

การดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ



นางสาวจิตตรี พละกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF FORMALDEHYDE VAPOR ON ACTIVATED CARBON
DERIVED FROM RICE HUSK



Miss Jittree Palakun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์
ที่ผลิตจากแกลบ

โดย

นางสาวจิตตรี พละกุล

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

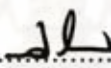
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เฟ็งปรีชา

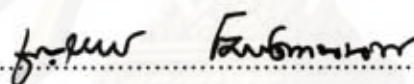
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

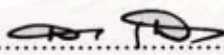
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ประไพรัชสิทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

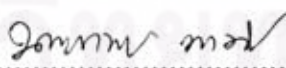
.....  คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์)

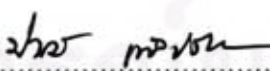
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ ไชษิตานนท์)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เฟ็งปรีชา)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ประไพรัชสิทธิ์)

.....  กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นภาพร พานิช)

.....  กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ปารมี เฟ็งปรีชา)

จิตตรี พละกุล : การดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก
 แกลบ. (ADSORPTION OF FORMALDEHYDE VAPOR ON ACTIVATED
 CARBON DERIVED FROM RICE HUSK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
 รศ.ดร.สมใจ เพ็งปรีชา, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร. ณรงค์ ประไพรักษ์สิทธิ์;
 127 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบโดยวิธีการกระตุ้นทาง
 เคมีด้วย NaOH, H₃PO₄ และ ZnCl₂ และประเมินความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการใช้
 เป็นตัวดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ จากผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ส่วน
 ใหญ่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลาง โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ
 สารกระตุ้นต่อถ่านแกลบที่เหมาะสมเป็น 2:1 ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ
 700 °C มีค่าไอโอดีนัมเบอร์มากที่สุดคือ 572.72 mg/g ซึ่งมีพื้นที่ผิวตามสมการ BET
 เท่ากับ 648.28 m²/g อย่างไรก็ตามถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C
 เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุด สามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ได้ถึง 394.25 ± 3.94 mg/g
 ซึ่งสามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์
 คุณภาพที่ผลิตจากกะลามะพร้าวเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง
 ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ โดย
 ใช้ Pearson's Correlation มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (r = .757)

สาขาวิชา...วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต สิทธิ พละกุล.....

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4989061020 : MAJOR Environmental Science

KEYWORDS : ACTIVATED CARBON / ADSORPTION / RICE HUSK /
FORMALDEHYDE

JITTREE PALAKUN : ADSORPTION OF FORMALDEHYDE VAPOR ON
ACTIVATED CARBON DERIVED FROM RICE HUSK.

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.SOMCHAI PENGPRECHA, Ph.D.,

THESIS CO-ADVISOR : ASSIST.PROF.NARONG PRAPHAIRAKSIT, Ph.D.,

127 pp.

This research is aimed to study the production of activated carbon from rice husk by chemical activation process utilizing NaOH, H₃PO₄ and ZnCl₂ and to evaluate its performance as an adsorbent for formaldehyde vapor. The results revealed that most of the activated carbon obtained are composed of microporous and mesoporous structures with the suitable weight ratio of activating agent to carbonized rice husk is 2:1. The carbonized rice husk activated with ZnCl₂ at 700 °C was found to have the highest iodine number of 572.72 mg/g with the BET surface area of 648.28 m²/g. However, the carbonized rice husk activated with NaOH at 700 °C is the best adsorbent for formaldehyde vapor with a capacity of 394.25 ± 3.94 mg/g, which is slightly superior to those obtained from a quality high commercial coconut shell activated carbon. It was also found the relationship of pore volumes of the activated carbon produced and amount of formaldehyde vapor by Pearson's Correlation had statistical significance at 0.05 level. (r = .757)

Field of study : Environmental Science

Student's Signature *จิตติกร นบ.ป.จ.*

Academic Year : 2009

Advisor's Signature *Somchai Pengprecha*

Co-Advisor's Signature *Narong Praphairaksit*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ประไพรัชสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งในการให้ความรู้ แนวคิด คำแนะนำ ความเอาใจใส่ และตรวจแก้ไขข้อผิดพลาด ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ มาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร. นพภาพร พานิช และดร.ปารมี เพ็งปรีชา ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณลุงยีน เรืองสว่าง เจ้าของโรงสีข้าว “ป.เจริญรุ่งเรือง” ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์แกลบมาใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในห้องปฏิบัติการตลอดระยะเวลาทำการวิจัย และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่กรุณามอบทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสมวดี ไชยอนันต์สุจริต น้องณิชารีย์ วงศ์สวัสดิ์กุล และพี่มานพ ติระรัตนสมโภช ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่เอกชัย ประภาลิมรังสี พี่วีรชัย แก้วผลึก พี่อุรัจฉวี อุณหเลขกะ และพี่เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม คุณณัฐฎพล อิศรเสวีรักษ์ พี่เพ็ญพร ฉายะวาณิชย์ คุณสุทธิศักดิ์ พฤกษานุกัณฑ์ คุณทิพาวรรณ รักสงบ น้องวชิรโรบล แสงสว่าง น้องวีระยุทธ เจือวัฒนศิริกุล และน้องนิสากรณ์ แสงประชุมที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและคอยเป็นกำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณลุง-ป้า พี่น้องทุกคนที่ให้การสนับสนุนให้คำปรึกษา รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การดูดซับ (Adsorption).....	4
2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon).....	5
2.2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์.....	5
2.2.2 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์.....	5
2.2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	6
2.2.4 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	8
2.2.5 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	15
2.2.6 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์.....	17
2.2.7 การใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	21
2.3 พอร์มาลดีไฮด์.....	23
2.3.1 ความเป็นมาของพอร์มาลดีไฮด์และการผลิตในระดับอุตสาหกรรม.....	23
2.3.2 การใช้งานต่างๆ.....	24
2.3.3 การเข้าสู่สิ่งแวดล้อม.....	26
2.3.4 ความเป็นพิษ.....	26
2.3.5 การกำหนดค่ามาตรฐานของพอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ.....	29

2.3.6 การควบคุม ป้องกันอันตราย และการจัดลำดับความเป็นอันตราย ของฟอร์มัลดีไฮด์.....	30
2.3.7 การตรวจวัดและวิเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศ.....	31
2.3.8 หลักการวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศ ตามวิธีของ NIOSH Manual of Analytical Methods 3500.....	33
2.4 แกลบ (Rice Husk).....	34
2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3. เครื่องมือ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	38
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2 วิธีการทดลอง.....	39
3.2.1 ศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ.....	39
3.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ (Commercial Activated Carbon).	41
3.2.3 ศึกษาอุณหภูมิและตัวกระตุ้นที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ใน การดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์.....	41
3.2.4 ศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ใน ระบบคอลัมน์.....	44
3.2.5 ศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่าน กัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ ด้วย Pearson's Correlation (2-tailed).....	46
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
4.1 ศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบและการหาค่าไอโอดีน นัมเบอร์.....	47
4.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์.....	50
4.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของถ่านกัมมันต์.....	50
4.2.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์.....	51
4.2.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนด้วย เครื่อง BET-MINI ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์.....	55

4.2.4	ศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยใช้เครื่อง SEM-EDS เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์.....	57
4.3	ศึกษาอนุภูมิภาคและตัวกระตุ้นที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมิตัวเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์.....	61
4.4	ศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ในระบบคอลัมน์.....	62
4.5	ศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ ด้วย Pearson's Correlation (2-tailed).....	65
5.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	67
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	68
	รายการอ้างอิง.....	70
	ภาคผนวก.....	73
	ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....	74
	ภาคผนวก ข บันทึกผลการทดลองหาค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....	79
	ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	87
	ภาคผนวก ง ผลการคำนวณหาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด.....	99
	ภาคผนวก จ ผลการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์กับเวลา.....	107
	ภาคผนวก ฉ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 900– 2547 ถ่านกัมมันต์.....	115
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	127

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แสดงสถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2544–2551.....	2
2.1	แสดงการเปรียบเทียบชนิดและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ.....	7
2.2	แสดงคุณสมบัติของ $ZnCl_2$	13
2.3	แสดงคุณสมบัติของกรด H_3PO_4	14
2.4	แสดงคุณสมบัติของ $NaOH$	14
2.5	แสดงชื่อทางการค้าและบริษัทผู้ผลิตฟอร์มาลดีไฮด์.....	25
2.6	แสดงสถิติการนำเข้าและส่งออกฟอร์มาลดีไฮด์ของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2544–2549.....	26
2.7	แสดงค่ามาตรฐานปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ.....	29
2.8	แสดงวิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างของฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ.....	32
2.9	แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากแกลบทั้งในประเทศ และต่างประเทศ.....	35
4.1	แสดงค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ.....	48
4.2	แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าปริมาณคาร์บอนของถ่านกัมมันต์.....	50
4.3	แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของ ถ่านกัมมันต์.....	56
4.4	แสดงปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านกัมมันต์แต่ละ ชนิด.....	61
4.5	แสดงปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้น ด้วย $NaOH$ ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิง พาณิชย์เทียบกับเวลา ที่อัตราการไหล 100 และ 500 mL/min.....	63
4.6	แสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ด้วย Pearson's Correlation (2-tailed).....	66

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กลไกการดูดซับ.....	5
2.2	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	8
2.3	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ.....	10
2.4	รูปแบบการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	12
2.5	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของลิกนินเมื่อใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้น....	13
2.6	การวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของถ่านกัมมันต์และถ่านแกรไฟต์.....	15
2.7	โครงสร้างของถ่านแกรไฟต์.....	16
2.8	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	16
2.9	แสดงไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 5 ชนิด.....	18
2.10	พื้นที่ฉายเงาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ.....	20
2.11	ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง chromotropic acid กับ ฟอर्मาลดีไฮด์.....	33
3.1	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ.....	40
3.2	ขั้นตอนการดูดซับไอระเหยฟอर्मาลดีไฮด์อิมิต์วบนถ่านกัมมันต์.....	41
3.3	การเกิดสีของสารละลายมาตรฐาน.....	44
3.4	แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์การดูดซับไอระเหยฟอर्मาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์	45
3.5	ระบบคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหย ฟอर्मาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์กับเวลา.....	46
4.1	ลักษณะแกลบแห้งและถ่านแกลบที่ได้จากการเผา.....	47
4.2	ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่มี จำหน่ายเชิงพาณิชย์.....	51
4.3	ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่ กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C.....	52
4.4	ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่ กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C.....	52
4.5	ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่ กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 350 °C.....	53
4.6	ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่ กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700 °C.....	53
4.7	ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่ กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ 350 °C.....	54

รูปที่	หน้า
4.8	54
4.9	57
4.10	58
4.11	58
4.12	59
4.13	59
4.14	60
4.15	60
4.16	64
4.17	64

