นที่ดังกล่าว ไม้ยูคาลิปตัสคามาลคูเลนซิส สามารถเจริญเติบโตได้ดี สำหรับในประเทศไทยไม้ยูคาลิปตัสคามาลคูเลนซิส ได้รับการสนับสนุนและได้รับความนิยมนำมาปลูกเป็นสวนป่า ทั้งภาครัฐบาลและภาคเอกชน กระจายทั่วทุกภาคของประเทศ เช่น โครงการปรับปรุงป่าสงวนแห่งชาติที่ 4 อำเภอกันทรารมย์ จังหวัดศรีสะเกษ ของกรมป่าไม้ สวนป่าลาดกระทิง จังหวัดฉะเชิงเทรา ของบริษัท ไม้ฮัคไทย สวนป่าพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี สวนป่าคลองท่อม จังหวัดกระบี่ ขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ สวนป่ากิตติ จังหวัดฉะเชิงเทราของบริษัทเกษตรรุ่งเรืองจำกัด สวนป่าของบริษัทสหวิริยาจำกัด ในจังหวัดราชบุรีและจังหวัดปราจีนบุรี นอกจากนี้ยังมีปลูกเป็นรายย่อย รวมถึงการปลูกป่าชุมชน การปลูกไม้ใช้สอยตามหัวไร่ปลายนา เป็นต้น

การใช้ประโยชน์

ไม้ยูคาลิปตัสคามาลคูเลนซิส จัดว่าเป็นไม้เนื้อแข็งขนาดใหญ่พอที่จะใช้ประโยชน์มากกว่าที่ไร้ทำไม้พื้นและเสาถ่านเพียงอย่างเดียว เมื่ออายุครบ 5 ปีโดยประมาณ มากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนที่ปลูกทั้งหมด จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงระดับอกมากกว่า 15 เซนติเมตร ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้านด้วยกันดังนี้ ด้านพลังงาน ใช้ทำฟืนในครัวเรือน ทำฟืนในอุตสาหกรรม เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำถ่าน เป็นต้น ด้านอุตสาหกรรมที่ใช้ไม้ทำผลิตภัณฑ์ ใช้ทำเยื่อกระดาษและกระดาษ ไม้ฮัคแผ่นเรียบ ไม้บาง เป็นต้น ด้านการก่อสร้าง ใช้ทำเสาบ้าน เสาไฟฟ้า ทำพื้นบ้าน นอกจากนี้ยังใช้ทำเครื่องมือเกษตร ใช้เป็นอาหาร ทำน้ำมันระเหยจากใบดอก ใช้เลี้ยงผึ้ง

2.3 การดูดซับ

การดูดซับ คือ กระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารหนึ่งยึดติดอยู่กับผิวของสารอีกสารหนึ่ง สารที่ไปยึดเกาะอยู่ผิวหน้าเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ตัวถูกดูดซับไปเกาะ เรียกว่า ตัวดูดซับ ปริมาณการดูดซับจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ พื้นผิวและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ การดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการแยกสารหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น

2.3.1 ประเภทของการดูดซับ [27-29]

การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับประเภทนี้ แรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะเป็นแรงค่อนข้างอ่อน เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole forces) เป็นต้น โดยที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะมีคุณลักษณะทางเคมีเหมือนเดิม

ลักษณะการเกาะจับด้วยแรงทางกายภาพเกิดจากผล 3 ประการ ดังรูปที่ 2.8

1. เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่
2. เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว สามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มาอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะแบบเดียวกันเข้ามาจะเกิดแรงดึงดูดกัน แรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงอ่อน ๆ ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลที่ไม่มีขั้วทั้งคู่
3. เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงกันข้ามแล้วเกิดการดึงดูดกัน ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้วและ โมเลกุลของตัวดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว

โมเลกุลมีขั้ว-โมเลกุลมีขั้ว

โมเลกุลไม่มีขั้ว-โมเลกุลไม่มีขั้ว

โมเลกุลมีขั้ว-โมเลกุลไม่มีขั้ว



รูปที่ 2.8 การดูดซับในลักษณะต่าง ๆ ด้วยแรงทางกายภาพ [13]

ข. การดูดซับทางเคมี

จะเกี่ยวข้องกับแรง หรือพันธะทางเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยา การเกาะของตัวถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับจะเหมือนแรงที่ใช้ยึดเหนี่ยวกันระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล การดูดซับทางเคมีบางครั้งต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วย

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่มีการถ่ายเทหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน สามารถผันกลับได้ในสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน แต่การดูดซับทางเคมีจะผันกลับไม่ได้
2. การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดขึ้นได้ทั่ว ๆ ไป บนพื้นผิวตัวดูดซับที่ไม่มีบริเวณจำเพาะ ในการเกิดกระบวนการดูดซับภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้นได้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น และโดยทั่วไปการดูดซับทางเคมีจะเกิดแบบชั้นเดียวเท่านั้น
3. ความร้อนที่ได้จากการดูดซับทางกายภาพจะน้อยกว่าการดูดซับทางเคมี

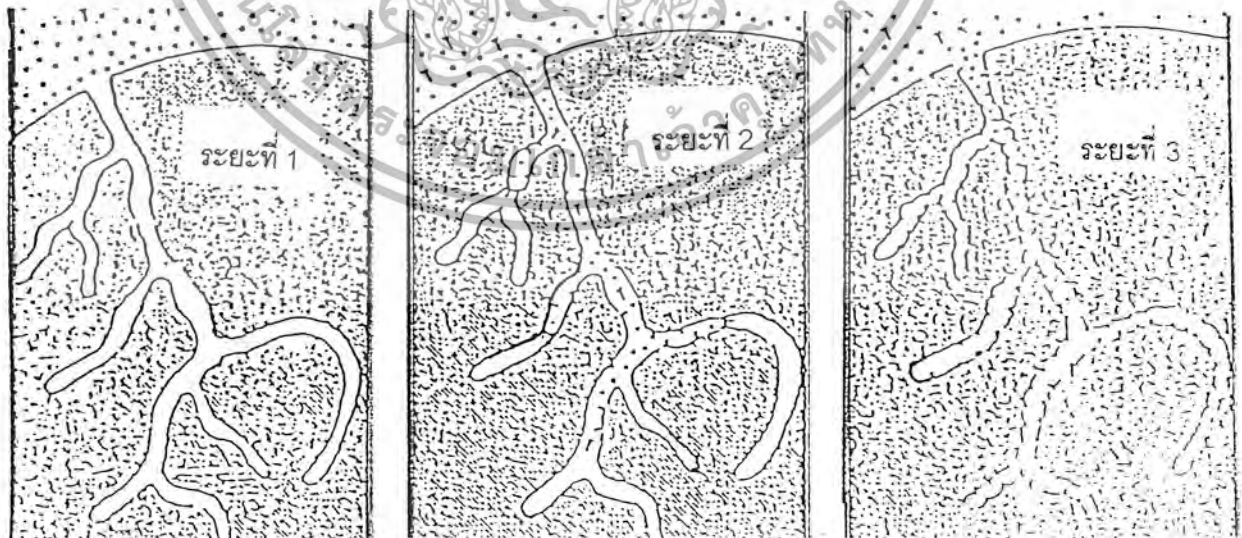
2.3.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 3 ระยะดังแสดงในรูปที่ 2.9 คือ

ระยะที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 เกิดการดูดติดผิวในรูพรุน ระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวตัวดูดซับซึ่งอาจจะเกิดการดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพ หรือทางเคมี หรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน



รูปที่ 2.9 กลไกการดูดซับ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Factors affecting adsorption) [28]

ก. ธรรมชาติของตัวดูดซับ (Nature of the adsorbent)

- พื้นที่ผิวและ โครงสร้างของรูพรุน (Surface area and pore structure)

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่ง ที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นแต่ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

- ขนาดของตัวดูดซับ (Adsorbent size)

ถ้าตัวดูดซับ ไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมาก ๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

ข. ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (Nature of the adsorbate)

- ความสามารถในการละลาย

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้น้อย มักสามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตาม ค่ากล่าวข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิด เกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก

- น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้น การดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลให้ความสามารถในการละลายลดลง

- ความมีขั้วของโมเลกุล

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

ก. ผลของอุณหภูมิ (Effect of temperature)

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

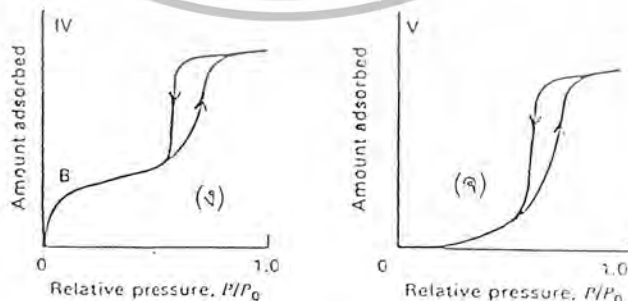
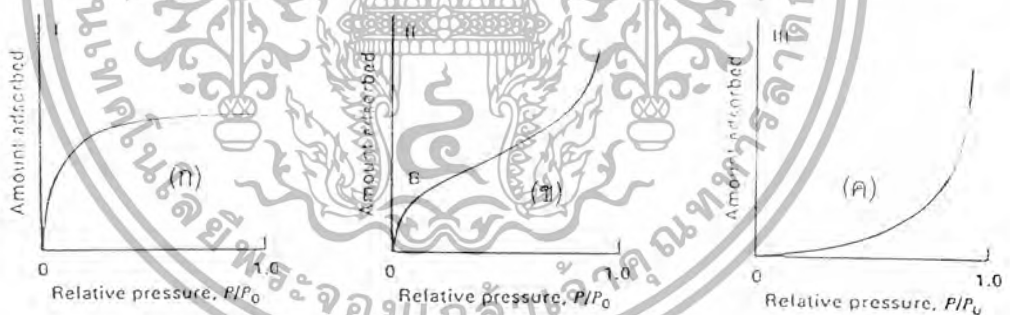
2.3.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) [27-28]

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารที่ถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุลและที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือไปเขียนกราฟ กับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับจะได้ไอโซเทอมของการดูดซับซึ่งสามารถนำไปใช้หาความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับสารและสามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่างๆ ได้

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มดังนี้

1. Langmuir ได้มาจาก Langmuir equation isotherm รูปร่างของไอโซเทอมแบบนี้จะพบมากในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อยมาก เช่น ถาร์บอนกัมมันต์ ซิลิกาเจล และซีโอไลต์ การดูดซับจะเป็นแบบชั้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ก

2. Sigmoid หรือ S-shaped isotherm จะพบในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ข ที่จุด B จะเป็นตำแหน่งที่มีการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ และเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น



รูปที่ 2.10 ลักษณะเส้น ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแบบต่าง ๆ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Convex isotherm ที่ไม่มีจุด B จะเป็นแบบที่พบได้ยาก เกิดขึ้นในกรณีที่มีการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีแรงดึงดูดที่อ่อน ทำให้ตัวถูกดูดซับไม่เปียกผิวของตัวดูดซับ เช่น ใช้น้ำมันแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ค

4. เหมือนกับแบบ Sigmoid จะพบในตัวดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 2 - 50 นาโนเมตร ที่ค่า P/Po ต่ำ ลักษณะของเส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับแบบ Sigmoid เมื่อค่า P/Po มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะเกิด Capillary condensation ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิด Hysteresis effect ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ง ไอโซเทอมชนิดนี้จะพบกับตัวเร่งปฏิกิริยาในทางอุตสาหกรรม

5. เหมือนกับแบบ Convex isotherm แต่จะเกิด Capillary condensation ที่ P/Po สูง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จ ไอโซเทอมชนิดนี้พบได้ยาก

แบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Models for adsorption isotherm)

สามารถใช้ได้กับทั้งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี แต่มีข้อแม้ว่า

1. จะต้องมีสมดุลที่แท้จริง
2. การดูดซับสามารถผันกลับได้ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อทำการดูดซับและการคายซับหลายๆ ครั้ง

แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของทฤษฎีนี้มีแนวความคิดจากแบบจำลองชั้นเดียว ดังนี้

1. ที่ทุก ๆ ตำแหน่งผิวระดับสัณฐาน สามารถดูดซับโมเลกุลได้
2. ไม่มีแรงกระทำระหว่างตัวถูกดูดซับ
3. พลังงานและกลไกการดูดซับของทุก ๆ โมเลกุลบนผิวตัวดูดซับเกิดขึ้นเหมือนกัน
4. การดูดซับของ โมเลกุลบนแต่ละพื้นผิวของตัวดูดซับ จะเกิดแบบชั้นเดียว

กำหนดให้

$$\theta = q/q_m \tag{2.5}$$

- โดย
- q คือ สารเคมีที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล (mg/g)
 - q_m คือ สารเคมีที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่อิ่มตัว (mg/g)
 - θ คือ สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ผิวทั้งหมด

$$r_d = k_d C(1-\theta) \quad (2.6)$$

โดย r_d คือ อัตราการดูดซับของตัวถูกดูดซับ

k_d คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล

อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_d = k_d \theta \quad (2.7)$$

โดย k_d คือ ค่าคงที่ของการคายซับ

เมื่อคิดที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ

$$k_d C(1-\theta) = k_d \theta \quad (2.8)$$

$$\theta = k_d C / (k_d + k_d C) \quad (2.9)$$

โดยกำหนดให้ $K_A = k_d / k_d =$ ค่าคงที่สมดุล (2.10)

จะได้สมการ

$$q = \frac{q_m K_A C}{1 + K_A C} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

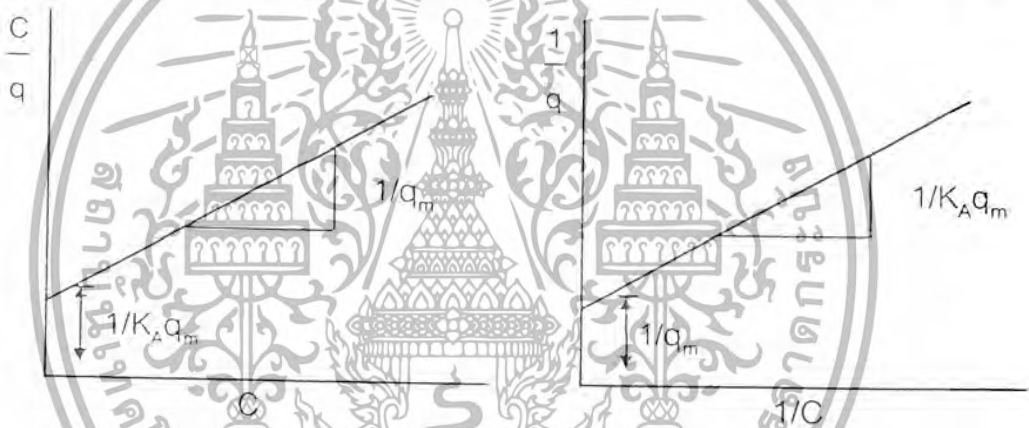
จัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{K_A q_m} + \frac{C}{q_m} \quad (2.12)$$

หรือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{(K_A q_m) C} \quad (2.13)$$

ค่า q_m และค่า K_A สามารถหาได้จากความชัน และจุดตัดแกนเมื่อเขียนกราฟดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

2.3.5 การหาค่าพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ [30]

การวัดพื้นที่ผิวจะใช้หลักการของการดูดซับก๊าซบนผิวของแข็ง ซึ่งปกติจะใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับที่จุดสมดุล ณ สภาวะมาตรฐาน (จุดเดือด -195.8 องศาเซลเซียส) ปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน ซึ่งสามารถวัด และคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวได้โดยใช้โมโนแกรม วิธีการคือใช้ Adsorption vessel 2 ใบ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยใบหนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกใบหนึ่งเป็นภาชนะเปล่า แล้วผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในภาชนะทั้งสองภายใต้ความดันปกติที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำให้ภาชนะทั้งสองเย็นจัดใน Cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภาชนะทั้งสองซึ่งสามารถวัดได้โดยมาโนมิเตอร์

สำหรับ ไอโซเทอมการดูดซับ จะเป็นตัวแทนที่ดีสำหรับแสดงผลของข้อมูลจากการทดลอง โดยมีรูปแบบของสมการหลายสมการที่นิยมใช้ เช่น Langmuir isotherm, Freundlich isotherm และ BET isotherm

สำหรับก๊าซที่ดูดซับบนผิวของแข็งแบบ Multi-molecular layer ซึ่งรู้จักกันในชื่อของ BET จะใช้หลักการดูดซับก๊าซในโตรเจนที่จุดเดือดปกติ อุณหภูมิประมาณ 77.5 เคลวิน โดยกรณีนี้ วัตถุประสงค์จะวัดรูพรุนเล็ก คือ 10-100 อังสตรอม ซึ่งก๊าซในโตรเจนจะปล่อยให้ดูดซับที่ระดับความดันต่าง ๆ ต่ำกว่า 1 บรรยากาศ จนถึงสภาวะสมดุล แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณของก๊าซในโตรเจนที่ถูกดูดซับไป ที่ความดันต่าง ๆ BET isotherm มีรูปแบบของสมการ คือ

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m c} + \frac{(c-1)P}{V_m c P_0} \quad (2.14)$$

โดย V คือ ปริมาตรของก๊าซ N_2 ที่ดูดซับบนผิวรูพรุน (cm^3)

V_m คือ ปริมาตรของก๊าซ N_2 ที่ดูดซับบนผิวรูพรุนแบบโมเลกุลชั้นเดียว

(Monomolecule layer) ปกคลุมทั่วผิวรูพรุน (cm^3)

P คือ ความดันที่สภาวะใด ๆ (mmHg)

P_0 คือ ความดันไอหรือความดันอิ่มตัว (Vapor or saturated vapor) (mmHg)

c คือ ค่าจำเพาะสำหรับการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด

เมื่อเขียนกราฟจากสมการที่ (2.14) จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง V_m , c คำนวณหาได้จากจุดตัดและความชันเส้นตรง ค่า V_m ที่ได้นำมาเทียบเป็นพื้นที่ผิวรูพรุน S (m^2) ดังสมการ

$$S = \frac{V_m N_{AV}}{22400} a \quad (2.15)$$

โดย S คือ พื้นที่ผิวรูพรุน (m^2)

N_{AV} คือ Avogadro Number (6.02×10^{23} molecules mol^{-1})

a คือ พื้นที่ต่อหน่วยโมเลกุลก๊าซ (cm^2 molecule $^{-1}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในกรณีที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ จะใช้วิธีวัดแบบ Porosimeter โดยใช้หลักการอัดปรอทเข้าไปในรูพรุน จากปริมาตรของปรอทที่เข้าไปแทนที่รูพรุน ณ ความดันต่าง ๆ ก็จะคำนวณหาปริมาตรการกระจายรูพรุนตามเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนได้ คังนั้นเมื่อใช้วิธีการแบบ BET ร่วมกับวิธีการวัดแบบ Porosimeter ก็จะสามารถหาการกระจายปริมาตรรูพรุน ตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด $10-10^5$ อังสตรอม ซึ่งการกระจายของรูพรุนนั้น อาจมีการกระจายตัวในช่วงของรัศมีรูพรุน หรือ หลายช่วงรัศมีรูพรุนก็ได้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Renan Arriagada et al. [31] ทำการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำเป็นสารกระตุ้น ซึ่งจะศึกษาถึงผลของเวลาและอุณหภูมิในการกระตุ้น เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากสารกระตุ้นที่เป็นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์และไอน้ำ และหาสภาวะที่เหมาะสม

ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการศึกษาการกระตุ้นคือ ใช้อัตราการไหลของไอน้ำเท่ากับ 140 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์เท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียสที่เวลาต่าง ๆ กัน



ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียสของ Arriagada

สารกระตุ้น	เวลากระตุ้น (นาท)	ร้อยละ ผลิตภัณฑ์	พื้นที่ผิวแบบ บีอีที (ตร.ม./ก.)	ค่าการดูดซับ ไอโอดีน (มก./ก.)	ค่าการดูดซับ เมทิลีนบลู (มก./ก.)
CO ₂	10	25	380	286	16
	60	36	549	474	84
	120	46	678	640	125
	180	56	847	725	220
	270	75	994	929	318
	360	82	1089	936	345
H ₂ O	10	30	466	471	14
	60	42	622	690	113
	120	51	778	819	221
	270	79	1193	968	311

จากการทดลองที่ได้พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้านซาร์ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 360 นาที จะทำให้คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวแบบ บีอีที มากที่สุด คือ 1089 ตารางเมตรต่อกรัม และสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้านซาร์ด้วยไอน้ำ คือ ที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 270 นาที จะทำให้คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวแบบบีอีทีมากที่สุดคือ 1193 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นความแตกต่างของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ โดยพบว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จากไอน้ำมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ที่สูงกว่า ในขณะที่เดียวกันก็มีรูพรุนขนาดเล็กที่สูงด้วย และพบว่าไอน้ำจะผลิตคาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากไอน้ำมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่านั่นเอง สามารถดูผลการวิจัยที่สอดคล้องกันจากงานวิจัยอื่นได้

วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ และคณะ [32] ได้ศึกษาการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสคามาลดูลินซิส (*Eucalyptus Camaldulensis* Dehnh.) ที่มีอายุ 4-5 ปี โดยทำการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ ซึ่งใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเป็นสารกระตุ้น

สภาวะในการคาร์บอนไนซนั้น ใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที โดยผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้ามาด้วย ซึ่งด้านซาร์ที่ได้ถูกนำมากระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยมีอัตราการป้อน

ไอน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 700 มิลลิลิตรต่อนาที และ ปริมาณการป้อนอากาศ 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลการทดลองในส่วนการคาร์บอนไนซ์ พบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในเวลา 45 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ด้านซาร์จากไม้ยูคาลิปตัสที่มีอายุ 4-5 ปี เนื่องจาก ใช้เวลาและอุณหภูมิไม่สูงมากนัก รวมทั้งให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่สูงที่สุดด้วย

เมื่อทำการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำที่คาร์บอนไนซ์เท่ากับ 33.14 จะให้ค่าพื้นที่ผิวถึง 1076.15 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 1233 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 มิลลิกรัมต่อกรัม

ยวดี เดชทวีทย์ และคณะ [13] ได้ศึกษาการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้การกระตุ้นในที่อับอากาศ และใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เข้มข้น และสารละลายผสมระหว่างสารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้น ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นเป็นสารกระตุ้น ตัวแปรที่ศึกษาเพื่อหา สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ด้วยวิธีนี้ ได้แก่ อุณหภูมิในการกระตุ้น และชนิด ของสารกระตุ้น เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยเตาเผา ภาชนะที่ใช้ในการเผาทำจาก สแตนเลส ทำการเผาวัตถุดิบครั้งละประมาณ 100 กรัม โดยผสมกับการสารกระตุ้นในอัตราส่วน ต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตคาร์บอนกัม มันต์จากกะลามะพร้าว โดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก คือ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกะลามะพร้าวต่อสารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักเท่ากับ 1:2 ระยะเวลาในการกระตุ้นเท่ากับ 60 นาที ค่าการดูดซับไอโอดีนของ คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้เท่ากับ 922 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ และร้อยละของ คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้เท่ากับ 44.2 สภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น คือ ที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกะลามะพร้าวต่อสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นเท่ากับ 1:3 ระยะเวลาในการกระตุ้นเท่ากับ 90 นาที ค่าการดูดซับไอโอดีนของ คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้เท่ากับ 705 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ และร้อยละของ คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้เท่ากับ 44.2 สภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้สารละลายผสมระหว่างสารละลายซิงค์ คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นเท่ากับ 1:1 คือ ที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกะลามะพร้าวต่อสารละลายผสมนี้ คือ 1:3 ระยะเวลาในการกระตุ้นเท่ากับ 90 นาที ค่าการดูดซับไอโอดีนของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้เท่ากับ 540 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ และร้อยละของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้เท่ากับ 55.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 ไม้ยูคาลิปตัส

3.1.1 การเตรียมวัสดุดิบ

ในขั้นตอนนี้จะนำไม้ยูคาลิปตัส มาล้างน้ำให้สะอาด เพื่อกำจัดผงฝุ่นที่ติดมากับไม้ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ความชื้นของไม้ สอดคล้องกับความชื้นของอากาศที่อุณหภูมิห้อง

3.1.2 การถاربอไนซ์

สารเคมี

1. ไม้ยูคาลิปตัส
2. ก๊าซไนโตรเจน

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียดความนิยม 4 ตำแหน่ง
2. เตาเผา
3. คูบ
4. ภาชนะสำหรับเผา
5. ภาชนะเก็บสาร
6. เกล็ดเคเตอร์

วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของไม้ยูคาลิปตัส แล้วนำมาใส่ในภาชนะสำหรับเผา
2. นำไปเผาในเตาเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยใช้อัตราการป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่เตาเผา 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่เวลาและอุณหภูมิที่กำหนด

ตัวแปรที่ใช้ในการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน คือ

- อุณหภูมิ 300, 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส
- เวลาในการเผาที่ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 นาที

ในเบื้องต้นจะเผาไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่เวลา 60 นาที เพื่อหาอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูง และร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ดำเนินไป แล้วนำไปเผาที่เวลาต่าง ๆ เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการเผาต่อไป

3. นำถ่านชาร์ที่ได้ทิ้งให้เย็นในเคสเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การกระตุ้นถ่านซาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารเคมี

1. ถ่านซาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก
3. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. เตาเผา
3. เครื่องวัดค่า pH
4. แผ่นให้ความร้อน (Hot plate)
4. ตู้อบ
5. เคสิคเคเตอร์
6. ภาชนะสำหรับเผา
7. ภาชนะบรรจุสาร
8. กระบอกตวงขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
9. บีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร
10. ปีเปตขนาด 100 มิลลิลิตร
11. กระดาษกรองวัดแมน เบอร์ 42
12. แท่งแก้วคนสาร

วิธีการทดลอง

1. นำถ่านซาร์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์ มาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในภาชนะสำหรับเผา เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้อัตราส่วนของถ่านซาร์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 : 2

จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในขั้นตอนการกระตุ้นที่น้อยที่สุด คือ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 1:2 โดยจะให้ค่าพื้นที่ผิวแบบบีอีที และค่าการดูดซับไอโอดีนมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ 1:2 ในการกระตุ้นไม้ยูคาลิปตัสในการทดลองนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปิดฝาแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ และเวลาที่กำหนด
ตัวแปรที่ใช้ในการกระตุ้น คือ
 - อุณหภูมิ 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส
 - เวลา 60, 90 และ 120 นาที
3. นำคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้ว ไปล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เพื่อกำจัดสารเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ
4. ล้างคาร์บอนกัมมันต์ด้วยน้ำร้อนอีกหลาย ๆ ครั้ง จนเป็นกลาง
5. นำคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้ไปอบให้แห้ง ทิ้งให้เย็นในเตาสุญญากาศ

3.2 ทดสอบคาร์บอน

การเตรียมวัตถุดิบ

1. นำท่อนคาร์บอนมาล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตรเนื่องจากวัตถุดิบมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมอยู่
2. ล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง (วัดค่าพีเอชได้เท่ากับ 7)
3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเตาสุญญากาศ

3.3 การบ่อนกัมมันต์ทางการค้า

การเตรียมวัตถุดิบ

- นำคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเตาสุญญากาศ

3.4 การดูดซับไอโอดีน [21]

คุณสมบัติการบ่อนกัมมันต์ที่จะทดสอบ คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน สารเคมี

1. น้ำกลั่น
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก
3. เกล็ดไอโอดีน
4. สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
5. เกล็ดโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เกล็ดโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)
7. เกล็ดโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO₃)
8. แป้งมัน
9. คาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
10. คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า
11. กากคาร์บอน

อุปกรณ์

1. กระจกดวงขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
2. กระจกนาฬิกา
3. บีกเกอร์ขนาด 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร
4. ขวดขังสารพร้อมฝาปิด
5. กรวยแก้ว
6. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร 1 และ 2 ลิตร
7. บิวเรตขนาด 5, 10, 20 และ 25 มิลลิลิตร
8. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
9. แผ่นให้ความร้อน
10. เครื่องกรองสุญญากาศ
11. กระจกกรองวัดแมน เบอร์ 42
12. เคสิกเคเตอร์
13. แท่งแก้วคนสาร
14. ซ้อนตักสาร
15. เครื่องชั่งอย่างละเอียดชนิดนิม 4 ตำแหน่ง
16. เครื่องกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
17. คูือบ
18. บีเปด
19. หลอดหยด
20. ขวดสีชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง

- สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาตร 70 มิลลิลิตร ลงใน
น้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันแล้วเทเก็บใส่ขวด

- สารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มอล

ชั่งไอโอดีน 12.700 กรัมและโพแทสเซียมไอโอไดด์ 19.100 กรัม ผสมให้เข้ากันใน
สภาพที่เป็นผงในบีกเกอร์แล้วเติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์จนให้ละลาย จากนั้นจึงค่อยๆ
เติมน้ำกลั่นลงไปครั้งละ 5 มิลลิลิตร พร้อมกับคนตลอดเวลาจนปริมาตรทั้งหมดเป็น 50 มิลลิลิตร
จากนั้นใช้เครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็กกวนต่อไปอีกอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าสารละลาย
หมด จากนั้นเจือจางให้มีปริมาตร 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร แล้วเทเก็บในขวดสีชา

- สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตเข้มข้น 0.100 ± 0.001 นอร์มอล

ชั่งโซเดียมไธโอซัลเฟต 24.820 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นที่ต้มเดือด ปริมาตร 80 มิลลิลิตร
คนให้ละลาย จากนั้นจึงเติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.1 กรัม เพื่อป้องกันการสลายตัวของโซเดียมไธโอ-
ซัลเฟตเนื่องจากบัคเคอรี จากนั้นเจือจางให้มีปริมาตร 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร เทใส่ขวดสีชาตั้งทิ้ง
ไว้ 4 วัน ก่อนทำการเทียบค่ามาตรฐาน

- สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต 0.100 ± 0.001 นอร์มอล

อบโพแทสเซียมไอโอเดตประมาณ 4 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งให้
เย็นที่อุณหภูมิห้องในเดสิคเคเตอร์ นำสารที่อบแห้งแล้ว 3.5667 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100
มิลลิลิตร แล้วเจือจางให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตรผสมให้เข้ากันแล้วเทเก็บใส่ขวดเก็บ
สารที่มีฝาปิด

- น้ำแป้ง

ผสมแป้ง 1.0 กรัมในน้ำกลั่นเย็น 10 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร พร้อมกับ
กวนสารตลอดเวลา เทสารข้างต้นลงในน้ำกลั่นที่ต้มเดือดปริมาตร 1 ลิตร พร้อมกับกวนตลอดเวลา
แล้วต้มสารละลายต่อไปอีก 5 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วเทเก็บในขวดเก็บสารแช่ไว้ในตู้เย็น สารนี้ควร
เตรียมใหม่ทุกครั้งในวันที่ทดลอง

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

- ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด
250 มิลลิลิตร เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ 3.00 กรัม ลงไป เขย่าให้ละลาย ปิเปตกรด
ไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เติมลงในสารละลายข้างต้น

ไทเทรตหาไอโอดีนที่เหลือด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตจนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน เติม น้ำแป้งลงไป 2 - 3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วไทเทรตต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้น คำนวณหาความเข้มข้นของโซเดียมไธโอซัลเฟตจากสมการ

$$N_1 = \frac{(P_1 \times R)}{S} \quad (3.1)$$

เมื่อ N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (นอร์มอล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (นอร์มอล)

P_1 คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (มิลลิลิตร)

การไทเทรตควรทำ 3 ครั้ง แล้วหาความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ถ้าความเข้มข้นต่างจากความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล มากกว่า 0.003 ควรทำการทดลองใหม่

- ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

เปิดสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน จนกระทั่งได้สารละลายสีเหลืองอ่อน หยดน้ำแป้งลงไป 2 - 3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์แล้วไทเทรตต่อไปจนได้สารละลายไม่มีสี จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นจากสมการ

$$N_2 = \frac{(S \times N_1)}{I} \quad (3.2)$$

เมื่อ N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มอล)

I คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (มิลลิลิตร)

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (นอร์มอล)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)

การไทเทรตควรทำ 3 ครั้ง แล้วหาความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายไอโอดีน ถ้าความเข้มข้นต่างจากความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล มากกว่า 0.003 นอร์มอล ควรทำการทดลองใหม่

วิธีการทดสอบการดูดซับไอโอดีน

1. บดคาร์บอนกัมมันต์ให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอน (325 เมช) อย่างน้อยร้อยละ 95 ประมาณ 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเตาสุญญากาศ
3. ชั่งคาร์บอนกัมมันต์ 2 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดและละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10 มิลลิลิตร ใส่ลงไป ปิดปากขวดด้วยจุกยาง และเขย่าเบา ๆ จนกระทั่งคาร์บอนกัมมันต์เปียกทั้งหมด
4. นำขวดรูปชมพู่ไปวางบนแผ่นให้ความร้อนที่อยู่ในตู้ดูดควัน เปิดจุกยางออก ต้มจนเดือดแล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 วินาที เพื่อไล่สารประกอบซัลเฟอร์ซึ่งเป็นสารมลทิน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง
5. ปิดฝาขวดละลายไอโอดีน 0.100 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ปิดด้วยจุกยางอย่างรวดเร็ว และเขย่าแรง ๆ เป็นเวลา 30 วินาที แล้วกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศผ่านกระดาษกรอง
6. นำของเหลวที่ได้จากการกรองส่วนหนึ่งมาล้างบีกเกอร์ นำของเหลวส่วนที่เหลือ ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้ไปหาค่าความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐาน
7. คำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน (ไอโอดีนนัมเบอร์) ได้จากสมการ

$$\text{ค่าการดูดซับไอโอดีน} = [(H_1 - H_2)/M] \times [I2693D] \quad (3.3)$$
 เมื่อ H_1 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนก่อนการดูดซับ (นอร์มอล)
 H_2 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนหลังการดูดซับ (นอร์มอล)
 M = น้ำหนักของตัวอย่างคาร์บอนกัมมันต์ (กรัม)
 D_1 = ค่าการแก้ไขการดูดซับไอโอดีน (Correction factor) สามารถหาได้จากภาคผนวก (ง)

3.5 การดูดซับเมทิลีนบลู

สารเคมี

1. เมทิลีนบลู
2. คาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
3. คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า
4. กรดคาร์บอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์

1. เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer รุ่น UV-1601 Shimadzu
2. เครื่องกรองสุญญากาศ
3. เครื่องเขย่าสาร
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 10 ขวด
7. ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร
8. บีเป็ดขนาด 100 มิลลิลิตร
9. กรวยกรอง
10. กระดาษกรองวัดแมนเบอร์ 42

3.5.1 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลู

1. ชั่งเมทิลีนบลู 0.10, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 กรัม ตามลำดับ ใส่ในบีกเกอร์ (ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรด้วยขวดวัดปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร
2. สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้น 100, 500, 750, 1000, 1250 และ 1500 ppm ตามลำดับ

3.5.2 การทดลองเพื่อหาไอโซเทอมการดูดซับ

1. นำคาร์บอนกัมมันต์ที่อบแห้งจำนวน 0.5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 10 ขวด
2. เติมสารละลายเมทิลีนบลูเข้มข้น 100 ppm ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ใน ข้อ 1. นำไปเขย่าพร้อมจับเวลา
3. นำสารละลายจากขวดรูปชมพู่ที่ได้ทำการดูดซับเป็นเวลา 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150 และ 210 นาที ภากรองคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศทันที
4. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 3. ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer โดยความยาวคลื่นที่ใช้คือ 610 นาโนเมตร
5. นำข้อมูลมาเขียนไอโซเทอมเพื่อพิจารณาเวลาที่เหมาะสมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การทดลองเพื่อหาปริมาณการดูดซับ

1. นำคาร์บอนกัมมันต์ที่อบแห้งและคัดขนาดให้ได้ 60—80 เมช จำนวน 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด
2. เปิดสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 500, 750, 1000, 1250 และ 1500 ppm ใส่ในขวดรูปชมพู่ในข้อ 1. นำไปเขย่าพร้อมจับเวลา
3. เมื่อได้เวลาที่เหมาะสม (พิจารณาจากไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูคงที่) กรองสารละลายข้างต้นด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ
4. นำสารละลายสีที่ได้จากข้อ 3. ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ตามค่าความยาวคลื่นข้างต้น เพื่อพิจารณาการดูดซับต่อไป
5. นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อหาปริมาณในการดูดซับ



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

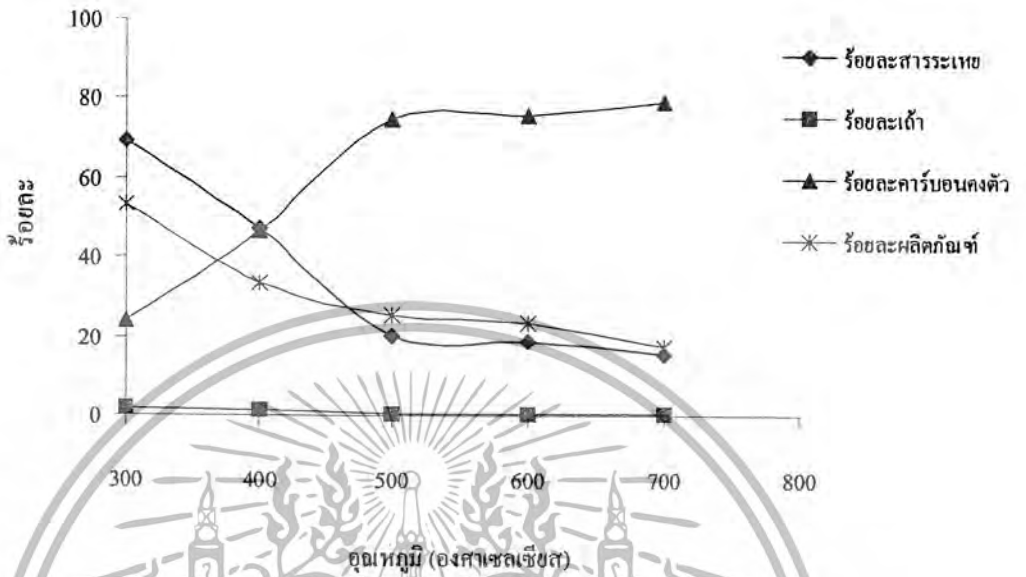
ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ อุณหภูมิและเวลา ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้คือ ร้อยละผลิตภัณฑ์ ร้อยละสารระเหย และร้อยละคาร์บอนคงตัว

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเผาไม้ยูคาลิปตัส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ภายในช่วงอุณหภูมิ 300 – 700 องศาเซลเซียส ที่เวลา 60 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่เวลา 60 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละสารระเหย (% Volatile Matters)	ร้อยละเถ้า (% Ash)	ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield)	ร้อยละคาร์บอนคงตัว (% Fixed Carbon)
300	69.17	1.98	53.13	24.14
400	46.94	1.64	33.44	46.71
500	20.18	0.33	25.35	74.78
600	18.94	0.36	23.35	75.99
700	15.62	0.29	17.47	79.38

หมายเหตุ ร้อยละความชื้นของไม้ยูคาลิปตัส 4.71



รูปที่ 4.1. ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่เวลา 60 นาที

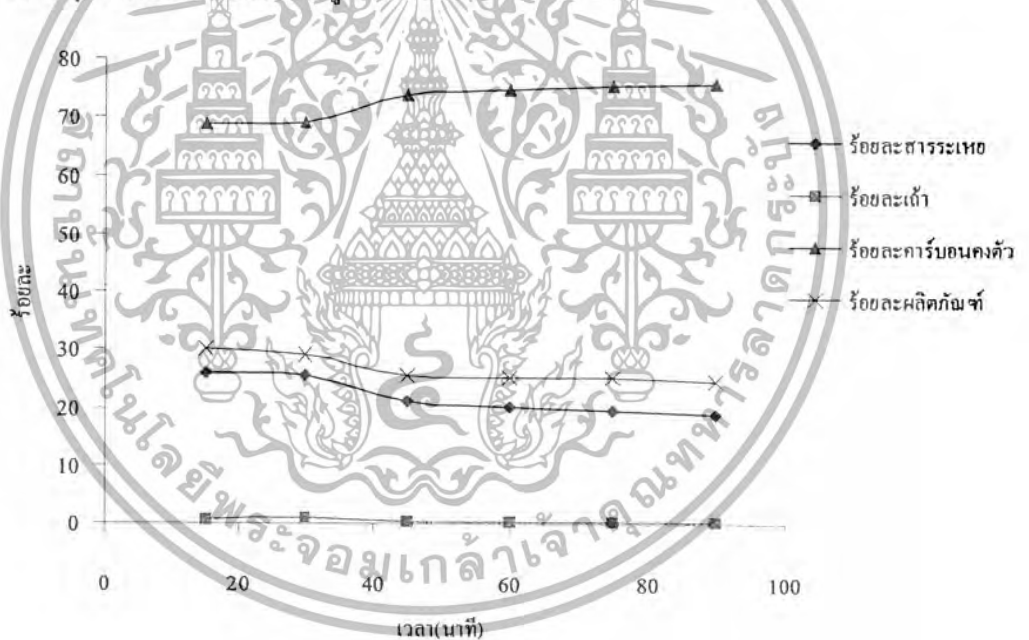
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 พบว่าร้อยละผลิตภัณฑ์และร้อยละสารระเหยลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เนื้อไม้เกิดการเผาไหม้กลายเป็นเถ้า น้ำมันพาร์และสารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของมันจะหลุดออกมาจากโครงสร้าง ทำให้ปริมาณสารระเหยที่เหลือและปริมาณผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง จากการที่ร้อยละผลิตภัณฑ์ลดลง ร้อยละคาร์บอนคงตัวจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่ 500 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปทดลองหาค่าเวลาในการเผาที่เหมาะสมต่อไป เนื่องจากที่อุณหภูมินี้มีร้อยละคาร์บอนคงตัวที่สูงโดยที่ร้อยละผลิตภัณฑ์ไม่ต่ำจนเกินไปเมื่อเทียบกับการเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการเผาไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่เวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 นาที จะได้ข้อมูลดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการเผาภายใต้บรรยากาศของ
ก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เวลา (min.)	ร้อยละสารระเหย (% Volatile Matters)	ร้อยละเถ้า (% Ash)	ร้อยละผลิตภัณฑ์ (% Yield)	ร้อยละคาร์บอนคงตัว (% Fixed Carbon)
15	25.93	0.65	30.14	68.71
30	25.48	0.83	29.23	68.98
45	21.06	0.35	25.49	73.88
60	20.18	0.33	25.35	74.78
75	19.56	0.22	25.20	75.51
90	19.04	0.28	24.78	75.97