สัญลักษณ์และคำย่อ

ΔH	พลังงานการดูดซับ หน่วยเป็น กิโลแคลอรีต่อกรัมต่อโมล
N	นอร์มัล (Normal) เป็นหน่วยความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็นน้ำหนักสมมูลต่อสารละลาย 1 ลิตร
p/p_0	ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) เป็นความดันของสารถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลของการดูดซับเทียบกับความดันมาตรฐาน ในงานวิจัยนี้ใช้ความดันของก๊าซไนโตรเจนเป็นมาตรฐาน
I_2 No.	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
NaOH, 350 °C	ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C
NaOH, 700 °C	ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C
H_3PO_4 , 350 °C	ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 350 °C
H_3PO_4 , 700 °C	ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700 °C
$ZnCl_2$, 350 °C	ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ 350 °C
$ZnCl_2$, 700 °C	ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ 700 °C
Commercial AC	ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว
ASTM	American Society for Testing and Material
BET	Brunauer, Emmett and Teller
BDDT	Brunauer, Deming, Deming and Teller
SEM-EDS	Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive Spectrometer
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
Conc.	Concentration
ADS	การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของถ่านแกลบ
DES	การปล่อยออก (Desorption) เป็นการปล่อยหรือหลุดของก๊าซไนโตรเจนออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
NIOSH	สถาบันเพื่อความปลอดภัยและอาชีวอนามัยของสหรัฐอเมริกา (National Institute for Occupational Safety and Health)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหามลพิษทางอากาศ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์เป็นอย่างมาก ที่มีการสะสมสารปนเปื้อนในอากาศที่มีค่าความเข้มข้นและระยะเวลาในระดับที่พอจะสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัยมากขึ้น โดยเฉพาะตึกสำนักงาน บ้านพักอาศัยที่เป็นอาคารสูงซึ่งมักจะมีการถ่ายเทอากาศน้อย จึงเป็นเหตุให้มีการสะสมสารปนเปื้อน โดยเฉพาะสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดหนึ่งที่พบในวัสดุก่อสร้าง หรือวัสดุตกแต่งภายในอาคาร เช่น ไม้อัด กระดานไม้ พรม เฟอร์นิเจอร์ที่ทำจากไม้อัด สี สารเคลือบเงาไม้ และแม้แต่การเผาไหม้จากการสูบบุหรี่ [1] หากร่างกายได้รับในระดับความเข้มข้นต่ำ ร่างกายสามารถจะขจัดออกจากโลหิตได้อย่างรวดเร็ว แต่หากได้รับในระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 15 ppm ขึ้นไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองตา จมูก คอ หายใจลำบาก ไอ หลอดลมอักเสบ อ่อนเพลีย มีอาการภูมิแพ้ และหากได้รับในปริมาณน้อยๆ ในระยะเวลายาวนาน อาจก่อให้เกิดมะเร็งได้ [2] ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการแพร่กระจายและกำจัดไอระเหยก่อนออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อลดปัญหามลพิษทางอากาศ

โดยทั่วไปแล้วเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการควบคุมและกำจัดไอของสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีหลายวิธี เช่น การดูดซับ (adsorption), การดูดกลืน (absorption) และการเผาไหม้ (thermal incineration) เป็นต้น [3] แต่วิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ก็คือวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีขั้นตอนการใช้งานที่ออกแบ่งง่าย ต้นทุนต่ำ ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อนและสะดวกในการใช้อย่างยิ่ง

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นวัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีพื้นที่ผิวสูงและมีรูพรุนมาก จึงนิยมใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับสารทั้งที่เป็นของเหลวและก๊าซในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ อาทิ ใช้ฟอกสีและดูดกลืนในอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมอาหาร การผลิตน้ำมันพืช การทำน้ำให้บริสุทธิ์ และอุตสาหกรรมการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ เป็นต้น จากคุณสมบัติและประโยชน์การใช้งานที่หลากหลายของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้มีการใช้งานอย่างสม่ำเสมอทั้งภายในประเทศและส่งออกไปยังต่างประเทศ (ตารางที่ 1.1) อย่างไรก็ตามยังต้องมีการนำเข้าถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพระดับสูง เช่น อุปกรณ์ฟอกอากาศบางชนิด

ตารางที่ 1.1 แสดงสถิติการนำเข้าและส่งออกถ่านกัมมันต์ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2544–2551 [4]

ปี พ.ศ.	สถิติการนำเข้า		สถิติการส่งออก	
	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
2544	3,120	156.12	3,652	161.22
2545	3,278	145.20	3,427	139.58
2546	3,493	145.81	4,752	179.77
2547	4,162	155.82	6,545	250.18
2548	4,802	204.88	8,226	320.06
2549	5,721	267.33	30,587	302.58
2550	4,436	223.12	9,309	263.44
2551	3,853	244.43	10,469	374.81

ในอดีตวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์นั้น ส่วนใหญ่เป็นไม้ กระดุกและถ่านหิน แต่ในระยะต่อมามีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเป็นวัสดุติดขัดกันมากขึ้น เช่น ชัง ข้าวโพด กะลาปาล์ม กะลาตาล ชานอ้อย เปลือกถั่วลิสง เปลือกทุเรียน ชี้อ้อย แกลบ กะลามะพร้าว เป็นต้น เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย และมีราคาถูก

แกลบเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างหนึ่งที่ได้จากการแปรรูปข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร ซึ่งมีปริมาณมาก จึงได้มีการนำแกลบมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด โดยแกลบมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส ลิกนิน ซิลิกาและธาตุต่างๆ โดยมีปริมาณที่แตกต่างกันไป ขึ้นกับสภาพแวดล้อมแต่ละท้องถิ่นเช่น ดิน น้ำ และอากาศ เมื่อนำแกลบมาเผาโดยมีการควบคุมอุณหภูมิในระหว่างเผาพบว่า แกลบที่เผาได้จะมีโครงสร้างเป็นรูพรุน และมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งนอกจากจะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบแล้ว ยังมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 35% โดยน้ำหนัก [5] จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้แกลบสามารถที่จะนำมาใช้วัตถุดิบเพื่อนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษากระบวนการและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้แกลบเป็นวัตถุดิบ

1.2.2 ศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) นำไปหาค่าไอโอดีนหุ้มเบอร์เพื่อหาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบที่เหมาะสม

1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ โดยวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน, ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน, พื้นที่ผิว, ปริมาตรรูพรุน, ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย และลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

1.3.3 ศึกษาอุณหภูมิและตัวกระตุ้นที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมิตัวเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

1.3.4 ศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ในระบบคอลัมน์

1.3.5 ศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำแกลบมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ได้ รวมถึงสามารถนำวิธีดังกล่าวไปใช้ดูดซับไอระเหยสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ได้

1.4.2 สามารถนำแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีราคาถูกลงมาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งมีมูลค่าสูงขึ้นได้

1.4.3 สามารถนำถ่านกัมมันต์ที่ใช่แล้วไปผลิตเป็นซีลีกา เพื่อนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

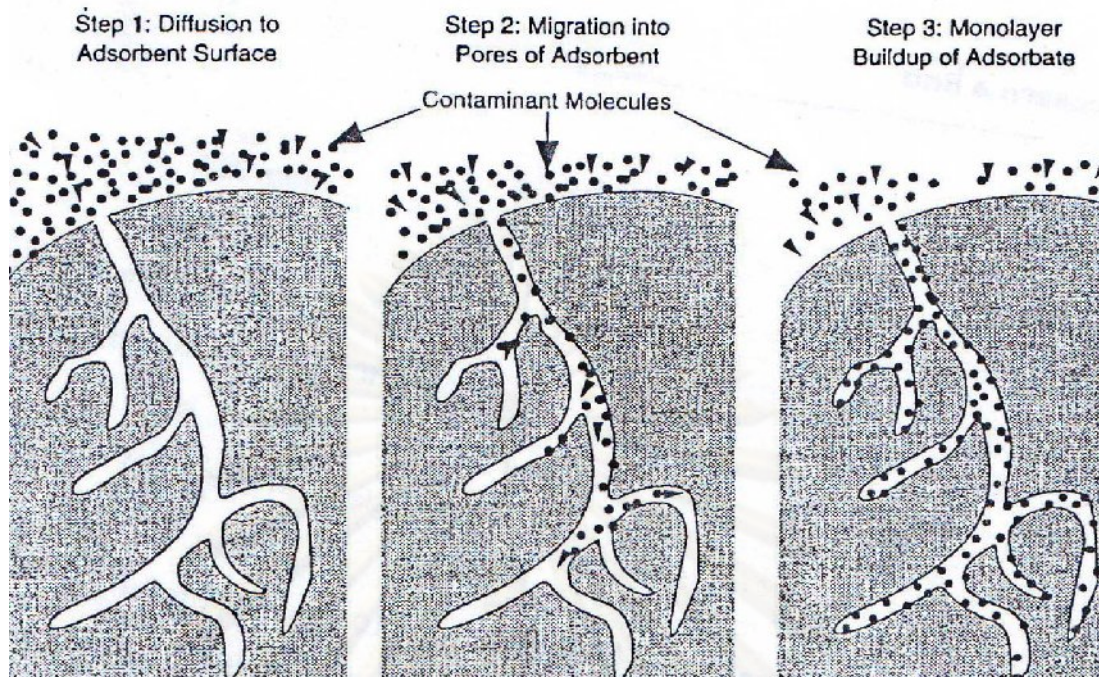
2.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ เป็นกระบวนการสำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและด้านสิ่งแวดล้อม เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสาร 2 สภาวะใด ๆ เช่น ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น ในการดูดซับก๊าซด้วยของแข็ง โมเลกุลของก๊าซจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูพรุน โมเลกุลของก๊าซที่ไปเกาะ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และของแข็งที่พื้นผิวถูกโมเลกุลของก๊าซเกาะนั้น เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ในการดูดซับก๊าซที่ความดันต่ำๆ จะเกิดขึ้นของตัวถูกดูดซับที่มีความหนาเท่ากับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวถูกดูดซับ คือ มีความหนาเพียงชั้นเดียว เรียกว่า การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption) แต่ถ้าวัดการดูดซับก๊าซที่ความดันสูงจะได้ชั้นของตัวถูกดูดซับที่มีความหนาหลายชั้น จะเรียกว่า การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption) ลักษณะการดูดซับนั้น มี 2 ลักษณะคือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (chemisorption)

การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากความแตกต่างของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ไม่มีการแลกเปลี่ยนหรือถ่ายเทอิเล็กตรอนทำให้ตัวถูกดูดซับเป็นอิสระที่จะไปเกาะกับพื้นผิวของตัวดูดซับ จึงสามารถทำกลับสู่สภาพเดิมได้ ในขณะที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปเกาะตัวดูดซับนั้นจะมีการถ่ายเทพลังงานจลน์ของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับทำให้เกิดการคายความร้อน ส่วนการดูดซับทางเคมี เป็นการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับยึดเกาะกับตัวดูดซับด้วยพันธะเคมี โดยเกิดจากตัวถูกดูดซับมีการแลกเปลี่ยนหรือถ่ายเทอิเล็กตรอนกับตัวดูดซับ เกิดเป็นปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีความร้อนมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นการดูดซับทางเคมีจึงมีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ ทำให้ยากต่อการกลับมาสู่สภาพเดิมหรือยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่

ขั้นตอนการดูดซับก๊าซบนตัวดูดซับ มี 3 ขั้นตอน ดังนี้ [3]

ในขั้นแรก เป็นการแพร่กระจายของโมเลกุลก๊าซเข้าสู่ผิวนอกของตัวดูดซับ ชั้นที่สอง โมเลกุลของก๊าซจะเคลื่อนที่จากพื้นที่เล็กๆของผิวนอก ไปยังโพรงช่องว่างภายในของตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นในโพรงช่องว่างเหล่านี้ เพราะความเหมาะสมระหว่างรูปร่างของโมเลกุลของก๊าซกับลักษณะของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ชั้นที่สาม โมเลกุลของก๊าซจะเกาะติดที่ผิวในโพรงช่องว่าง ขั้นตอนการดูดซับก๊าซบนของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการดูดซับ [3]

2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

2.2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง วัสดุที่มีผลผลิตจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการเผาในที่อับอากาศ เพื่อทำให้เป็นถ่าน (carbonization) และผ่านกระบวนการกระตุ้น (activation) เพื่อกระตุ้นให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารมากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับสารที่เป็นก๊าซและของเหลวได้ จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาไม่แพงของถ่านกัมมันต์ ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

2.2.2 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

ในคริสต์ศตวรรษที่ 15 ได้มีการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ โดยนำไม้มาเผาในที่อับอากาศ เพื่อนำมาใช้ในการดูดสีในของเหลว จนกระทั่งในคริสต์ศตวรรษที่ 18 ได้มีการคิดค้นผลิตถ่านกัมมันต์จากกระดูก พบว่าสามารถดูดสีได้มากกว่าถ่านไม้ จึงนิยมนำกระดูกมาใช้ในการฟอกสีน้ำตาลทรายให้ขาวสะอาด จากนั้นได้มีการค้นคว้าพัฒนาเรื่อยๆ จนกระทั่งมีผู้พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากการเผาเลือดกับต่างซี่เก้า มีคุณสมบัติในการดูดสีมากกว่า ถ่านกระดูกถึง 20 – 50 เท่า แต่เนื่องจากผลิตได้น้อยจึงมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ จากจุดนี้เองทำให้มีการพัฒนาและปรับปรุงความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ให้ดีขึ้นโดยผ่านกระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิว

ต่อมาในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ความต้องการหน้ากากป้องกันก๊าซพิษมีมากขึ้น ทำให้นักวิทยาศาสตร์หันมาสนใจในคุณสมบัติการดูดกลิ่นและก๊าซของถ่านกัมมันต์ จึงได้มีการทดลองด้วยวิธีต่างๆ และพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสีน้ำตาลนั้นไม่เหมาะที่

จะนำไปใช้ในการทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ เพราะมีลักษณะพองง่ายและมีน้ำหนักเบา จึงทำให้มีการค้นคว้าวิจัยในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุดูดซับชนิดอื่นๆ ให้มีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น เพื่อใช้เป็นไส้กรองในหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทำให้มีการพัฒนาถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุชนิดอื่นๆ เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน

2.2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ ชนิดผง ชนิดเม็ด ชนิดอัดเม็ดและชนิดแท่ง ซึ่งแต่ละชนิดจะมี ขนาด คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันไป แสดงในตารางที่ 2.1



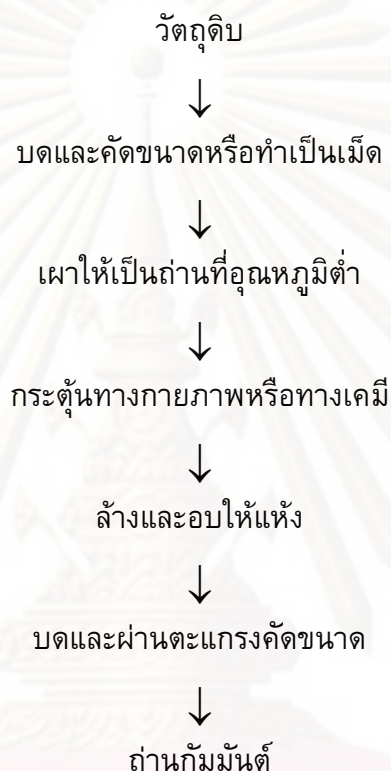
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบชนิดและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ [6]

ชนิด	ขนาด	คุณลักษณะที่ต้องการ	คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี			
			ค่าไอโอดีน (mg/g)	ความหนาแน่น ปรากฏ (g/cm ³)	ความชื้น ไม่เกิน (% w/w)	ความแข็ง ไม่น้อยกว่า (%)
ผง	ปริมาณที่ร่อนผ่านร้าว 150 µm	ผงสีดำ	600	0.20–0.75	-	-
	ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก	ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้				
เม็ด	ปริมาณที่ร่อนผ่านร้าว 150 µm	เม็ดสีดำ	600–1000	0.20	8	70
	ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้				
อัดเม็ด	-	-	600	0.20	8	70
แท่ง	ตามข้อตกลงระหว่าง	แท่งสีดำ	600	-	8	-
	ผู้ซื้อกับผู้ขาย	ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้				

2.2.4 การผลิตถ่านกัมมันต์

ในปัจจุบันกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นมีอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการและการนำไปใช้งาน ซึ่งกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปนั้นจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการเผาให้เป็นถ่าน (carbonization) และขั้นตอนการกระตุ้น (activation) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้น ส่วนใหญ่มักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุที่มาจากธรรมชาติ อาทิ พวกเซลลูโลสที่ได้จากพืช เช่น ไม้ กะลาปาล์ม กะลามะพร้าว ชานอ้อย แกลบ ชี้เลื่อย เปลือกและเมล็ดพืชต่างๆ พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์, พีท อีกทั้งยังได้จากส่วนต่างๆของสัตว์ เช่น กระดูกและเลือด นอกจากนี้วัตถุดิบที่ได้จากการสังเคราะห์ก็สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ เช่น ยางรถยนต์ พลาสติก เป็นต้น โดยทั่วไปวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้นั้น นอกจากจะต้องมีปริมาณคาร์บอนสูงแล้ว ยังจะต้องเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณสารระเหยต่ำ สามารถหาง่าย มีราคาถูกหรือเป็นของเหลือทิ้ง สะดวกในการนำมาใช้งาน และไม่สลายตัวเมื่อนำมาเก็บไว้

อินทรีย์วัตถุสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

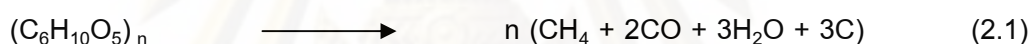
1) ถ่านสังเคราะห์เนื้อแข็ง (hard artificial char) เช่น ถ่านน้ำตาล ถ่านกะลามะพร้าว ถ่านกะลาปาล์ม ถ่านหิน เป็นต้น

2) ถ่านสังเคราะห์เนื้ออ่อน (soft artificial char) เช่น ถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านแกลบ เป็นต้น

ขั้นตอนการเผาให้เป็นถ่าน (carbonization)

เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะเป็นขั้นแรกในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อให้ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างรูพรุน สามารถทำได้โดย นำวัตถุดิบมาเผาในที่อับอากาศหรือมีออกซิเจนอยู่น้อยที่อุณหภูมิ 200–500 °C เรียกว่า *กระบวนการไพโรไลซิส* ซึ่งจะทำให้สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ถูกไล่ออกมาในรูปของก๊าซ ส่วนคาร์บอนที่มีอยู่จะรวมตัวกันเป็นผลึก (microcrystalline) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของของแข็งเรียกว่า ถ่าน (char) โดยขนาดของถ่านนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ระยะเวลาในการเผา องค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ

วัตถุดิบส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างหลักเป็นเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$)_n เมื่อถูกเผาแบบไพโรไลซิสจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.1



ขั้นตอนของกระบวนการเผาให้เป็นถ่าน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนตามช่วงอุณหภูมิ คือ ช่วงอุณหภูมิ 27–197 °C ก๊าซจะมีเกิดการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอยู่ในช่วง 197–497 °C จะเข้าสู่ขั้นตอนการเผาแบบไพโรไลซิส ทำให้เกิดก๊าซและน้ำมันดินหลุดออกมา จากนั้นในช่วงอุณหภูมิ 497–847 °C เป็นช่วงที่น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลง ส่วนที่เหลืออยู่จะเป็นคาร์บอนอิสระที่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่าน

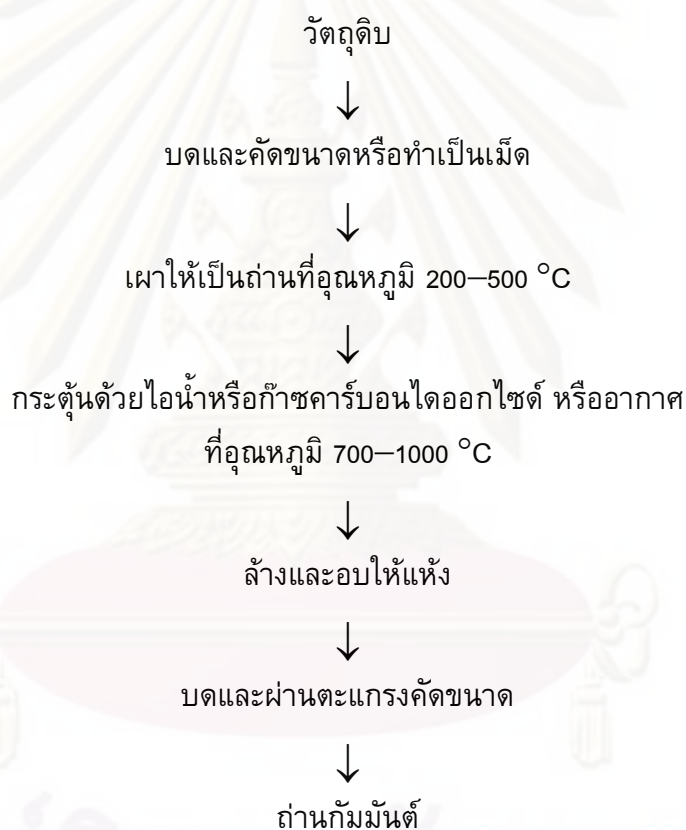
ถ่านที่ได้ควรมีลักษณะเป็นสีดำตลอด (uniformly black) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (shiny surface) ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp) และปราศจากขี้เถ้า (no ash) ส่วนความสามารถในการดูดซับของถ่านนั้นถือว่าต่ำมาก เพราะการเผาแบบไพโรไลซิส จะยังมีน้ำมันดินคงเหลืออยู่ภายในรูพรุนหรือเกาะตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนั้นไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับให้ดีขึ้น

ขั้นตอนการกระตุ้น (activation)

เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการทำให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ อีกทั้งยังเป็นการทำให้พื้นที่ผิวมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากมีโมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีความสามารถในการดูดซับขึ้นมาแทน และช่วยกำจัดสารปนเปื้อนให้หลุดออกไปจากพื้นผิว เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารต่างๆ แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1) วิธีการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (physical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้นและมีรูพรุนกว้างมากขึ้นด้วยปฏิกิริยาก๊าซซิฟิเคชัน (gasification) โดยนำวัตถุดิบทำปฏิกิริยากับก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing gas) เช่น ไอน้ำ อิมัตวีย่งยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ อากาศ จากปฏิกิริยาจะสลายให้ออกไซด์ของคาร์บอน ทำให้ผิวของคาร์บอนมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาใหม่และพร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับก๊าซหรือสามารถดูดซับสารได้มากกว่าตำแหน่งอื่น

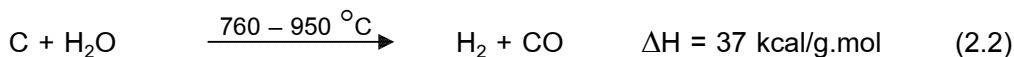
ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบคุณสมบัติทางเคมี อัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา [7] ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ [8]

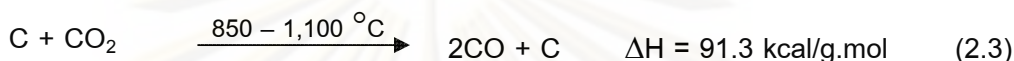
ตัวอย่างวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