หมายเหตุ ร้อยละความชื้นของไม้ยูคาลิปตัส 4.71



รูปที่ 4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการเผาภายใต้บรรยากาศของ
ก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 พบว่า ที่เวลา 15 และ 30 นาที ร้อยละสารระเหย ร้อยละผลิตภัณฑ์และร้อยละคาร์บอนคงตัว ยังมีการเปลี่ยนแปลงในสัดส่วนที่สูง ทั้งนี้ เมื่อเวลามากขึ้นทำให้วัตถุดิบได้รับความร้อนนานขึ้นจึงทำให้สารระเหยในเนื้อถ่านหลุดออกไป ร้อยละสารระเหยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาต่าง ๆ จึงลดลงแต่ลดลงไม่มากนัก เมื่อพิจารณาที่เวลา 45, 60 ,75 และ 90 นาที พบว่าปริมาณดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน

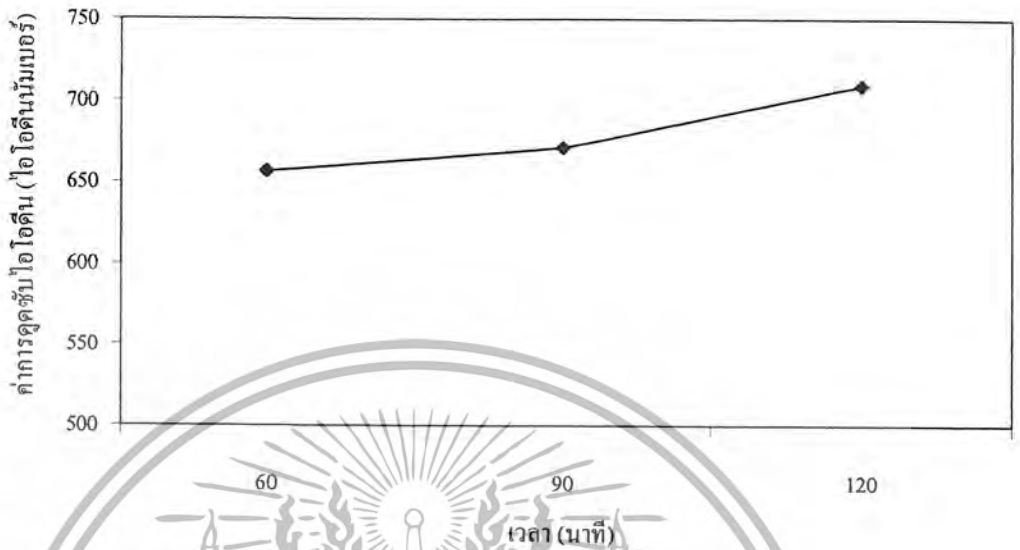
เนื่องจากในการพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ถ่านชาะนั้น จะพิจารณาถึงปริมาณผลิตภัณฑ์ควบคู่ไปกับปริมาณคาร์บอนคงตัว ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ของถ่านชาร์ คือ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสและใช้เวลา 45 นาที คุณสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากการเผาในสภาวะนี้ คือ ร้อยละผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25.49 ร้อยละสารระเหยเท่ากับ 21.06 ร้อยละเถ้าเท่ากับ 0.35 และร้อยละคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 73.88

4.2 การกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และการดูดซับไอโอดีน

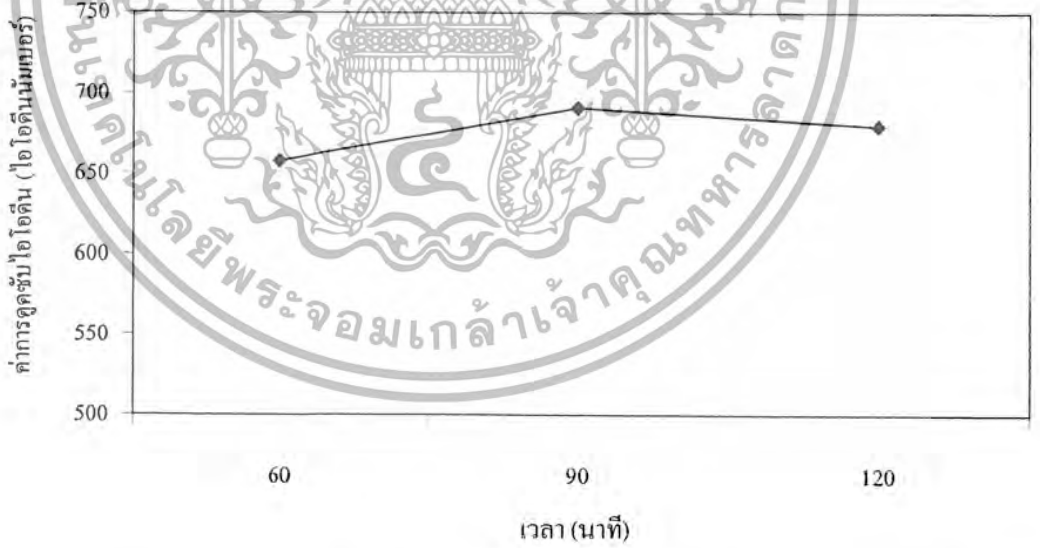
นำถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ มากระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน จากนั้นนำคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มาล้างให้เป็นกลางและนำมาทดสอบการดูดซับไอโอดีน ผลของการดูดซับไอโอดีนแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดซับ ไอ โอดีนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ที่ใช้ในการกระตุ้น

สภาวะในการกระตุ้นคาร์บอนกัมมันต์	ค่าการดูดซับไอโอดีน (ไอโอดีนนมเบอร์)	
500 องศาเซลเซียส	60 นาที	656
	90 นาที	671
	120 นาที	709
600 องศาเซลเซียส	60 นาที	657
	90 นาที	691
	120 นาที	679
700 องศาเซลเซียส	60 นาที	565
	90 นาที	618
	120 นาที	501

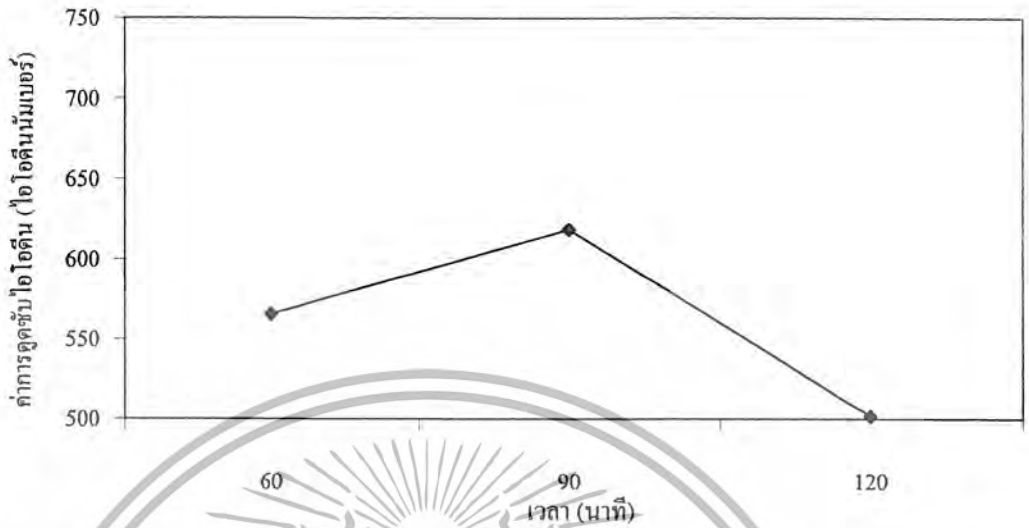


รูปที่ 4.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนที่เวลาต่าง ๆ ณ สภาวะในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

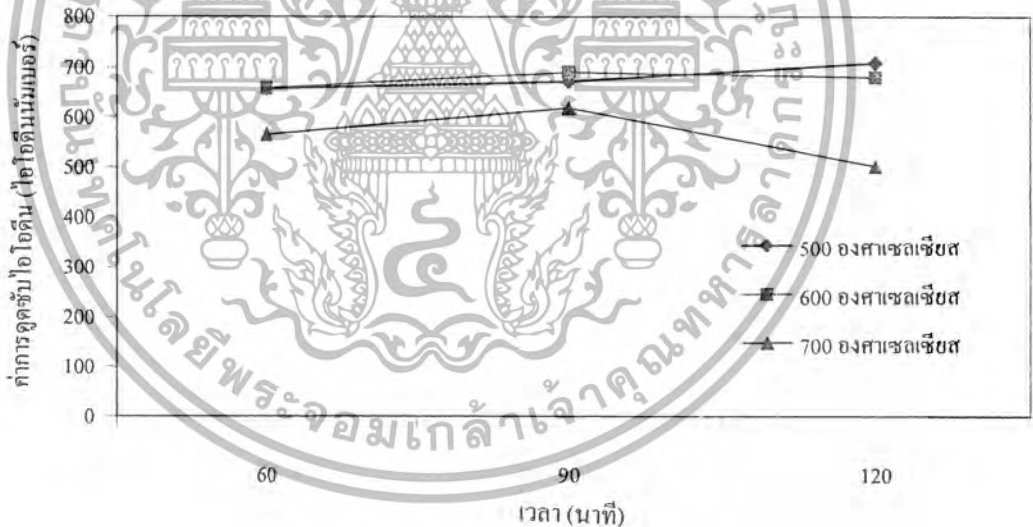


รูปที่ 4.4 ค่าการดูดซับไอโอดีนที่เวลาต่าง ๆ ณ สภาวะในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ค่าการดูดซับไอโอดีนที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ค่าการดูดซับไอโอดีนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ที่ใช้ในการกระตุ้น

เนื่องจากอุณหภูมิในการกระตุ้นมีความสำคัญอย่างมากในการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิทำให้สารระเหยมีโอกาสถูกไล่ออกไปได้มากขึ้น จากตารางที่ 4.3 เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้ดีขึ้นเกิดรูพรุนมากขึ้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงมีค่าสูงขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงเกินไป ปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยกลไกของการแพร่ของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้น ซึ่งช่วงนี้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วมากทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ผิว (Surface reaction) เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง และที่อุณหภูมิสูงขึ้นโครงสร้างของถ่านชาร์อาจถูกทำลาย ทำให้พื้นที่ผิวลดลงได้

เมื่อเวลามากขึ้นทำให้ถ่านชาร์ได้รับความร้อนมากขึ้น จึงทำให้สารระเหยในเนื้อถ่านชาร์หลุดออกไปหรือเป็นการเพิ่มโอกาสให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและน้ำมันทาร์ที่เหลืออยู่ในคาร์บอนกัมมันต์ได้มากขึ้น ทำให้น้ำมันทาร์และโมเลกุลของคาร์บอนบางโมเลกุลถูกกำจัดออกไป เกิดเป็นช่องว่างหรือรูพรุนมากขึ้น ค่าการดูดซับไอโอดีนจึงมีค่าสูงขึ้น แต่การเพิ่มเวลาในการกระตุ้นนานเกินไปอาจทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนมีค่าต่ำลงได้ เนื่องจากการใช้เวลามากเกินไปจะทำให้รูพรุนขนาดเล็กที่เห็นพื้นที่ผิวส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลง เพราะการดูดซับไอโอดีนจะอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก

จากการทดลองกระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสถานะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 120 นาที จะได้คาร์บอนกัมมันต์ที่ดูดซับไอโอดีนได้ 709 มิลลิกรัมต่อกรัม

เมื่อนำคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าและถ่านชาร์บดมาทดสอบการดูดซับไอโอดีน พบว่าคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าและถ่านชาร์บดมีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 715 และ 670 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และถ่านชาร์บดจะเห็นได้ว่า คาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนใกล้เคียงกับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า ในขณะที่ถ่านชาร์บดซึ่งยังไม่ได้ผ่านการกระตุ้นเพิ่มเติม มีค่าการดูดซับน้อยกว่าคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าไม่มากนัก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น

4.3 การดูดซับเมทิลีนบลู

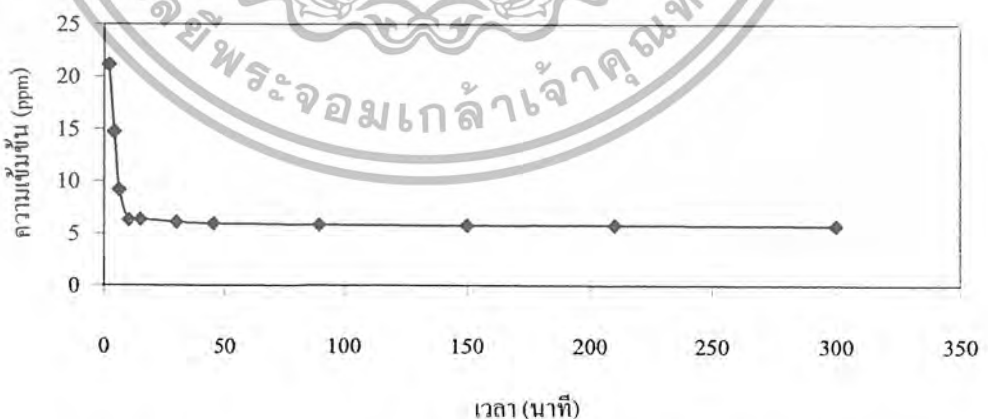
4.3.1 การหาไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลู

เมื่อนำคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และถ่านชาร์บด มาทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm ณ เวลาต่าง ๆ ภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง จะได้ผลการทดลองดังนี้

- การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นการแสดงค่าการดูดซับเมทิลีนบลู เพื่อหาเวลาที่ระบบ เข้าสู่สมดุล

ตารางที่ 4.4 ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (ABS)		ความเข้มข้น (ppm)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
2	0.858	0.856	21.18	21.14	21.16
4	0.594	0.896	14.67	14.72	14.70
6	0.371	0.373	9.16	9.21	9.18
10	0.294	0.296	7.26	7.31	6.29
15	0.256	0.257	6.32	6.34	6.33
30	0.246	0.247	6.07	6.10	6.08
45	0.241	0.240	5.95	5.92	5.94
90	0.233	0.236	5.75	5.83	5.79
150	0.234	0.232	5.76	5.73	5.74
210	0.232	0.235	5.75	5.80	5.77
300	0.233	0.231	5.75	5.70	5.72