- การกระตุ้นด้วยไอน้ำ เป็นวิธีที่นิยมกันมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงมีข้อดี คือ สามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างรูพรุนได้อย่างรวดเร็วและสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้ การใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนนั้น ถือว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน โดยทั่วไปจะกระตุ้นที่อุณหภูมิประมาณ 760 – 950 °C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.2



ปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่ของไอน้ำ ดังนั้นอุณหภูมิในการกระตุ้นจึงไม่ควรสูงเกิน 1,000 °C เพราะที่อุณหภูมิสูงเกินกว่านี้อะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกถูกเผาไหม้ ทำให้ขนาดและพื้นผิวของอนุภาคลดลงได้

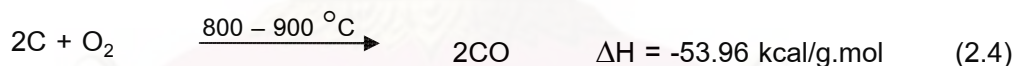
- การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.3



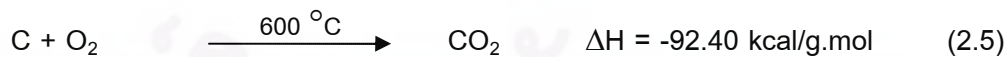
จากค่า ΔH จะเห็นได้ว่า ปฏิกิริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิกะตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยทั่วไปมักจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 850 – 1,100 °C

- การกระตุ้นด้วยอากาศ เป็นการใช้ออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี

วิธีที่ 1 นำถ่านมากระตุ้นด้วยอากาศที่อุณหภูมิ 800–900 °C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.4



วิธีที่ 2 นำถ่านมากระตุ้นด้วยอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 °C ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.5



ข้อดีและข้อเสียของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ

ข้อดี ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นแล้วสามารถนำไปใช้ได้เลย เพราะไม่มีปัญหาเรื่องสารเคมีเหลือตกค้าง

ข้อเสีย ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาสูงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพจะเล็กกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมี

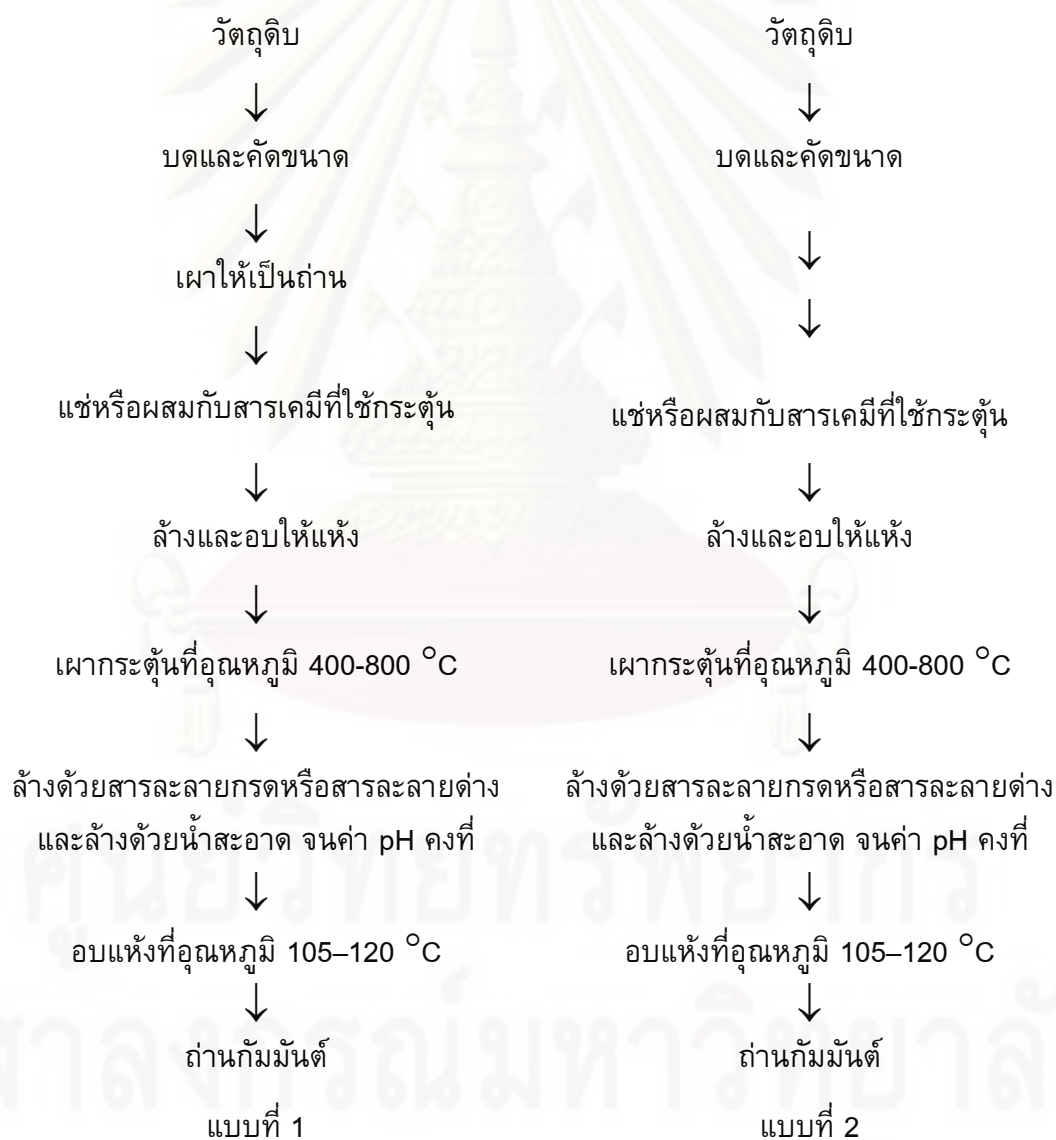
2) วิธีการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยการเติมสารเคมีให้เป็นสารกระตุ้น (activation agent) ผสมให้เข้ากับวัตถุดิบ เพื่อให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ $ZnCl_2$, $NaOH$, H_3PO_4 , H_2SO_4 , $CaCl_2$, $FeCl_3$, $KSCN$, HCl , HNO_3 และ H_3BO_3 เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางเคมี คือ

- ชนิดของวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีคุณภาพแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัตถุดิบ

- วิธีในการกระตุ้น เช่น ชนิดของสารกระตุ้นและปริมาณของสารกระตุ้น อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

วิธีการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีสามารถทำได้ 2 แบบ คือ



รูปที่ 2.4 รูปแบบการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

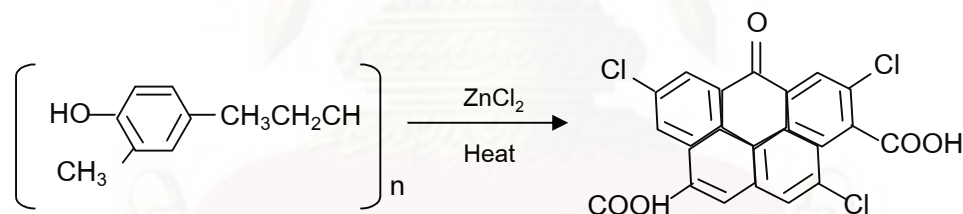
ตัวอย่างวิธีการกระตุ้นทางเคมี

- การกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

$ZnCl_2$ เป็นสารเคมีประเภทสารดูดน้ำ (dehydrating agent) ที่นิยมใช้นำมากระตุ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ทางเคมี คุณสมบัติของ $ZnCl_2$ แสดงในตารางที่ 2.2 ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของ $ZnCl_2$ [9]

คุณสมบัติ	ค่าประมาณ
น้ำหนักโมเลกุล	136.3
สถานะ	ของแข็ง ผลึก
สี	ขาว
ความหนาแน่น (g/cm^3)	4.7
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	293
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	732
pH	5

สารละลายเข้มข้นของ $ZnCl_2$ มีความเป็นกรดสูง เมื่อนำวัตถุดิบที่เผาเป็นถ่านแล้วมาแช่ใน $ZnCl_2$ ในอัตราส่วนระหว่าง $ZnCl_2$ ต่อถ่าน (w/w) เป็น 0.5–4 แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400–900 $^{\circ}C$ $ZnCl_2$ จะเป็นตัวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ [8]



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของลิกนินเมื่อใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้น

จากรูป 2.5 จะเห็นว่า โครงสร้างของลิกนินหลังจากกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ จะมีหมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นกรดเช่น Cl, COOH เป็นต้น ซึ่งมีผลทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความว่องไวในการดูดซับมากขึ้น

- การกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

H_3PO_4 เป็นสารละลายกรดที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวโดยนำวัตถุดิบไปแช่ในกรด H_3PO_4 เพื่อให้กรด H_3PO_4 แทรกซึมอยู่ทั่วเนื้อถ่าน จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300–500 $^{\circ}C$ โดยกรดที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ด้วยตัวเอง เกิดการกัดกร่อนขึ้น ทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีความพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น ข้อดีของการใช้สารละลายกรด H_3PO_4 คือ ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ค่อนข้างสูง อุณหภูมิที่ใช้ในการ

กระตุ้นไม่สูงนักและสามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยยังได้กรด H_3PO_4 ที่มีความเข้มข้นสูง คุณสมบัติของสารละลายกรด H_3PO_4 แสดงในตารางที่ 2.3 ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของกรด H_3PO_4 [9]

คุณสมบัติ	ค่าประมาณ
น้ำหนักโมเลกุล	98
สถานะ	ของเหลว
สี	ใส ไม่มีสี
ความหนาแน่น (g/cm^3)	3.4
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	21
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	158
pH	1.5

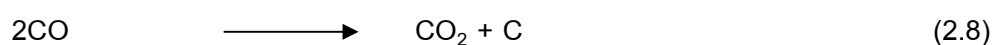
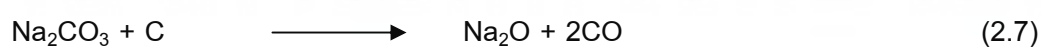
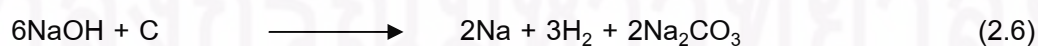
- กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

NaOH เป็นสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบสเข้มข้น คุณสมบัติของ NaOH แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของ NaOH [9]

คุณสมบัติ	ค่าประมาณ
น้ำหนักโมเลกุล	40
สถานะ	ของแข็ง
สี	ขาว
ความหนาแน่น (g/cm^3)	>1.4
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	318
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	1390
pH	14

เมื่อนำวัตถุติดไฟหรือถ่านในสารละลาย NaOH โดย Na^+ จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า $700^{\circ}C$ โมเลกุลของ H_2 และ CO_2 จะหลุดออกมา ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในสมการที่ 2.6-2.8