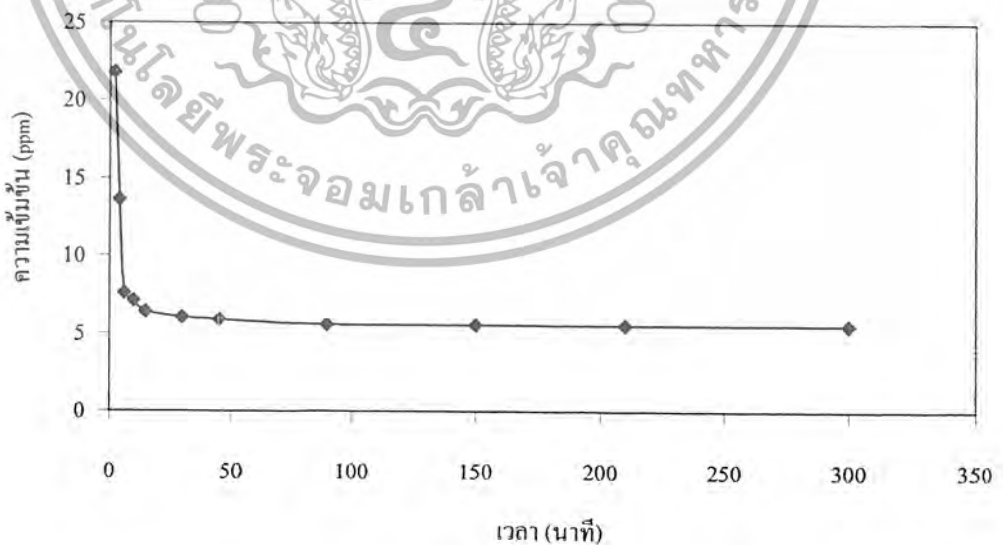
รูปที่ 4.7 ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นการแสดงค่าการดูดซับเมทิลีนบลู เพื่อหาเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล

ตารางที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (ABS)		ความเข้มข้น (ppm)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
2	0.885	0.883	21.85	21.80	21.82
4	0.551	0.554	13.60	13.68	13.64
6	0.306	0.309	7.56	7.63	7.60
10	0.289	0.286	7.14	7.06	7.10
15	0.259	0.258	6.40	6.37	6.38
30	0.244	0.246	6.02	6.07	6.04
45	0.238	0.240	5.88	5.92	5.90
90	0.227	0.226	5.60	5.58	5.59
150	0.226	0.224	5.58	5.53	5.56
210	0.225	0.224	5.56	5.53	5.54
300	0.225	0.223	5.56	5.51	5.54



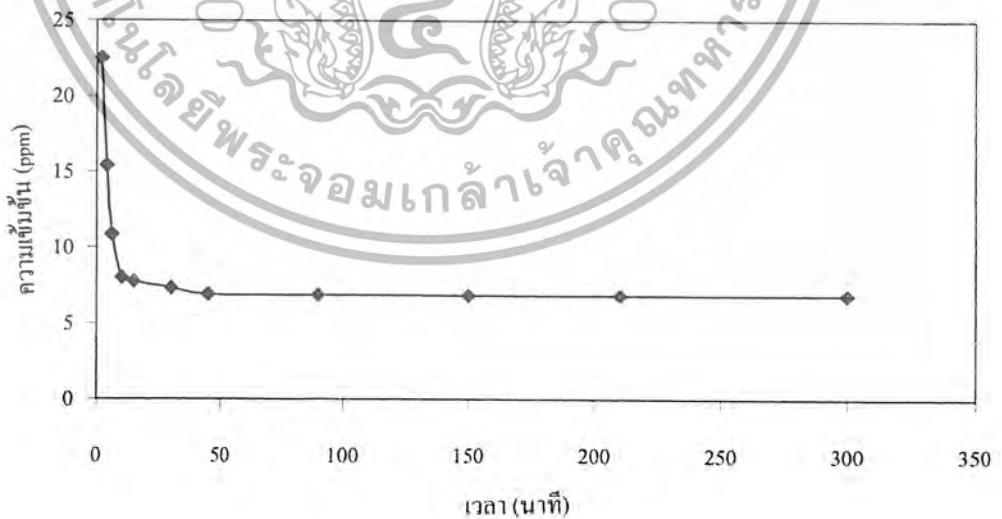
รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยกากคาร์บอนแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นการแสดงค่าการดูดซับเมทิลีนบลู เพื่อหาเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล

ตารางที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยกากคาร์บอน

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง (ABS)		ความเข้มข้น (ppm)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
2	0.911	0.914	22.49	22.57	22.53
4	0.623	0.625	15.38	15.43	15.40
6	0.440	0.422	10.86	10.91	10.88
10	0.325	0.325	8.02	8.02	8.02
15	0.314	0.316	7.75	7.80	7.78
30	0.298	0.297	7.36	7.33	7.34
45	0.281	0.279	6.94	6.89	6.92
90	0.278	0.279	6.86	6.89	6.88
150	0.278	0.277	6.86	6.84	6.85
210	0.277	0.278	6.84	6.86	6.85
300	0.278	0.276	6.86	6.81	6.84



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยกากคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางและรูปที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูคงที่ที่เวลา 300 นาที ดังนั้นจึงใช้เวลาที่ 300 นาทีไปทดสอบหาค่าการดูดซับเมทิลีนบลูต่อไป

4.3.2 การหาปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู

นำคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และกากคาร์บอน มาทำการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500, 750, 1000, 1250 และ 1500 ppm เป็นเวลา 300 นาที แล้วนำผลที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อคำนวณค่าการดูดซับเมทิลีนบลูต่อไป

- ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (ABS)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
500	0.443	0.447	0.445
750	0.679	0.677	0.678
1000	1.210	1.211	1.210
1250	0.822	0.824	0.823**
1500	1.145	1.143	1.144**

หมายเหตุ * เจือจาง 10 เท่า

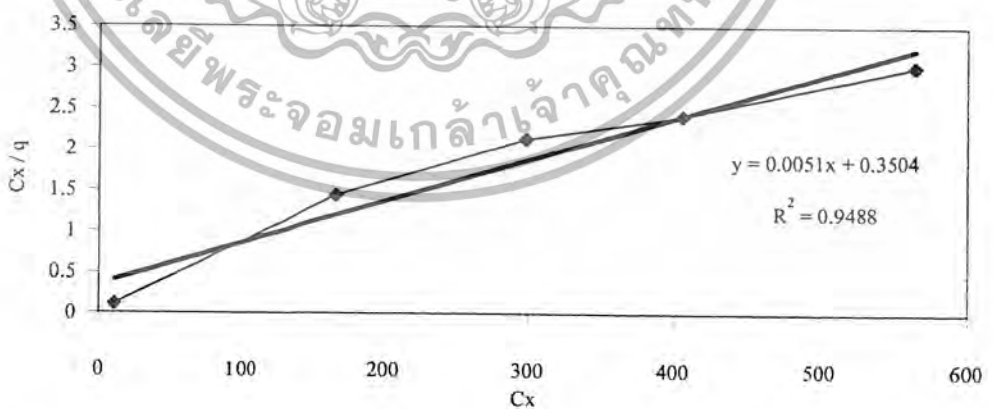
** เจือจาง 20 เท่า

นำค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยจากตารางที่ 4.7 มาเทียบหาความเข้มข้นของเมทิลีนบลูจากกราฟมาตรฐานในภาคผนวก (ข) จะได้ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ คื่อนำหนักคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สมดุล ตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก (ค) และค่าการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล และปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อ น้ำหนักคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สมดุล

ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) C_0	น้ำหนักคาร์บอนกัมมันต์ (กรัม)	ความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่สมดุล (ppm) C_x	ปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักคาร์บอนกัมมันต์ (มิลลิกรัม/กรัม) q
500	0.5002	10.958	97
750	0.5001	167.407	116
1000	0.5000	298.765	140
1250	0.5001	406.420	168
1500	0.5004	564.938	186

นำค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล และปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สมดุล มาสร้างกราฟระหว่าง C_x / q กับ C_x ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10 ได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.12) เพื่อคำนวณหาค่าปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ ต่อน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อิ่มตัว (q_m) จากรูปที่ 4.10 ได้ความสัมพันธ์ของกราฟคือ $y = 0.0051x + 0.3504$ โดยที่ค่าความชันเป็นส่วนกลับกับค่า q_m และได้ค่า $q_m = 196$ มิลลิกรัมต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.10 การคำนวณค่าปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อิ่มตัว

- ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า แสดงผลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า

ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (ABS)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
500	0.406	0.404	0.405
750	0.621	0.623	0.632*
1000	1.219	0.128	1.129*
1250	1.607	1.608	1.608*
1500	1.073	1.073	1.073**

หมายเหตุ * เจือจาง 10 เท่า

** เจือจาง 20 เท่า

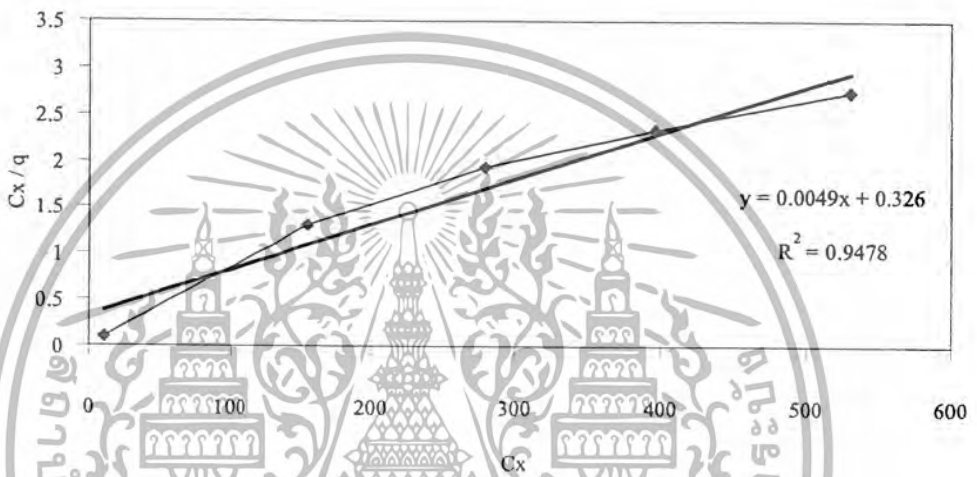
นำค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยจากตารางที่ 4.9 มาเทียบหาความเข้มข้นของเมทิลีนบลูจากกราฟมาตรฐานในภาคผนวก (ข) จะได้ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าที่สมดุล ตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก (ค) และค่าการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล และปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าที่สมดุล

ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) C_0	น้ำหนัก คาร์บอนกัมมันต์ (กรัม)	ความเข้มข้นเมทิลีนบลู ที่สมดุล (ppm) C_x	ปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูด ซับต่อน้ำหนักคาร์บอนกัม มันต์ (มิลลิกรัม/กรัม) q
500	0.5001	10.000	97
750	0.5001	156.049	118
1000	0.5003	278.765	144
1250	0.5004	397.037	170
1500	0.5002	529.876	193

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ผสมคล และปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าที่ผสมคล มาสร้างกราฟระหว่าง C_x/q กับ C_x ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.11 ได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.12) เพื่อคำนวณหาค่าปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าที่อิมตัว (q_m) จากรูปที่ 4.11 ได้ความสัมพันธ์ของกราฟคือ $y = 0.0049x + 0.326$ โดยที่ค่าความชันเป็นส่วนกลับกับค่า q_m และได้ค่า $q_m = 204$ มิลลิกรัมต่อกรัมคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า



รูปที่ 4.11 การคำนวณค่าปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าที่อิมตัว

- ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถากคาร์บอน แสดงผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถากคาร์บอน

ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (ABS)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
500	0.608	0.606	0.607
750	0.505	0.501	0.503**
1000	0.998	1.000	0.999**
1250	1.407	1.405	1.406**
1500	1.908	1.908	1.908**

หมายเหตุ ** เจือจาง 20 เท่า

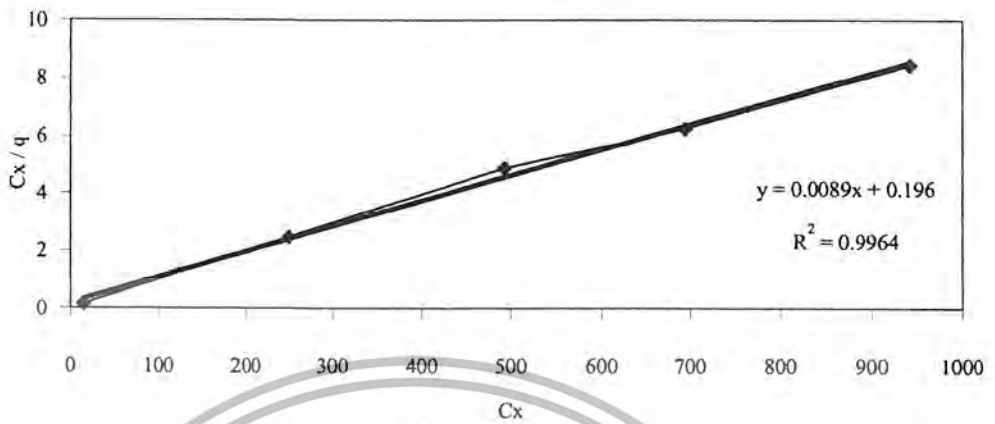
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยจากตารางที่ 4.11 มาเทียบหาความเข้มข้นของเมทิลีนบลูจากกราฟมาตรฐานในภาคผนวก (ข) จะได้ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักกากคาร์บอนที่สมดุล ตัวอย่างการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก (ค) และค่าการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล และปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักกากคาร์บอนที่สมดุล

ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) C_0	น้ำหนักกากคาร์บอน (กรัม)	ความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่สมดุล (ppm) C_x	ปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักกากคาร์บอน (มิลลิกรัม/กรัม) q
500	0.5002	14.988	96
750	0.5001	248.395	100
1000	0.5003	493.333	101
1250	0.5001	694.321	111
1500	0.5004	942.222	112

นำค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล และปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของกากคาร์บอนที่สมดุล มาสร้างกราฟระหว่าง C_x/q กับ C_x ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12 ได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.12) เพื่อคำนวณหาค่าปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของกากคาร์บอนที่อิ่มตัว (q_m) จากรูปที่ 4.12 ได้ความสัมพันธ์ของกราฟ คือ $y = 0.0089 + 0.196$ โดยที่ค่าความชันเป็นส่วนกลับกับค่า q_m และได้ค่า $q_m = 112$ มิลลิกรัมต่อกรัมกากคาร์บอน



รูปที่ 4.12 การคำนวณค่าปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของถ่านคาร์บอนที่อิมมัตว์

จากการทดลอง ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าและถ่านคาร์บอนที่อิมมัตว์ ได้เท่ากับ 196, 204 และ 112 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และพบว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าการดูดซับเมทิลีนบลูใกล้เคียงกับคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า แสดงว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้ามีปริมาณของรูพรุนขนาดกลาง มากกว่าถ่านคาร์บอนเพราะการดูดซับเมทิลีนบลูอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดกลาง

4.4 การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยในอดีต

ในการทำวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งมีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบงานวิจัย

ข้อมูลเปรียบเทียบ	Renan Arriagada (2539)	วิจิตร จินดาพันธ์ ไพโรจน์ (2543)	บุตรี เดชทวีทย์ และคณะ (2541)	ภาคคาร์บอน	คาร์บอนกัมมันต์ที่ กระตุ้นด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์	คาร์บอนกัม- มันต์ทาง การค้า
1. วัตถุประสงค์	ไม้อยูคาลิปตัส โกลบูลัส (E.globulus)	ไม้อยูคาลิปตัสคา มาลดูเลนซิส (E.Camaldulensis)	กะลามะพร้าว	ภาคคาร์บอน จากโรงงาน ผลิตกระดาษ	ไม้อยูคาลิปตัส	กะลามะพร้าว
2. เตาเผา	เบตนิง	เบตนิง	เบตนิง	-	เบตนิง	-
3. สภาพในการคาร์บอนไนซ์	-	450 °ซ, 45 นาที	-	-	500 °ซ, 45 นาที	-
4. สภาพในการกระตุ้น	870 °ซ, 270 นาที	900 °ซ, 150 นาที	800 °ซ, 60 นาที	-	500 °ซ, 120 นาที	-
5. สารกระตุ้น	ไอน้ำ	ไอน้ำ	ซิงค์กลอไรด์	-	โซเดียมไฮดรอกไซด์	-
6. ร้อยละผลิตภัณฑ์	21	33.14	เพิ่มชิ้น ร้อยละ 60 44.2	-	เพิ่มชิ้นร้อยละ 40 25.49	-
7. ค่าการดูดซับไอโอดีน (มก./ก.)	968	1233	922	670.22	709.39	715.30
8. ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มก./ก.)	311	242	-	112.35	196.07	204.08
9. พื้นที่ผิวแบบบีอีที (ม. ² /ก.)	1193	1076.15	-	-	-	-

จากตารางที่ 4.13 พบว่า ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถากคาร์บอนจะมีค่าน้อยกว่าคาร์บอนกัมมันต์ชนิดอื่น ๆ แต่เมื่อคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นแล้ว นับว่าคุ้มค่าที่จะใช้ถากคาร์บอนมาดูดซับสารต่าง ๆ แทนการนำไปฝังกลบ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสีย และช่วยลดการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิตที่อาจส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย นอกจากนี้ถากคาร์บอนยังมีขั้นตอนในการเตรียมที่ง่ายเพียงนำมาล้างน้ำจนเป็นกลางก็สามารถใช้ในการดูดซับสารได้ แต่ถากคาร์บอนมีข้อจำกัดคือ มีความสามารถในการดูดซับสารได้ไม่มาก ดังนั้นหากจะนำถากคาร์บอนไปใช้จึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมด้วย อย่างไรก็ตาม หากอุตสาหกรรมกระดาษมีความสนใจจะใช้ถากคาร์บอนในการดูดซับสารในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงาน จะเป็นการลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 การเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองเผาไม้ยูคาลิปตัส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน คือที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 45 นาที ซึ่งจะได้ปริมาณร้อยละคาร์บอนคงตัว ประมาณ 73.88 และร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้ประมาณ 25.49

5.2 การกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการกระตุ้น 120 นาที โดยพิจารณาจากค่าการดูดซับ ไอโอดีนของคาร์บอนกัมมันต์ซึ่งมีค่าประมาณ 709 มิลลิกรัมที่ดูดซับได้ต่อกรัมของคาร์บอนกัมมันต์

5.3 การทดสอบการดูดซับไอโอดีน

คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าคาร์บอนกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกากคาร์บอน โดยมีค่าประมาณ 715 709 และ 670 มิลลิกรัมที่ดูดซับได้ต่อกรัมของคาร์บอนกัมมันต์ ตามลำดับ

5.4 การทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลู

คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงกว่าคาร์บอนกัมมันต์จากการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกากคาร์บอน โดยมีค่าประมาณ 204 196 และ 112 มิลลิกรัมที่ดูดซับได้ต่อกรัมของคาร์บอนกัมมันต์ ตามลำดับ

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำกากคาร์บอนที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นอื่น ๆ เพิ่มเติม ไปกระตุ้นด้วยกรรมวิธีการอื่น เช่น กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ กระตุ้นด้วยไอน้ำ เป็นต้น เพื่อให้กากคาร์บอนมีความสามารถในการดูดซับได้มากขึ้น
2. ควรนำไม้ยูคาลิปตัสไปกระตุ้นด้วยวิธีการและสารเคมีอื่น เช่น ซิงค์คลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การดำเนินงานขั้นต่อไป

1. นำคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และกากคาร์บอนไปตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)
2. นำคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า และกากคาร์บอน ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการของ Brunauer – Emmett – Teller (BET) เพื่อหาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง ขนาดของรูพรุน และลักษณะการกระจายตัวของรูพรุน



เอกสารอ้างอิง

1. กรมวิทยาศาสตร์บริการ, การศึกษาเรื่องการทำคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ, รายงานกิจกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ฉบับที่ 38, 2523 : 65-73.
2. มานัด แก้วถาวร, ผลของโซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าว, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
3. สักดิ์จิตรรา ต้นสมบูรณ์ ลัดดา ยาวีร์ชน และ ชลธา ไกรวัตบุสรณ์, การผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากขานอ้อย, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538 : 15-18.
4. กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ กรุงเทพมหานคร : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532.
5. Jankowska, H., Swiatkowski, A. and Choma, J. **Active Carbon** . Poland : Eillis Horwood Limited, 1991.
6. เกศรา นุดาลัย และ กณษะ. การผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพุดในห้องปฏิบัติการ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วารสารการวิจัยและพัฒนา. ปีที่ 4 ฉบับที่ 3(2532) : 67-68.
7. วรณนิภา อมาตยกุล กฤติกา จารุทะวีย์, การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนและกระตุ้นด้วยไอน้ำ. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
8. วิเชียร ตรงจิตรธรรม. การคาร์บอนไนซ์ของถ่านหินในฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.
9. Hassler, John W. **Purification with activated carbon**. Activated carbon. London : Leonard Hill, 1974 :169.
10. บุญชัย ตระกูลมหาชัย. การผลิตกะลาตาลโคคนในฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
11. Baker, Frederick S., Miller, Charles E., Repik, Albert J. and Tolles, Donald E. Activated carbon. Ruthven, **Douglas Encyclopedia of Separation Technology**, pp.72-93 USA : John Wiley&Sons, 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Rodriguez-Reiniso, F. and Molina-Sabio, M. **Activated Caron from Lignocellulosic Materials by Chemical and/or Physical Activation : An Overview.** Carbon. 30(1992) : 1,111-1,118.
13. ขวาลี เศษทวีทย์, สายใจ นารถสมบูรณ์. **ผลของสารละลายซิงค์กลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายผสมระหว่างซิงค์กลอไรด์กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว.** ปรียญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.
14. Byrne, Jane F. and Marcsch, H. **Introductory Overview.** In Patrick, John W., Porosity in Carbons: **Characterization and Application**, pp.227-252. Great Britain : Edward Arrol, 1995.
15. McGarry N.G., **The reclamation of dricking water.** New York, Nation Technical Information Service U.S., Department of Commerce, 1975 : 30-41.
16. Johns, Mitchell M., Marshall, Wayne E. and Toles, Christopher A. **The Effect of Activation Method on The Properties of Pecan Shell Activated Carbon.** J Chem.Tech.Biotechnol. 74(1999) :1,077-1,044.
17. John T. Cookson, Jr. **Adsorption Mechanisms: The Chemistry of Organic Adsorption on Activated Carbon.** In Cherenisinoff, Paul N. and Ellerbusch, F., Carbon adsorption Handbook, 241-279. Michigan : Ann Arbor Science, 1978.
18. Faust, Samuel D. and Aly, Osman M. **Adsorption Processes for Water treatment.** Butter Worth, 1987.
19. นัชชรี นิลนนท์. **การผลิตคาร์บอนกัมมันต์จากไม้โกงกางด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
20. Suzuki, M. **Adsorption engineering.** Chemical Engineering Monographs vol.25. Tokyo : Kodamsha, 1950.
21. Matlson, J.S. and Mark, H.B. **Activated carbon surface chemistry and adsorption from solution.** New york : Marcle Dekker, Inc. 1971.
22. Bansal, R.C. and cowoker. **Active carbon.** New York: Marcel Dekker, 1988.
23. Gergova, K. **A comparison of adsorption characteristics of various activated carbons.** Journal Chemical Technology & Biotechnology. Vol.56, 1993: 77 – 82.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. Gergova, K., Galusko, A., Prtrov, N. and Minkova, V. **Investigation of The Porous Structure of Activated Carbons Prepared by Pyrolysis of Agricultural by-products in a Steam of Water Vapor.** Carbon 30 (1992):720-727.
25. จักริน นิธิจันทร์. การผลิตถ่านกัมมันต์ระดับขยายส่วนจากฟัดโดยคาร์บอนในเซชันและการกระตุ้นด้วยไอน้ำในฟลูอิด์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
26. พงศธร โค้วชากรณ. ถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
27. Charles, N., Satterfield, 1981, **Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice.** 2nd ed., New York : Mcgraw-Hill Book Company, 31-50.
28. Noll, K.E., Gounarios, V. and Hou, W., 1992, **Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control.** Michigan, Lewis, 199-216.
29. Oscik, J., **Adsorption.** New York, John Willey&Sons, pp.157-193.
30. วิโรจน์ บุญอานวยวิทยา. 2544. **จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี : Chemical Kinetics and Reactor Design.** กรุงเทพฯ. 312-319.
31. Arrigada, R., Garcia,R. and Reyes,P. **Steam and Carbon Dioxide Activation of Eucalyptus Globulus Wood.** Fuel. 75(1996):1,701-1,706.
32. วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
33. American Water Works Association. 1994. **AWWA Standard for Granular Activated Carbon.** Denver. Colorado.
34. American Standard of Testing Material. **Standard Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal ASTM D1762-84.** 309-310.
35. American Standard of Testing Material. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke ASTM D3175-89a.** 313-315.
36. มั่นสิน ตันจุลเวสม์, **วิศวกรรมประปา เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์ ก. วิศวกรรม 2527 : 189-219.**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37. คู่มือการใช้เครื่อง Area Meter II ของ Spröhlein Instruments, Karl Kolb Scientific Technical Supplies D-6 072 Drieiech, West Germany.
38. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2532. ถ่านกัมมันต์ : Standard for Activated Carbon. กรุงเทพฯ
39. เอกสารข้อมูลความปลอดภัย. บริษัท แล็บสแกน เอเชีย จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ [34-35]

ก.1 การวิเคราะห์หาความชื้น

- นำไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ มาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (A) และจดบันทึก

- อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเคสติกเคเตอร์ หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก (B)

- คำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{ร้อยละความชื้น} = [(A-B) / A] \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสหลังอบไล่ความชื้น (กรัม)

ก.2 การวิเคราะห์สารระเหย

- นำถ่านชาร์จากการคาร์บอนไนซ์มาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในครุฑีเบลที่ทราบน้ำหนักพร้อมปิดฝา

- นำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที แล้วทิ้งให้เย็นในเคสติกเคเตอร์ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก (E)

- คำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = [(C-E) / C] \times 100$$

เมื่อ C = น้ำหนักของถ่านชาร์จากการคาร์บอนไนซ์ (กรัม)

E = น้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสหลังการเผาไล่สารระเหย (กรัม)

ก.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเถา

- นำถ่านซาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ที่รู้น้ำหนักที่แน่นอน (F) มาล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร
- ล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง (วัดค่าพีเอชได้เท่ากับ 7)
- นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก (G)
- คำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{ร้อยละเถา} = [(F-G) / C] \times 100$$

เมื่อ F = น้ำหนักของครุฑีเบลพร้อมฝาปิดรวมกับถ่านซาร์และเถาจากการคาร์บอนไนซ์ (กรัม)

G = น้ำหนักของครุฑีเบลพร้อมฝาปิดรวมกับถ่านซาร์ที่ล้างเถาออกแล้ว (กรัม)

ก.4 การวิเคราะห์หาค่าคาร์บอนคงตัว

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ร้อยละความชื้น} + \text{ร้อยละสารระเหย} + \text{ร้อยละเถา})$$

ก.5 ตัวอย่างการคำนวณ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณองค์ประกอบแบบประมาณที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักไม้ยูคาลิปตัส (กรัม)		C	E	F	G
	ก่อนเผา	หลังเผา				
300	5.3340	2.8341	1.5080	0.4649	28.7718	28.7419
400	5.3768	1.7980	1.5685	0.8322	29.1391	29.1134
500	5.3302	1.3510	1.5071	1.2029	29.5098	29.5049
600	5.1496	1.2024	1.5981	1.2954	29.6023	29.5965
700	5.2369	0.9147	1.5912	1.3426	29.6495	29.6449

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณองค์ประกอบแบบประมาณที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส
ณ เวลาต่างๆ

เวลา (นาที)	น้ำหนักไม้ยูคาลิปตัส (กรัม)		C	E	F	G
	ก่อนเผา	หลังเผา				
15	5.2001	1.5673	1.5101	1.1118	29.4118	29.4020
30	5.1667	1.5464	1.5329	1.1423	29.4423	29.4296
45	5.7048	1.4541	1.5436	1.2185	29.5185	29.5131
60	5.3302	1.3510	1.5071	1.2029	29.5098	29.5049
75	5.6654	1.4277	1.5515	1.2480	29.5481	29.5447
90	5.8763	1.4561	1.5404	1.2471	29.5400	29.5357

หมายเหตุ C = น้ำหนักของถ่านชาร์จากการคาร์บอนไนซ์ (กรัม)

E = น้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสหลังการเผาไล่สารระเหย (กรัม)

F = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาปิดรวมกับถ่านชาร์และเถ้าจากการคาร์บอนไนซ์ (กรัม)

G = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาปิดรวมกับถ่านชาร์ที่ล้างเถ้าออกแล้ว (กรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.5.1 การคำนวณหาค่าร้อยละความชื้น

$$\text{น้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสก่อนอบ (A)} = 4.6752 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสหลังอบไล่ความชื้น (B)} = 4.4549 \text{ กรัม}$$

$$\text{ร้อยละความชื้น} = [(4.6752 - 4.4549)/4.6752] \times 100$$

$$= 4.71 \%$$

ก.5.2 การคำนวณหาค่าร้อยละสารระเหย ที่ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

$$\text{น้ำหนักของถ่านชาร์จากการคาร์บอนไนซ์ (C)} = 1.5071 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสหลังการเผาไล่สารระเหย (E)} = 1.2029 \text{ กรัม}$$

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = [(1.5071 - 1.2029)/1.5071] \times 100$$

$$= 20.18 \%$$

ก.5.3 การคำนวณหาค่าร้อยละเถ้า ที่ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

$$\text{น้ำหนักของครุชชีบิสพร้อมฝาปิดรวมกับถ่านชาร์และเถ้า (F)} = 29.5098 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของครุชชีเบ็ดพร้อมฝาปิดรวมกับถ่านชาร์ที่เหลือ (G)} = 29.5049 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักของถ่านชาร์จากการคาร์บอนไนซ์ (C)} = 1.5071 \text{ กรัม}$$

$$\text{ร้อยละเถ้า} = [(29.5098 - 29.5049)/1.5071] \times 100$$

$$= 0.33 \%$$

ก.5.4 การคำนวณหาร้อยละคาร์บอนคงตัว ที่ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 100 - (4.71 + 20.18 + 0.33)$$

$$= 74.78 \%$$

ภาคผนวก ข.
วิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน

ข.1 สารละลายไอโอดีน

1. นำสารละลายไอโอดีนที่ความเข้มข้นเจือจางมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV - Visible Spectrophotometer จากนั้นนำสเปกตรัมที่ได้มาหาค่าความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (λ_{max})

2. ปิเปิดสารละลายไอโอดีนที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จำนวน 10, 20, 30 และ 40 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรจำนวน 4 ขวด

3. ปรับปริมาตรของสารละลายแต่ละขวดให้ได้ 100 มิลลิลิตร

4. ปิเปิดสารละลายที่ได้ 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร หาคความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแต่ละขวด ตามที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อการหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย

5. นำสารละลายที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ $\lambda = \lambda_{max}$ ด้วยเครื่อง UV - Visible Spectrophotometer

6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับค่าความเข้มข้นของสารละลาย

ข.2 สารละลายเมทิลีนบลู

1. นำสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเจือจางมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV - Visible Spectrophotometer จากนั้นนำสเปกตรัมที่ได้มาหาค่าความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (λ_{max})

2. เตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 30 ppm

3. นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ $\lambda = \lambda_{max}$

4. นำข้อมูลที่ได้อัปโหลดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง กับความเข้มข้นของสารละลายก็จะได้กราฟเทียบมาตรฐาน

ข.3 กราฟเทียบมาตรฐาน

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (λ_{max})

- สารละลายไอโอดีน = 620 นาโนเมตร

- สารละลายเมทิลีนบลู = 610 นาโนเมตร

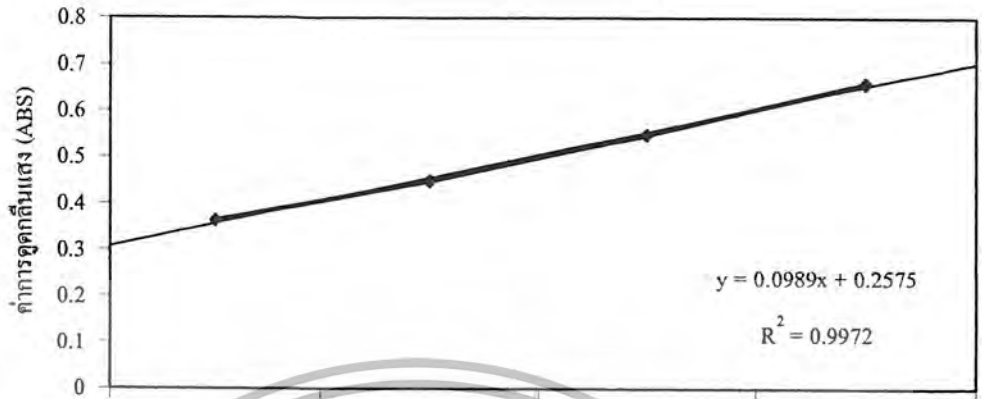
ตารางที่ ข.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายไอโอดีน

ความเข้มข้น (นอร์มอล)	ค่าการดูดกลืนแสง (ABS)
0.010542	0.3625
0.018072	0.4485
0.027108	0.549
0.037148	0.6585

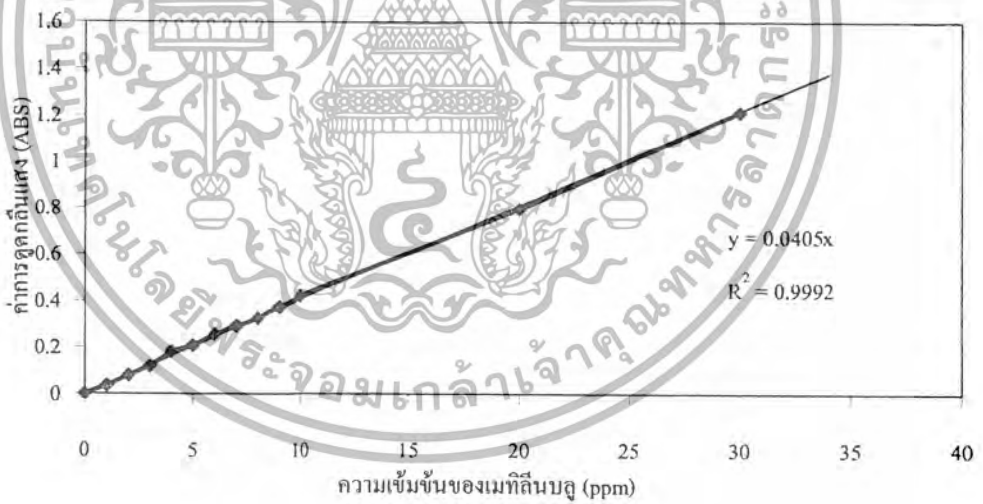
ตารางที่ ข.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายเมทิลีนบลู

ความเข้มข้น (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสง (ABS)
0	0.000
1	0.035
2	0.080
3	0.117
4	0.181
5	0.207
6	0.255
7	0.291
8	0.325
9	0.372
10	0.420
20	0.796
30	1.211

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายไอโอดีน



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีนบลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสารเคมีที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล

ก.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการดูดซับไอโอดีน

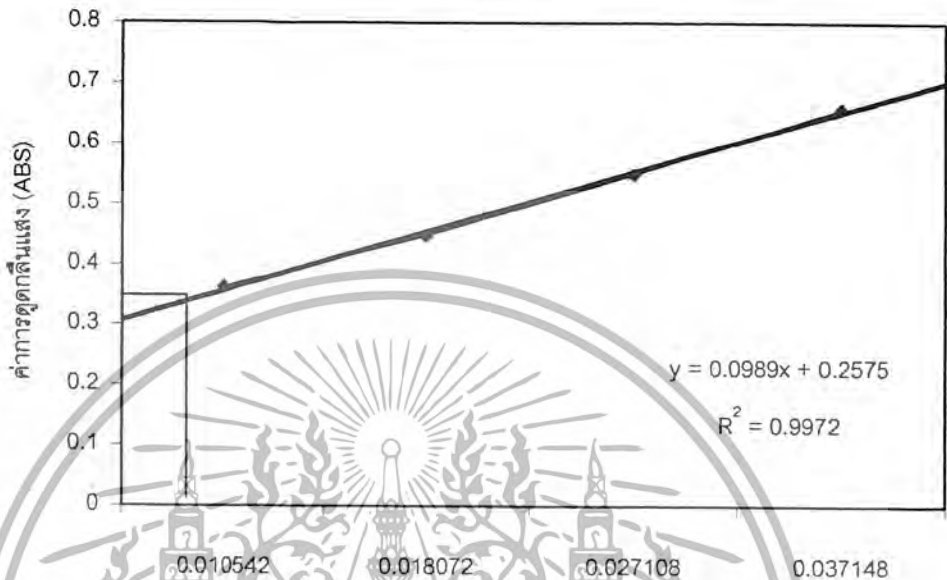
** ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไอโอดีน คือ 0.0992 นอร์มอล

สถานะในการ กระตุ้นคาร์บอน กัมมันต์	น้ำหนัก (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง (ABS)			ค่าความ เข้มข้น ที่อ่านจาก กราฟ มาตรฐาน	ค่าการดูดซับ ไอโอดีนที่ คำนวณจาก สมการ (3.3)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
500 องศาเซลเซียส						
60 นาที	2.0010	0.347	0.345	0.346	0.0089	656
90 นาที	2.0007	0.336	0.340	0.338	0.0081	671
120 นาที	2.0010	0.288	0.288	0.288	0.0030	709
600 องศาเซลเซียส						
60 นาที	2.0011	0.452	0.448	0.450	0.0195	657
90 นาที	2.0003	0.536	0.534	0.535	0.0281	691
120 นาที	2.0012	0.527	0.529	0.528	0.0274	679
700 องศาเซลเซียส						
60 นาที	2.0009	0.469	0.467	0.468	0.0213	565
90 นาที	2.0011	0.504	0.506	0.505	0.0250	618
120 นาที	2.0008	0.499	0.497	0.498	0.0243	501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

คาร์บอนกัมมันต์ที่สภาวะการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 60 นาที



รูปที่ ค.1 การหาความเข้มข้นของไอโอดีนที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายไอเคียมไฮดรอกไซด์

จากตารางที่ ค.1 สภาวะการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที มีค่าการดูดกลืนแสง 0.346 เทียบเป็นความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานได้ 0.0089 นอร์มอล และนำค่านี้ไปเปิดตารางแก้ไขสำหรับค่าการดูดซับไอโอดีนที่ภาคผนวก (ง) ได้เท่ากับ 1.1463 นำค่าต่าง ๆ มาแทนค่าในสมการ (3.3) ได้ดังนี้

$$\text{ค่าการดูดซับไอโอดีน} = [(H_1 - H_2)/M] \times [12693D_1] \quad (3.3)$$

เมื่อ H_1 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนก่อนการดูดซับ (นอร์มอล)

H_2 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนหลังการดูดซับ (นอร์มอล)

M = น้ำหนักของตัวอย่างคาร์บอนกัมมันต์ (กรัม)

D_1 = ค่าการแก้ไขการดูดซับไอโอดีน (Correction factor)

$$\begin{aligned} \text{ค่าการดูดซับไอโอดีน} &= [(0.0992 - 0.0089)/2.0010] \times [12693 \times 1.1463] \\ &= 656 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล

ก.2.1 วิธีหาค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล C_s

ตัวอย่างการคำนวณค่าการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppm ด้วยกากคาร์บอน ที่เวลา 300 นาที ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.607

นำค่าการดูดกลืนแสงมาพิจารณาหาค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล ในกราฟมาตรฐาน หรือ แทนค่าในสมการ $y = 0.0405x$

จากการแทนค่าในสมการจะได้ความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุล คือ 14.988 ppm นำค่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สมดุลนี้มาหาปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับที่สมดุล

ก.2.2 วิธีหาปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับที่สมดุล

โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ} = \text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นเมทิลีนบลูที่สมดุล}$$

$$485.012 = 500 - 14.988 \text{ ppm}$$

ในการทดลองใช้ปริมาณเมทิลีนบลู 100 มิลลิลิตร ดูดซับด้วยกากคาร์บอนหนัก 0.5002 กรัม

จากสูตร

$$g = C \times V$$

เมื่อ g = น้ำหนักของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับด้วยกากคาร์บอน (มิลลิกรัม)

C = ปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับ (ppm)

V = ปริมาณเมทิลีนบลูที่ใช้ในการทดลอง (ลิตร)

แทนค่า

$$g = 485.012 \times 0.1$$

$$= 48.5012 \text{ มิลลิกรัม}$$

จาก

$$q = g / G$$

เมื่อ q = ปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักกากคาร์บอนที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

G = น้ำหนักกากคาร์บอนที่ใช้ (กรัม)

$$q = 48.5012 / 0.5002$$

$$= 96 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

ภาคผนวก ง.

ตารางแสดงค่าแก้ไขสำหรับค่าการดูดซับไอโอดีน [36]

ตารางที่ ง.1 ค่าแก้ไขสำหรับค่าการดูดซับไอโอดีน

ค่าแก้ไขสำหรับค่าการดูดซับไอโอดีน										
Residual filtrate Normality,C	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.0080	1.1625	1.1613	1.1600	1.1575	1.1550	1.1538	1.1513	1.1500	1.1475	1.1463
0.0090	1.1438	1.1425	1.1400	1.1375	1.1363	1.1350	1.1325	1.1300	1.1288	1.1275
0.0100	1.1250	1.1238	1.1225	1.1213	1.1200	1.1175	1.1163	1.1150	1.1138	1.1113
0.0110	1.1100	1.1088	1.1075	1.1063	1.1038	1.1025	1.1000	1.0988	1.0975	1.0963
0.0120	1.0950	1.0963	1.0925	1.0900	1.0888	1.0875	1.0630	1.0850	1.0838	1.0820
0.0130	1.0800	1.0788	1.0775	1.0763	1.0750	1.0738	1.0725	1.0713	1.0700	1.0688
0.0140	1.0675	1.0663	1.0650	1.0625	1.0613	1.0600	1.0588	1.0575	1.0563	1.0550
0.0150	1.0538	1.0525	1.0513	1.0500	1.0488	1.0475	1.0463	1.0450	1.0438	1.0425
0.0160	1.0413	1.0400	1.0388	1.0375	1.0375	1.0363	1.0350	1.0333	1.0325	1.0313
0.0170	1.0300	1.0288	1.0275	1.0263	1.0250	1.0245	1.0238	1.0225	1.0208	1.0200
0.0180	1.0200	1.0188	1.0175	1.0163	1.0150	1.0144	1.0138	1.0125	1.0125	1.0113
0.0190	1.0100	1.0088	1.0075	1.0075	1.0063	1.0050	1.0050	1.0038	1.0025	1.0025
0.0200	1.0013	1.0000	1.0000	0.9988	0.9975	0.9975	0.9963	0.9950	0.9950	0.9938
0.0210	0.9938	0.9925	0.9925	0.9913	0.9900	0.9900	0.9888	0.9875	0.9875	0.9863
0.0220	0.9863	0.9850	0.9850	0.9838	0.9825	0.9825	0.9813	0.9813	0.9800	0.9788
0.0230	0.9879	0.9775	0.9775	0.9763	0.9763	0.9750	0.9750	0.9738	0.9738	0.9725
0.0240	0.9725	0.9708	0.9700	0.9700	0.9688	0.9688	0.9675	0.9675	0.9663	0.9663
0.0250	0.9650	0.9650	0.9638	0.9638	0.9625	0.9625	0.9613	0.9613	0.9606	0.9600
0.0260	0.9600	0.9588	0.9588	0.9575	0.9575	0.9563	0.9563	0.9550	0.9550	0.9538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ค่าแก้ไขสำหรับค่าการดูดซับไอโอดีน (ต่อ)