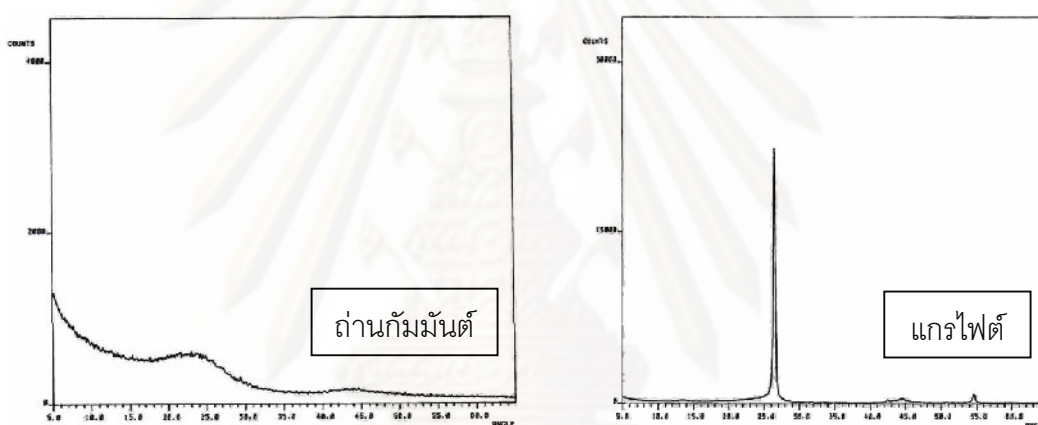
ข้อดีและข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมี คือ

ข้อดี ใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นน้อยกว่า และผลผลิตที่ได้มากกว่าวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

ข้อเสีย ต้องล้างสารเคมีออกจากถ่านกัมมันต์ก่อนใช้งาน และอาจมีสารเคมีตกค้างได้ และสารเคมีบางชนิดมีฤทธิ์กัดกร่อนที่รุนแรงทำให้เครื่องมือและอุปกรณ์เกิดการสึกกร่อน

2.2.5 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous) คือ มีโครงสร้างความเป็นผลึกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน เมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction เทียบกับโครงสร้างความเป็นผลึกของแกรไฟต์ (graphite) พบว่าแกรไฟต์นั้นมีโครงสร้างความเป็นผลึก (crystallinity) ที่ชัดเจนกว่า แสดงในรูปที่ 2.6



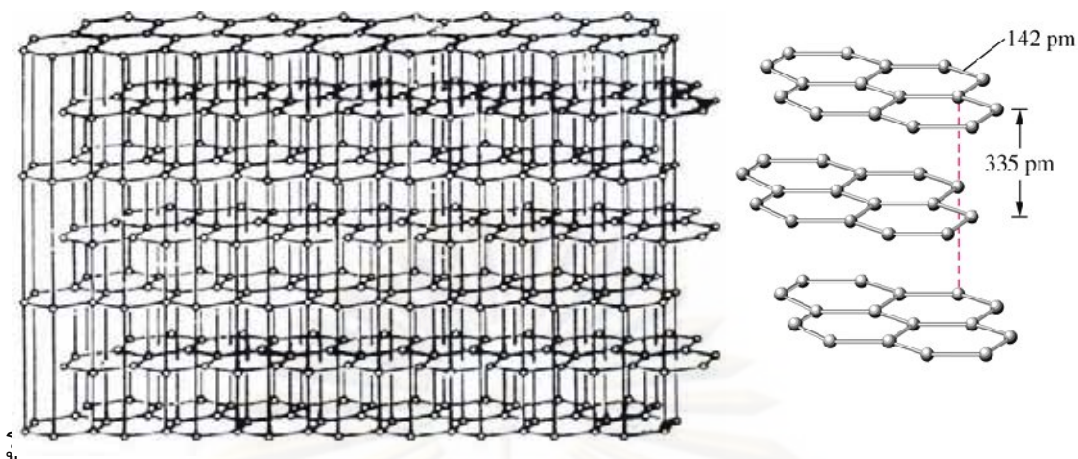
(a) amorphous

(b) crystallinity

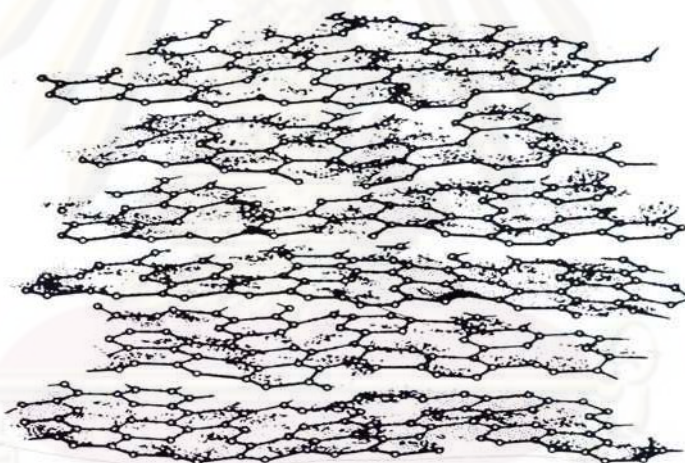
รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของถ่านกัมมันต์และแกรไฟต์ [5]

ผลึกแกรไฟต์ประกอบไปด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนซึ่งเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนภายในชั้นมีขนาด 142 pm ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 335 pm คาร์บอนแต่ละตัวจะมี $4 e^-$ โดย $3 e^-$ ของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนต์ เป็นพันธะเดียวกับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่ e^- อีก 1 ตัวที่เหลือจะเคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



โครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีการจัดเรียงตัวกันคล้ายแกรไฟต์ แต่มีความเป็นระเบียบน้อยกว่า โครงสร้างของถ่านกัมมันต์นั้นจะประกอบด้วยวงแหวนเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆ มีขนาดประมาณ 150 Å และระยะห่างระหว่างผลึกเล็กๆ นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 20–50 Å ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ [10]

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์จะพบว่ามีรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้อยู่ลึกเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ อย่างไม่เป็นระเบียบ และมีความลึกไม่สม่ำเสมอ ตามมาตรฐานของระบบ IUPAC ได้แบ่งขนาดรูพรุน ไว้ 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก (micropores) มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 nm, ขนาดกลาง (mesopores) มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2–50 nm และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 50 nm

จำนวนรูพรุนของถ่านกัมมันต์นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิว คือ ถ้าจำนวนรูพรุนมีมากพื้นที่ผิวก็จะมาก ถ้าจำนวนรูพรุนมีน้อยพื้นที่ผิวก็จะน้อย ส่วนขนาดรูพรุน

ของถ่านกัมมันต์ซึ่งผลิตจากวัสดุและวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกัน จะมีการกระจายตัวตามขนาดของรูพรุนแตกต่างกัน

2.2.6 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์สามารถพิจารณาได้จากหลายสมบัติ ดังนี้ คือ

ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine Number) [10]

เป็นค่าสำคัญที่ใช้ออกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากไอโอดีนถูกถ่านดูดซับได้ดี ดังนั้นค่าการดูดซับไอโอดีนจึงถูกใช้เป็นตัววัดประสิทธิภาพของถ่าน โดยวัดน้ำหนักของไอโอดีนเป็น mg ต่อน้ำหนักถ่าน 1 g สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตามมาตรฐานของ ASTM (American Society for Testing and Material) ซึ่งได้กำหนดให้ความเข้มข้นของไอโอดีนที่ภาวะสมดุลเท่ากับ 0.02 N ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีควรใช้น้ำหนักในการวิเคราะห์ต่ำ ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้ความเข้มข้นของไอโอดีนที่ภาวะสมดุลเท่ากับ 0.02 N ได้พอดี จึงต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้น้ำหนัก 3 ค่า เพื่อให้มีความเข้มข้นของไอโอดีนที่ภาวะสมดุลมากกว่า ไกล่เคียง และน้อยกว่า 0.02 N แล้วใช้วิธีเฉลี่ยแบบลอการิทึม ทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

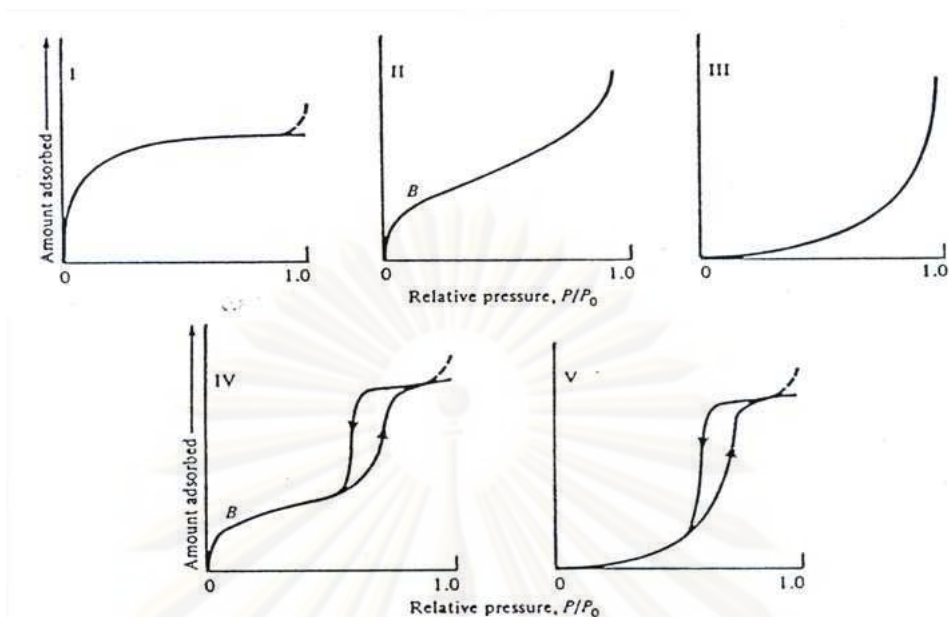
การหาพื้นที่ผิว

ในการวัดพื้นที่ผิวจะต้องศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) ไอโซเทอมคือ เส้นกราฟที่แสดงความสามารถของตัวดูดซับเทียบกับความดันของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ข้อมูลที่ได้จากไอโซเทอมคือ ค่าของพื้นที่ผิว ค่าของปริมาตรรูพรุน ข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับ ทราบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในการทำให้อากาศบริสุทธิ์

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพ สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด โดยในตอนแรกเสนอโดย Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT) ในปัจจุบันการแบ่งกลุ่มได้ถูกเรียกว่า Brunauer, Emmett and Teller (BET) classification ในการดูดซับเมื่อค่าความดันย่อยมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายชั้น รูปของชนิดไอโซเทอมดังแสดงในรูปที่ 2.9

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมของการดูดซับทั้ง 5 ชนิด [10]

ไอโซเทอมชนิดที่ 1 หรือ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ เป็นการดูดซับของตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูพรุนขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวภายนอก (external surface area) ต่ำ ที่ความดันย่อยต่ำ ($< 0.1 p/p_0$) ก็จะสามารถดูดซับได้มากแล้ว ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว เสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อย ประมาณ $0.5 p/p_0$ ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอมแบบที่ 1 คือ การดูดซับของก๊าซไนโตรเจนบนถ่านที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่ อุณหภูมิ 77 K (-196°C) การดูดซับของแอมโมเนียบนผิวถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 273 K และการดูดซับบนซีโอไลต์

ไอโซเทอมชนิดที่ 2 บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอมที่มีรูปแบบซิกมอยด์ หรือแบบเอส (sigmoid or S-shaped) เป็นรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ โดยจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เสร็จสมบูรณ์ก่อน จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ เกิดเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer)

ไอโซเทอมชนิดที่ 3 เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก แต่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ เช่น การดูดซับของไอน้ำบนผิวถ่านที่ไม่มีรูพรุน

ไอโซเทอมชนิดที่ 4 จะพบในสารที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 1.5–100 nm เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ตัวถูกดูดซับจะเริ่มเข้าไปในรูพรุน ความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (capillary condensation in pores) โดยลักษณะกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 คือ มี

การดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์ เช่น การดูดซับเบนซีน (benzene) บนไอออนออกไซด์เหล็ก (iron (III)oxide gel) ที่อุณหภูมิ 320 K

ไอโซเทอมชนิดที่ 5 เป็นการดูดซับที่มีลักษณะคล้ายกับไอโซเทอมชนิดที่ 3 คือ เกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย แต่จะสามารถเกิดการควบแน่นในรูพรุนได้ ซึ่งจะพบในตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุนชนิดเดียวกับไอโซเทอมชนิดที่ 4 เช่น การดูดซับไอน้ำบนถ่านหินที่อุณหภูมิ 373 K

การคำนวณพื้นที่ผิวโดยสมการแลงเมียร์ (Langmiur equation)

โดยสมการแลงเมียร์มีสมมติฐาน คือ

1. เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น
2. เป็นการดูดซับที่ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ
3. แต่ละตำแหน่งของผิวการดูดซับมีลักษณะเหมือนกันหมด
4. ตำแหน่งดูดซับ 1 ตำแหน่งจะสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้ 1 โมเลกุล

พื้นที่ผิวสามารถหาได้จากสมการของแลงเมียร์ ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{P}{V} = \frac{P}{V_m} + \frac{1}{BV_m} \quad (2.9)$$

เมื่อ V คือ ปริมาณการดูดซับของตัวถูกดูดซับ (mmol/g) ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่ความดันย่อยๆ (p/p₀) ต่างๆ

V_m คือ ปริมาณการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer capacity, mmol/g)

B คือ ค่าคงที่

P คือ ความดันที่สภาวะสมดุล

ค่าพื้นที่ผิวจะได้จากความสัมพันธ์ของสมการ ที่ 2.10

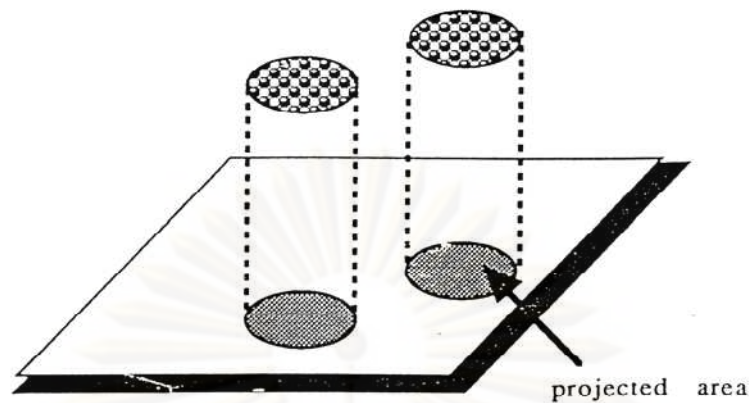
$$S = V_m L \sigma \quad (2.10)$$

เมื่อ S คือ พื้นที่ผิว (m²/g)

L คือ เลขอาโวกาโดร (ประมาณ 6.02×10^{23})

σ คือ พื้นที่ฉายเงาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ (m²/molecule) ดังแสดงใน

รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 พื้นที่ฉายเงาของโมเลกุลตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ [7]

การคำนวณพื้นที่ผิวโดยสมการ BET

เนื่องจากแรงในการเกิดการดูดซับทางกายภาพ จะคล้ายกับแรงในการเกิดการควบแน่น คือเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพ (ทั้งบนพื้นผิวแบนและบนพื้นผิวโค้ง) จึงไม่จำกัดเฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียว แต่สามารถเกิดต่อไปจนเป็นการดูดซับหลายชั้นได้

ทฤษฎีของ BET เป็นทฤษฎีที่ปรับปรุงมาจากทฤษฎีของแลงเมียร์ มีสมมติฐานคือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของตัวถูกดูดซับในชั้นที่สอง และชั้นต่อไป โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเกิดบนพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุน และจะใช้พลังงานการดูดซับ (heat of adsorption, ΔH_1) ส่วนชั้นการดูดซับชั้นที่สองขึ้นไป จะใช้พลังงานการควบแน่น (heat of liquefaction, ΔH_L)

สมการโดยทั่วไปของวิธี BET คือ

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (2.11)$$

เมื่อ P_0 คือ ความดันไออิ่มตัว

V_m คือ ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer capacity)

C คือ ค่าคงที่ ($C \approx \exp [(\Delta H_L - \Delta H_1) / (RT)]$)

เมื่อพลอต ค่า $\{P / [V(P_0 - P)]\}$ กับ P/P_0 จะได้เส้นตรง ความชัน $(C-1)/V_m C$ และตัดแกน $\{P / [V(P_0 - P)]\}$ ที่จุด $1/(V_m C)$ ซึ่งจะหา V_m ได้

จุดประสงค์หลักของสมการ BET คือ เพื่ออธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 2 นอกจากนี้ยังลดรูปลงเป็นสมการแลงเมียร์ได้ที่ความดันต่ำๆ และสามารถอธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 3 ได้ในกรณีที่การดูดซับชั้นแรก คายความร้อนน้อยกว่าการควบแน่น ($C < 1$) นั่นคือ

สามารถใช้คำนวณหาพื้นที่ผิวจากข้อมูลไอโซเทอมได้แม้ว่าการดูดซับในชั้นแรกจะเกิดได้ไม่สมบูรณ์

สมการ BET สามารถใช้กับตัวดูดซับที่มีรูพรุน ถ้าการดูดซับเกิดขึ้น n ชั้น (n สัมพันธ์กับขนาดของรูพรุน) จะได้ตั้งสมการ

$$V = \frac{V_m CX - (n+1)X^n + nX^{n+1}}{(1-X) + (C-1)X - CX^{n+1}} \quad (2.12)$$

เมื่อ $X = P/P_0$

สมการนี้เป็นรูปแบบทั่วไป ซึ่งจะลดรูปเป็นสมการแลงเมียร์ (Langmuir) เมื่อ $n = 1$ และสมการ BET เมื่อ $n = \infty$

วิธี BET เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในการคำนวณหาพื้นที่ผิว โดยใช้หลักการคำนวณเหมือนกับวิธีแลงเมียร์ แต่การคำนวณค่า V_m จะต่างกันโดยกราฟ BET จะเป็นการพลอต ระหว่างค่า $\{P/[V(P_0-P)]\}$ กับ P/P_0 ซึ่งมักจะได้เส้นตรงในช่วงความดันสัมพัทธ์ P/P_0 ระหว่าง 0.05 ถึง 0.35

ความชัน คือ $(C-1)/V_m C$

จุดตัด คือ $1/(V_m C)$

จากสมการของจุดตัดและความชัน จะได้

$$V_m = 1 / (\text{จุดตัด} + \text{ความชัน})$$

และจากค่า V_m ก็จะมาคำนวณหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างได้เช่นเดียวกับวิธีแลงเมียร์

ในความเป็นจริงการดูดซับทางกายภาพจะไม่มี การดูดซับในชั้นแรกเติมพื้นที่ผิวอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับผิวของแข็งไม่เท่ากับการดูดซับทางเคมี แต่สมการ BET ก็สามารถคำนวณค่าจำนวนโมเลกุลที่ใช้ในการปกคลุมพื้นที่ผิวของแข็งให้เต็ม 1 ชั้นได้ แม้ว่าการดูดซับในชั้นแรกอย่างเต็มพื้นที่ที่จะเกิดเฉพาะในการดูดซับทางเคมีเท่านั้น

2.2.7 การใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ [8]

ถ่านกัมมันต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสารที่เป็นก๊าซและของเหลวได้ ดังนั้นการประยุกต์ใช้กับก๊าซและไอ

- ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้

- อุตสาหกรรมปรับอากาศ ถ่านกัมมันต์จะกำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย เป็นต้น และช่วยกำจัดกลิ่นจากอากาศในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นลดน้อยลง

- ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และคายออกที่ความดันของไอต่ำๆ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การหมัก เป็นต้น

- กำจัดสารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ (organic sulfur compound) เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และสิ่งเจือปนอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรม

- ใช้ดูดซับกัมมันตภาพรังสีที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์สำหรับหน่วยปฏิบัติการให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในเบดของถ่านกัมมันต์ (activated carbon bed)

- ใช้แยกก๊าซโซลีน ออกจากก๊าซธรรมชาติ

- ใช้แยกเบนซอล (benzol) ออกจากก๊าซอุตสาหกรรม

- อุตสาหกรรมบุหรี ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นกั้นกรองบุหรี

การประยุกต์ใช้กับของเหลว

- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น

- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นและฟอกสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งวิธีนี้ดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่นๆ เพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร

- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้วยังใช้ในการแยกเอทานอลและเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย

- ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องตีแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ เช่น เอสเทอร์ ทำให้เครื่องตีมีรสชาติดีขึ้น

- ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในยาและเคมีภัณฑ์อื่นๆ เช่น สเตรปโตมัยซิน (streptomycin) คาเฟอีน (cafein) โซเดียมอะซิเตท (sodium acetate) รวมทั้งกรดต่างๆ

- ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic process) หรือเป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst carrier) เช่น ตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst support) สำหรับซิงค์อะซิเตทในโรงงานผลิตไวน์อะซิเตท

- อุตสาหกรรมการแยกสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ ด้วยวิธีไซยาไนด์ การแยกไอโอดีนออกจากน้ำเกลือที่เกิดในหลุมน้ำมัน ตลอดจนการผลิตวิตามินและฮอร์โมนอีกหลายชนิด

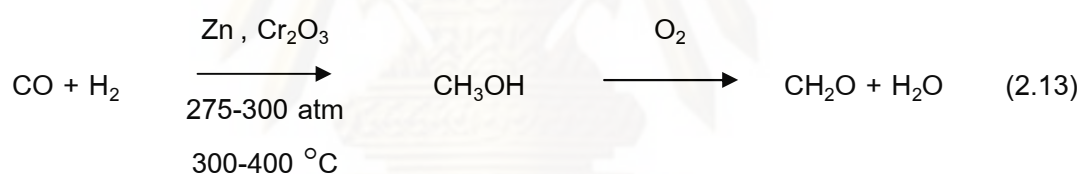
2.3 พอร์มาลดีไฮด์ [11]

พอร์มาลดีไฮด์ จัดเป็นวัตถุมีพิษและสารอันตรายที่มีคุณสมบัติเป็นสารก่อให้เกิดอันตรายจากไฟ และการระเบิด มีฤทธิ์กัดกร่อน เป็นสารพิษที่มีพิษในระดับค่อนข้างรุนแรง เป็นสารเคมีที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรม โดยแหล่งสำคัญที่แพร่กระจายพอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่บรรยากาศ คือ โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตและใช้พอร์มาลดีไฮด์ วัสดุก่อสร้างหรือวัสดุตกแต่งภายในอาคาร การเผาไหม้จากการสูบบุหรี่ และไอเสียจากยานพาหนะที่ใช้ น้ำมันดีเซล

2.3.1 ความเป็นมาของพอร์มาลดีไฮด์และการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

ศาสตราจารย์ Alexander Mikhailovich Butlerov ชาวรัสเซียเป็นผู้ค้นพบพอร์มาลดีไฮด์ ในปี ค.ศ. 1859 และอีก 9 ปีต่อมา ศาสตราจารย์ Hofmann August Wilhelm ชาวเยอรมัน เตรียมพอร์มาลดีไฮด์ได้โดยการออกซิไดซ์เมทานอลด้วยอากาศ โดยมี Pt เป็นสารเร่งปฏิกิริยา [12] ซึ่งเป็นจุดเริ่มแรกในการเตรียมพอร์มาลดีไฮด์ในเชิงอุตสาหกรรม

การผลิตพอร์มาลดีไฮด์เป็นอุตสาหกรรมได้เริ่มในปี ค.ศ. 1983 ในรูปของพอร์มาลีน ในกระบวนการผลิตนั้น จะใช้วิธีการออกซิไดซ์เมทานอลในอากาศที่มีสารเร่งปฏิกิริยาและใช้อุณหภูมิสูง ซึ่งเมทานอลที่นำมาผลิตพอร์มาลดีไฮด์นั้น สามารถเตรียมได้จากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ 2.13-2.15



พอร์มาลดีไฮด์ เป็นก๊าซไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ในทางการค้ามักอยู่ในรูปของสารละลายประกอบด้วย พอร์มาลดีไฮด์ ร้อยละ 37-50 โดยน้ำหนัก

คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของฟอร์มัลดีไฮด์

สูตรโครงสร้าง	:	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \diagdown \\ \text{C} = \text{O} \\ \diagup \\ \text{H} \end{array}$
สูตรโมเลกุล	:	CH ₂ O [HCHO]
น้ำหนักโมเลกุล	:	30.03
ความหนาแน่น	:	1
จุดหลอมเหลว (°C)	:	- 15
จุดเดือด (°C)	:	96
การระเบิด (vol %)	:	7-73
ความดันไอ	:	101.3 kPa ที่ -19 °C 52.6 kPa ที่ -33 °C
จุดวาบไฟ		
สูตร 37% (methanol free)	:	85 °C
สูตร 15% (methanol free)	:	50 °C
อุณหภูมิที่ติดไฟเอง	:	430 °C

2.3.2 การใช้งานด้านต่าง ๆ

ด้านอุตสาหกรรม

- 1) ในการผลิตเรซินและพลาสติก เช่น urea-formaldehyde melamine – formaldehyde, phenol-formaldehyde และอื่น ๆ
- 2) ในการสังเคราะห์ urotropine, propagyl alcohol ยา วัตถุระเบิดและสีต่าง ๆ เช่น สีคราม (indigo) สีแดง (rose mary) สีอะคริลิก (acrylic dyes) รวมถึงการฟอกหนังและสีตกแต่งอาหาร (dressing)
- 3) ในการย้อมเพื่อปรับปรุงให้สีและสีย้อมติดแน่นขึ้น
- 4) ในการฟอกสีและการพิมพ์ เช่น การเตรียม Rongalite, Heradite
- 5) ในอุตสาหกรรมกระดาษ เพื่อให้กระดาษลื่นและกันน้ำได้
- 6) ในการผสมโลหะ เพื่อระงับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 7) ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อผลิตผงที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำหนักและความแข็งแรงของไหมสังเคราะห์

ด้านการเกษตร

- 1) ใช้สำหรับการทำลายและการป้องกันจุลินทรีย์ในต้นไม้ที่เป็นโรค
- 2) ป้องกันผลิตผลเกษตรเกิดความเสียหายระหว่างการขนส่งและเก็บรักษา
- 3) ใช้ฆ่าเชื้อโรคในดินและใช้ทำปุ๋ย (urea formaldehyde)
- 4) ใช้ทำความสะอาดสถานที่เก็บอุปกรณ์ เช่น ลังไม้

ด้านการแพทย์

- 1) ใช้ในการดองศพ
- 2) ใช้ทำความสะอาดห้องผู้ป่วย เครื่องมือเครื่องใช้ในการเตรียม และสังเคราะห์

ผลิตภัณฑ์ยา วัคซีน เป็นต้น

เครื่องสำอาง

- 1) ใช้ในเครื่องสำอางเพื่อไม่ให้เหม็นออกมา
- 2) ใช้ในยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก สบู่ ครีมโกนหนวด เพื่อฆ่าเชื้อ
- 3) ใช้ในน้ำยาดับกลิ่นตัวและกลิ่นอื่นๆ

สำหรับประเทศไทยตั้งแต่ปีพ.ศ. 2544–2549 มีการนำเข้าฟอร์มัลดีไฮด์จาก ประเทศเยอรมัน อิตาลี ญี่ปุ่น สหราชอาณาจักร ออสเตรเลีย ไต้หวัน สเปน อินโดนีเซีย อินเดีย และสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีชื่อทางการค้าและบริษัทผู้ผลิตฟอร์มัลดีไฮด์ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 นอกจากนี้ประเทศไทยมีการนำเข้าฟอร์มัลดีไฮด์เข้ามาใช้ในประเทศแล้ว ประเทศไทยก็มีการผลิตและส่งออกฟอร์มัลดีไฮด์ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 แสดงชื่อทางการค้าและบริษัทผู้ผลิตฟอร์มัลดีไฮด์ [9]

ชื่อทางการค้า	บริษัทผู้ผลิต	ประเทศ
Magnus –MTD	Economic laboratory	U.S.A.
Jarnia Sanering	Jen Villadsens Fabriker	Denmark
Svatska Ohlssons	A/S	
Sanering Svatska		
Radar Sanerring		Sweden
Svatska	Kemanord AB.	
Agua-Kem Koncentrat		Germany
Weilbulls	Linde AG.	Sweden
Krusbarsformalin	Wei Bull AB, W.	

ตารางที่ 2.6 แสดงสถิติการนำเข้าและส่งออกฟอร์มาลดีไฮด์ของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2544–2549 [13]

ปี พ.ศ.	นำเข้า		ส่งออก	
	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (บาท)	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (บาท)
2544	875.74	10,686,210	178.11	2,022,685
2545	33.46	3,078,865	34.22	478,311
2546	34.75	4,444,321	218.01	2,555,525
2547	27.79	3,935,335	38.50	791,831
2548	38.42	4,445,755	43.22	872,122
2549	28.80	2,782,342	41.48	702,332

2.3.3 การเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารที่พบได้ง่ายในสิ่งแวดล้อมไม่ว่าในบ้าน ที่ทำงาน บริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น และบริเวณใกล้โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตและใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ ดังนั้นแหล่งกำเนิดที่สำคัญที่มีการแพร่กระจายฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่สิ่งแวดล้อม ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการผลิตและใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ เช่น โรงงานเรซิน โรงงานกระดาษ โรงงานอุตสาหกรรมเคมีต่าง ๆ ซึ่งจากการตรวจวัดอากาศจากโรงงานผลิตฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งปล่อยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ยังมีได้กำจัดออกจากปล่องสูง 18 เมตร ณ จุดที่ห่างจากโรงงาน 250–500 เมตร พบว่า ทุกตัวอย่างมีฟอร์มาลดีไฮด์เกินกว่า 0.035 mg/m³ (เกินกว่า 0.02 ppm) นอกจากนี้ยังมี โฟม พลาสติก ที่ใช้ฉนวน ในไม้อัดกาว (particle board) ที่ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ สำนักงานในปัจจุบัน ในกระดาษที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น กระดาษเช็ดมือ-เช็ดหน้า กระดาษห่ออาหารรวมทั้งถุงบรรจุของกระดาษไข (ที่ใช้รองอาหาร) สารทำความสะอาดในบ้านหลายชนิดมีฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารประกอบ ผลิตภัณฑ์ในอาคารหลายชนิดใช้ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน เช่น วัสดุเคลือบผิวพื้นกระดาษปิดผนัง แผ่นหลังของพรม เสื้อผ้าอัดกลีบถาวร พวกนี้ถูกเคลือบหรือพ่นด้วยยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เรซินทั้งนั้น แหล่งอื่นๆ ที่อาจปล่อยสารฟอร์มาลดีไฮด์ได้แก่ เชื้อเพลิงหุงต้ม เช่น ก๊าซหุงต้ม น้ำมันก๊าด และแม้แต่ควันบุหรี่และไอเสียจากรถยนต์ก็มีฟอร์มาลดีไฮด์เป็นส่วนประกอบ

2.3.4 ความเป็นพิษ

ความเป็นพิษต่อสัตว์ทดลอง

ฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นสารที่มีพิษปานกลาง มีค่าความเป็นพิษ LD₅₀ ต่อหนู ทางกระเพาะอาหารเท่ากับ 385 ± 28.72 mg/kg อาการที่เกิดจากความเป็นพิษอย่างเฉียบพลันของฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีต่อสัตว์ทดลอง เมื่อฉีดเข้าภายในกระเพาะอาหาร พบว่าหลังจากที่สัตว์ทดลอง

ได้รับสารเข้าไปจะแสดงอาการตื่นตระหนก ตามด้วยอาการง่วงซึม อ่อนเพลีย หายใจขัด และจะเสียชีวิตภายใน 2-3 ชั่วโมงแรกที่ได้รับสาร

ในกรณีของความเป็นพิษเรื้อรังเมื่อได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ที่ละน้อยแต่ใช้ระยะเวลา นาน จากการทดลองในสุนัขและกระต่ายที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณ 2-50 mg/kg เป็นระยะเวลา 129 วัน พบว่าสัตว์มีน้ำหนักลดลง จำนวนเม็ดเลือดแดงค่อย ๆ ลดลง และมีปริมาณฮีโมโกลบินต่ำลง ปัสสาวะจะมีโปรตีนและกรดฟอสฟอริก สัตว์ทดลองบางส่วนตายระหว่างการทดลอง และเมื่อนำซากมาตรวจ ก็พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิสภาพ (pathology) ของตับ ไต ลำไส้ตอนบน กระเพาะอาหาร และส่วนอื่นๆของทางเดินอาหาร

ความเป็นพิษต่อมนุษย์

เมื่อฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ในปริมาณความเข้มข้นสูงก็จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบการทำงานของร่างกายได้ เช่น ในกรณีของผู้ป่วยที่ดื่ม ฟอร์มาลีน 5% จำนวน 100 mL พบว่าหลังจากดื่มเข้าไปจะเกิดอาการอาเจียน จากนั้นเกิดการระคายเคืองทางเดินอาหารและกระเพาะอาหารตอนบน ผู้ป่วยจะเสียชีวิตภายใน 40 วันด้วยอาการเลือดออกในกระเพาะอาหารและลำไส้

สำหรับผลต่อสุขภาพของคณงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ในกระบวนการผลิตพบว่า จากการตรวจสุขภาพคณงานจำนวน 278 คน ที่ทำงานในโรงงานไม้ติดกาวไม้อัดที่ใช้เรซินหรือกาวชนิดคาร์บาไมด์-ฟอร์มาลดีไฮด์ (cabamide-formaldehyde) พบว่าคณงานจำนวน 129 คน เป็นโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ การเกิดโรคนั้นสืบเนื่องมาจากการหายใจเอาไอของฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้นประมาณ 5 mg/kg เข้าไป นอกจากนี้ในการตรวจสุขภาพคณงานหญิงอายุ 25-40 ปี ในโรงงานย้อมที่ใช้ฟอร์มาลีน ทำงานประมาณ 5-10 ปี พบว่าคณงานเหล่านี้มักมีอาการปวดหัว ทรงตัวลำบาก ระคายเคืองง่าย และน้ำตาไหลเป็นประจำ ซึ่งอาการเหล่านี้มีสาเหตุมาจากการได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในบรรยากาศ โดยตรวจวัดความเข้มข้นได้ประมาณ 5-78 mg/m³