ค่าแก้ไขสำหรับค่าการดูดซับไอโอดีน										
Residual filtrate Normality,C	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.0270	0.9538	0.9525	0.9525	0.9519	0.9513	0.9513	0.9506	0.9500	0.9500	0.9488
0.0280	0.9488	0.9475	0.9475	0.9463	0.9463	0.9463	0.9450	0.9450	0.9438	0.9438
0.0290	0.9425	0.9425	0.9425	0.9413	0.9413	0.9400	0.9400	0.9394	0.9388	0.9388
0.0300	0.9375	0.9375	0.9375	0.9363	0.9363	0.9363	0.9363	0.9375	0.9375	0.9375
0.0310	0.9333	0.9333	0.9325	0.9325	0.9365	0.9319	0.9313	0.9313	0.9300	0.9300
0.0320	0.9300	0.9294	0.9288	0.9288	0.9280	0.9275	0.9275	0.9275	0.9270	0.9270



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

การหาค่าพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ตามวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน BET [37]

จ.1 สารเคมีและอุปกรณ์

จ.1.1 สารเคมี

1. ก๊าซไนโตรเจน
2. ไนโตรเจนเหลว
3. คาร์บอนกัมมันต์ที่ต้องการทดสอบคุณสมบัติ

จ.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ Specific surface area ของของแข็ง โดยกระบวนการดูดซับไนโตรเจน Area meter II ของ Ströhlein instruments ประเทศเยอรมัน พร้อมอุปกรณ์ประกอบการวิเคราะห์ตามคำแนะนำในคู่มือการใช้เครื่องมือนี้

2. ตู้อบ

จ.2 วิธีการทดลอง

1. อบตัวอย่างคาร์บอนกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปลดปล่อยให้เย็นในเคสสิคเคเตอร์ แล้วชั่งตัวอย่าง 0.02-0.05 กรัม ใส่ลงใน Adsorption vessel

2. วาง Adsorption vessel ที่บรรจุตัวอย่างไว้ในถังใน Heating thermostat

3. อุ่นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผ่านก๊าซไนโตรเจนธรรมดาที่ค่าความดัน 760 mmHg เป็นเวลาประมาณ 45 นาที เพื่อขจัดโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างก่อนทำการวัด

4. ใช้ Adsorption vessel 2 ใบ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยใบหนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกใบหนึ่งเป็นภาชนะเปล่า

5. ผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปในภาชนะทั้งสองภายใต้ความดันปกติที่อุณหภูมิห้อง

6. ทำให้ภาชนะทั้งสองเย็นจัดใน Cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิด Pressure difference ระหว่างภาชนะทั้งสองซึ่งวัดได้โดยใช้ Differential manometer

7. อ่านค่าที่ได้แล้วนำไปคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

มาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดคุณภาพคาร์บอนกัมมันต์

ฉ.1 มาตรฐานและวิธีการทดสอบที่ใช้ทั่วไป [38]

มาตรฐาน และวิธีการทดสอบคาร์บอนกัมมันต์แตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ ดังจะกล่าวต่อไปนี้ คือ

ฉ.1.1 มาตรฐานของ AWWA (American Water Works Association) ได้กำหนด คุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่ต้องทดสอบ คือ

- Impurities
- Moisture
- Ash
- Apparent Density
- Particle Size Distribution (Fineness)
- Phenol Adsorptive Capacity
- Iodine Adsorptive Capacity
- Odor Adsorptive Capacity
- Tannin Adsorptive Capacity
- Retention of Adsorptive Capacity

สำหรับคาร์บอนกัมมันต์เม็ด AWWA กำหนดคุณสมบัติที่ต้องทดสอบ คือ

- Moisture
- Apparent Density
- Particle Size Distribution
- Abrasion Resistance
- Iodine Number

ฉ.1.2 มาตรฐานการทดสอบคาร์บอนกัมมันต์ตามวิธีของ ASTM กำหนดคุณสมบัติที่ต้องทดสอบของคาร์บอนกัมมันต์ (ASTM, PART 30, 1982) ไว้ดังนี้

- Radioiodine Testing of Nuclear-Grade Gas Phase Adsorbents
- Liquid Phase Evaluation
- Apparent Density
- Carbontetrachloride Activity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Moisture
- Particle Size
- Total Ash Content

ฉ.1.3 มาตรฐานและการทดสอบคาร์บอนกัมมันต์ของประเทศญี่ปุ่น กำหนดการทดสอบคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ ดังนี้

คาร์บอนกัมมันต์ผง (JIS K 1470-1967)

- Caramel Decolourizing Power
- Methylene Blue Decolourizing Power
- Loss on Drying
- Chloride
- Iron
- Residue on Ignition
- pH

คาร์บอนกัมมันต์เม็ด (JIS K 1474-1975)

- Iodine Adsorption Performance
- Chloropicrin Break-Through Adsorption Performance
- Equilibrium Adsorption Performance for 1/n Solvent Vapour
- Grain Size
- Grain Size Distribution (Effective Size and Uniformity Coefficient)
- Hardness
- Ignition Point
- Filling Bulk Density
- Loss on Drying
- Ignition Residue
- pH

ฉ.1.4 มาตรฐานและการทดสอบคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ฟอกสีน้ำมันพืชและน้ำตาลของประเทศอินเดีย กำหนดคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ที่ต้องทดสอบ (IS : 877-1956)

- Moisture
- Ash
- Bulk Density

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Matter Soluble in Hydrochloric Acid
- pH of Aqueous Extract
- Titrable Acidity or Alkalinity
- Filtrability and Oil Retention (for Vegetable Oils)
- Decolourizing Power

ฉ.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคาร์บอนกัมมันต์ [39]

ฉ.2.1 ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด ชนิด ขนาด คุณลักษณะที่ต้องการการบรรจุ เครื่องหมายและฉลาก การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน และการทดสอบคาร์บอนกัมมันต์

ฉ.2.2 บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

1. คาร์บอนกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัสดุธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี
2. ค่าไอโอดีน หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ดูดซับไว้ด้วยคาร์บอนกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังจากถูกดูดซับ และผ่านการกรองแล้วเป็น 0.02 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

ฉ.2.3 ชนิด

คาร์บอนกัมมันต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. คาร์บอนกัมมันต์ผง (Powdered Activated Carbon)
2. คาร์บอนกัมมันต์เม็ด (Granular Activated Carbon)

ฉ.2.4 ขนาด

1. คาร์บอนกัมมันต์ผง

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านตะแกรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

2. คาร์บอนกัมมันต์เม็ด

ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านตะแกรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ฉ.2.5 คุณลักษณะที่ต้องการ

1. ลักษณะทั่วไป

- คาร์บอนกัมมันต์ผง ต้องเป็นผงละเอียดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมใดๆ
- คาร์บอนกัมมันต์เม็ด ต้องเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมใดๆ

การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

2. คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมี

- คาร์บอนกัมมันต์ผง ให้เป็นไปตามตารางที่ ฉ.1

ตารางที่ ฉ.1 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์ผง

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีนนับเบอร์ ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B600
2	ความหนาแน่นปรากฏ กรั้มต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20 ถึง 0.75	AWWA B600

- คาร์บอนกัมมันต์เม็ด ให้เป็นไปตามตารางที่ ฉ.2

ตารางที่ ฉ.2 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์เม็ด

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีนนับเบอร์ ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
2	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8	AWWA B604
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรั้มต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า	0.36	AWWA B604
4	ความแข็ง ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70	AWWA B604 RO-Tap Abrasion Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.2.6 การบรรจุ

1. ให้บรรจุคาร์บอนกัมมันต์ในภาชนะบรรจุที่สะอาดแห้ง และปิดได้สนิท
2. น้ำหนักสุทธิของคาร์บอนกัมมันต์ในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้

ที่ฉลาก

ฉ.2.7 เครื่องหมายและฉลาก

1. ที่ภาชนะบรรจุคาร์บอนกัมมันต์ทุกหน่วยอย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือ เครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน

- ชนิด
- น้ำหนักสุทธิ เป็นกิโลกรัม
- เดือน ปีที่ทำ หรือรหัสรุ่นที่ทำ
- ชื่อผู้ผลิต หรือโรงงานที่ผลิต หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

2. ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เป็น ไปตามมาตรฐานนี้ จะแสดงเครื่องหมาย มาตรฐานกับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนั้น ได้ ต่อเมื่อได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแล้ว

ฉ.2.8 การชักตัวอย่างและเกณฑ์การตัดสิน

1. รุ่นในที่นี้ หมายถึง คาร์บอนกัมมันต์ชนิดเดียวกัน ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน บรรจุใน ภาชนะชนิด และขนาดเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน

2. การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากับทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้

2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบการบรรจุ

- ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีการสุ่มจากรุ่นเดียวกัน ตามจำนวนที่กำหนดใน ตารางที่ ฉ.3
- ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้างต้น จึงจะถือว่าคาร์บอนกัมมันต์รุ่นนั้น

เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบขนาด และคุณลักษณะที่ ต้องการ

- ให้ชักตัวอย่าง จากตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบการบรรจุแล้ว มาภาชนะบรรจุละ เท่าๆ กัน ให้ได้ตัวอย่างรวมกันไม่น้อยกว่า 1,500 กรัม ผสมตัวอย่างทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วแบ่ง ออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน บรรจุแต่ละส่วนลงในภาชนะที่สะอาดแห้ง และปิดได้สนิท พร้อมทั้ง

บันทึกรายละเอียดที่จำเป็นไว้ ตัวอย่างส่วนหนึ่งนำไปใช้ในการวิเคราะห์ อีก 2 ส่วน ที่เหลือให้ผู้ที่เกี่ยวข้องเก็บไว้เป็นหลักฐาน

ตารางที่ ณ.3 แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบการบรรจุ

ขนาดรุ่น หน่วยภาชนะบรรจุ	ขนาดตัวอย่าง หน่วยภาชนะบรรจุ
ไม่เกิน 25	3
26-50	4
51-100	5
101-300	6
301-500	7
501-800	8
801-1,000	9
ตั้งแต่ 1,001 ขึ้นไป	10

3. เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างคาร์บอนกัมมันต์ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดทุกข้อ จึงจะถือว่าคาร์บอนกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

ณ.2.9 การทดสอบ

1. ให้ใช้วิธีทดสอบที่กำหนดในมาตรฐานนี้ หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในมาตรฐานนี้
2. น้ำกลั่นและสารเคมีที่ใช้ ต้องมีความบริสุทธิ์เหมาะสมสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์

3. การทดสอบขนาด

3.1 คาร์บอนกัมมันต์ผง

เครื่องมือ

- ตะแกรง 150 ไมโครเมตร
- กุชครูซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีทดสอบ

นำตัวอย่างประมาณ 25 กรัม ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมง จนได้น้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดสิกเคเตอร์ จากนั้นให้รีบชั่งให้ทราบ น้ำหนักที่แน่นอนถึง 0.001 กรัม (m_0) เติตัวอย่างใส่บีกเกอร์ เติมน้ำ 600 ถึง 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนให้เข้ากัน ทำตะแกรงให้เปียกก่อนแล้วค่อยเทตัวอย่างช้าๆ ผ่านตะแกรง ในขณะที่เทให้คน ตัวอย่างเป็นครั้งคราว ล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ออกให้หมด เมื่อตัวอย่างทั้งหมดตกลงบน ตะแกรงแล้ว ใช้น้ำล้างตัวอย่าง อีกจนกระทั่งไม่มีตัวอย่างผ่านตะแกรงอีก ถ่ายตัวอย่างที่ค้างบน ตะแกรง โดยใช้น้ำช่วยใส่ลงในบีกเกอร์แล้วกรองผ่านกระดาษชิวชิว ซึ่งทราบน้ำหนักแน่นอนแล้ว นำ กระดาษชิวชิวไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสประมาณ 2 ชั่วโมงจนได้น้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็น ในเดสิกเคเตอร์แล้วรีบชั่งทันที

วิธีคำนวณ

$$\frac{\text{ปริมาณที่ผ่านตะแกรง}}{\text{ร้อยละ โดยน้ำหนัก}} = \frac{(1 - m_1) \times 100}{m_0} \quad (\text{ณ.1})$$

เมื่อ m_0 คือ น้ำหนักตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งแรก (กรัม)

m_1 คือ น้ำหนักตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งที่ 2 (กรัม)

3.2. การบดน้ำมันคัมเบอร์

เครื่องมือ

- ตะแกรง 150 ไมโครเมตร

- เครื่องเขย่า ที่มีอัตราการเขย่า 285 ± 5 รอบต่อนาที

วิธีทดสอบ

ชั่งตัวอย่างประมาณ 100 กรัม ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนถึง 0.1 กรัม ใส่ใน ตะแกรง เขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 3 นาที ถ่ายส่วนที่ค้างบนตะแกรงทั้งหมดลงในภาชนะที่ทราบ น้ำหนักแน่นอนแล้ว ชั่งและคำนวณส่วนที่ค้างบนตะแกรงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

4. นำนักรสูทธิ

ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดพร้อมภาชนะบรรจุ แล้วเทคาร์บอนกัมมันต์ออก ซึ่งภาชนะเปล่าแล้วเฉลี่ยผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักสูทธิต่อภาชนะบรรจุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช.

คุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้า [33]

ตารางที่ ช.1 คุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ทางการค้าของบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด

TECHNICAL SPECIFICATION	
Product	: Powdered Activated Coconut Shell Based Carbon
Grade	: HRO M325-60
Test Method	: ASTM, Unless otherwise stated
Application	: Decolourization, Deodorization, Dechlorination and Organic compound removal
PHYSICAL PROPERTIES	SPECIFICATION
Particle Size Distribution : Under 325 mesh (ASTM MESH/MM)	MIN. 60%
Apparent Density (g/cc)	MIN. 0.50
Moisture (%w/w) (As Packed)	MAX. 8
Ash (%w/w) (As Packed)	MAX. 5
pH	9-11
Surface Area (m ² /g) (BET)	MIN. 1000
Iodine Number (mg/g) (A WWA B 604)	MIN. 950
Methylene Blue (cc/g) (JIS K 1474-1991)	MIN. 130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้