โรคจากพิษฟอร์มาลดีไฮด์

สาเหตุ เกิดจากการสัมผัสฟอร์มาลดีไฮด์ในงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้ได้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตเรซิน แอลกอฮอล์ กรด และใช้ในอุตสาหกรรมยาง ฟอกหนัง กระดาษ ยา สีย้อม เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในด้านเกษตรกรรมต่างๆ อีกด้วย

อาการและอาการแสดง พิษของฟอร์มาลดีไฮด์ที่สำคัญ ได้แก่

1. การระคายเคืองต่อผิวหนัง ตา และเยื่อเมือกในทางเดินหายใจ
2. การเกิดความรู้สึกไวเกิน เกิดจากการสัมผัสฟอร์มาลดีไฮด์ในรูปของเหลว
3. การสลบ
4. การเกิดอาการอื่นๆ เช่น คลื่นไส้ อาเจียน ปวดศีรษะ และอ่อนเพลีย

สำหรับอาการสลดนั้นพบได้ยาก เนื่องจากจะเกิดอาการระคายเคืองหรืออาการอื่นมาก่อน จึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการสัมผัสที่ความเข้มข้นสูงมากเกินไปจนถึงกับทำให้สลดได้

ระดับความเป็นพิษของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ เป็นดังนี้	
ความเข้มข้น 1 ppm	สามารถทำให้ได้กลิ่น
ความเข้มข้น 2-3 ppm	จะทำให้เกิดความรู้สึกไม่สบายได้ โดยเฉพาะที่ลำคอ และมีน้ำตาไหล
ความเข้มข้น 4-5 ppm	จะทำให้เกิดอาการน้ำลาย (จำนวนเล็กน้อย) ไหลไม่หยุด
ความเข้มข้น 10 ppm	จะทำให้เกิดอาการน้ำลาย (จำนวนมาก) ไหลไม่หยุด
ความเข้มข้นระหว่าง 10-20 ppm	จะทำให้หายใจลำบาก จมูกและคอแสบร้อน และอาการแสบร้อนนี้จะขยายไปถึงหลอดลม พร้อมกับมีอาการไอได้
ความเข้มข้น 50-100 ppm (ในระหว่าง 5-10 นาที)	จะทำให้เกิดการเจ็บป่วยอย่างรุนแรงได้

ผู้ที่สัมผัสฟอร์มาลดีไฮด์ที่ผิวหนังจะเกิดอาการต่างๆกัน ได้แก่

1) อาการเฉียบพลัน จะเกิดอาการผิวหนังอักเสบเป็นผื่นแดง อาจเป็นตุ่มพอง ตกสะเก็ด และแสบคันทันทีที่สัมผัส และจะเกิดขึ้นที่ใบหน้า คอ อวัยวะ ข้อพับของแขน เปลือกตา เป็นต้น

2) อาการเรื้อรัง เกิดขึ้นหลังจากที่สัมผัสระยะเวลาหลายปี โดยจะเริ่มเป็นจากปลายนิ้วมือ หลังมือ ข้อมือ ท้องแขน และส่วนของร่างกายซึ่งเสียดสีกับเสื้อผ้า

การรักษา โดยทั่วไปรักษาตามอาการ แบ่งได้เป็น

1) ผู้ป่วยที่ได้รับพิษอย่างเฉียบพลันจากการหายใจ

- ให้นำผู้ป่วยออกมารับอากาศบริสุทธิ์และให้สูดไอน้ำจากน้ำที่เติมแอมโมเนีย
- ให้ออกซิเจน ยาบำรุงหัวใจ ยากระตุ้นการหายใจ และยาระงับประสาทตามความจำเป็น

2) ผู้ป่วยที่มีการระคายเคืองของทางเดินหายใจ ควรให้ mucosa alkalin หรือ oil inhalations

3) ผู้ป่วยที่หลอดคอและหลอดลมปอดอักเสบอย่างเฉียบพลันและรุนแรงให้ oil solution ที่ประกอบด้วย menthol หรือ camphor 5%

4) ผู้ป่วยที่ไออย่างรุนแรง ให้ยาประเภท codeine, libexine หรือ dionnine

5) ผู้ป่วยที่เกิดระคายเคืองตา ล้างด้วยน้ำเกลือ หรือน้ำสะอาด ผู้ป่วยที่กินฟอร์มาลดีไฮด์เข้าไป ให้ล้างท้องด้วย ammonium carbonate หรือ sodium carbonate หรือ acetate solution 3% ไซดีบ น้ำ น้ำนม หรือยาถ่ายชนิด saline

6) ผู้ที่สัมผัสฟอร์มาลดีไฮด์ทางผิวหนัง ให้ล้างออกทันทีด้วยน้ำสะอาดหรือน้ำยาแอมโมเนีย 5%

2.3.5 การกำหนดค่ามาตรฐานของฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ

เนื่องจากการได้สัมผัสฟอร์มาลดีไฮด์นั้น ส่งผลกระทบต่อสุขภาพค่อนข้างรุนแรง จึงทำให้มีหลายองค์กรที่ทำการศึกษาและกำหนดมาตรฐานปริมาณการได้รับสัมผัสขึ้นมา โดยกำหนดค่ามาตรฐานเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงาน (TWA) และค่ามาตรฐานสารเคมีในระยะเวลาอันสั้น (STEL) ซึ่งแสดงรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงค่ามาตรฐานปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ

องค์กรที่กำหนดมาตรฐาน	TWA (8-hr)		STEL (15 min)	
	(Time –weighted average)		(Short-term exposure limit)	
	mg/m ³	ppm	mg/m ³	ppm
OSHA (Occupational Safety and Health Administration), U.S.A.	0.84	0.56	2.40	1.60
NIOSH (Nation Institute for Occupational Safety and Health), U.S.A.	0.024	0.016	0.15	0.10
ACGIH (American Conference of Government Industrial Hygienists)	1.37	0.91	–	–
ตามประกาศกระทรวงมหาดไทย 30 พ.ค. 2520	–	3	–	10

นอกจากนี้ยังมีค่ามาตรฐานปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศของประเทศสหภาพแห่งสาธารณรัฐสังคมนิยมโซเวียต ได้กำหนดค่ามาตรฐานไว้ดังนี้

- ปริมาณสูงสุดของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ยอมให้มีได้ในบรรยากาศการทำงานเท่ากับ 0.5 mg/m³

- ปริมาณสูงสุดของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ยอมให้มีได้ในบริเวณที่อยู่อาศัย เมื่อได้รับครั้งหนึ่ง (maximum single) เท่ากับ 0.035 mg/m³ ปริมาณเฉลี่ยต่อวันที่ยอมให้มีในบริเวณที่อยู่อาศัยเท่ากับ 0.012 mg/m³

2.3.6 การควบคุม ป้องกันอันตราย และการจัดลำดับความเป็นอันตรายของฟอร์มาลดีไฮด์

การควบคุมและป้องกันอันตรายจากฟอร์มาลดีไฮด์ มีขั้นตอนดังนี้

1. การตระหนักและการประเมินถึงอันตรายจากฟอร์มาลดีไฮด์
2. การจัดลำดับความเป็นอันตรายของฟอร์มาลดีไฮด์
3. การเตรียมข้อมูลเพื่อการตัดสินใจสั่งการของผู้บริหาร
4. การดำเนินการควบคุม ป้องกัน และการเฝ้าระวังอันตรายจากฟอร์มาลดีไฮด์
5. การประเมินผลการควบคุมและการป้องกันอันตรายจากฟอร์มาลดีไฮด์

ฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นสารเคมีที่มีอันตรายซึ่งในการจัดลำดับความสำคัญของอันตรายจากสารเคมีต้องพิจารณาถึงปัจจัย 2 ประการคือ

1. ความรุนแรงของอันตรายที่เกิดหรืออาจเกิดขึ้น หมายถึง อันตรายที่เกิดหรืออาจเกิดขึ้นนั้น ก่อให้เกิดหรืออาจจะให้เกิดผลที่มีความรุนแรงเพียงใด หรือสารเคมีนั้นๆ มีความเป็นพิษรุนแรงมากน้อยเพียงใด ในการพิจารณาความรุนแรงขึ้นอยู่กับข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งระดับความรุนแรงของอันตรายแบ่งได้ดังนี้

ระดับ ความรุนแรง

- 1 เป็นอันตรายที่ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างใหญ่หลวง เป็นอันตรายที่ใกล้จะเกิดขึ้น อันตรายอันนั้นหากเกิดขึ้นกับคนหลายคนความเจ็บป่วยที่เกิดขึ้นจะแพร่กระจายไปกว้างขวาง ทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตสินมาก
- 2 เป็นอันตรายขั้นวิกฤต อันตรายอันนั้นหากเกิดขึ้นจะก่อให้เกิดการบาดเจ็บที่รุนแรงหรือการเจ็บป่วยอย่างสาหัส ทรัพย์สินและอุปกรณ์เสียหาย
- 3 เป็นอันตรายขั้นธรรมดา อันตรายนั้นหากเกิดขึ้นสามารถทำให้เกิดการเจ็บป่วย อุปกรณ์เสียหาย แต่การบาดเจ็บ การเจ็บป่วยและการเสียหายของอุปกรณ์นั้นไม่รุนแรง
- 4 เป็นอันตรายขั้นเล็กน้อย อันตรายอันนั้นหากเกิดขึ้น จะไม่ก่อให้เกิดการบาดเจ็บหรือเจ็บป่วยที่รุนแรง ทรัพย์สินไม่เกิดความเสียหาย

2. ความเป็นไปได้หรือโอกาสที่จะเกิดอันตรายนั้น หมายถึง จากสถานการณ์ที่เป็นอยู่จะมีความเป็นไปได้หรือมีโอกาสมากน้อยเพียงใดที่จะเกิดอันตราย ในการพิจารณาความเป็นไปได้นี้ จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเพื่อการตัดสินใจ ซึ่งระดับความเป็นไปได้หรือโอกาสของการเกิดอันตรายแบ่งได้ดังนี้

ระดับ ความเป็นไปได้หรือโอกาสของการเกิดอันตราย

- A ความเป็นไปได้มากที่จะเกิดอันตรายขึ้นมีแนวโน้มว่าจะเกิดขึ้นทันทีทันใด และเกิดขึ้นภายในเวลาอันสั้น
- B ความเป็นไปได้ที่จะเกิดอันตรายขึ้นและเป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้นในเวลาใดเวลาหนึ่ง
- C ความเป็นไปได้น้อยที่จะเกิดอันตรายขึ้นโดยอาจจะเกิดขึ้นในเวลาใดเวลาหนึ่ง
- D ความเป็นไปได้น้อยมากที่จะเกิดอันตรายขึ้น ไม่ค่อยเกิดขึ้น

สำหรับฟอร์มัลดีไฮด์นั้นจัดอยู่ในระดับความรุนแรงของอันตราย เท่ากับ 1 และมีระดับความเป็นไปได้หรือโอกาสของการเกิดอันตรายเท่ากับ A ดังนั้นอันตรายจากฟอร์มัลดีไฮด์มีลำดับความสำคัญของอันตรายเท่ากับ 1-A

ประเทศไทยมีการควบคุมการใช้ โดยกำหนดให้มี พ.ร.บ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ขึ้นมา โดย พ.ร.บ. ดังกล่าวกำหนดวัตถุอันตรายออกเป็น 4 ประเภท คือ

(1) วัตถุอันตรายชนิดที่ 1 ได้แก่ วัตถุอันตรายที่การผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครองต้องปฏิบัติตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กำหนด

(2) วัตถุอันตรายชนิดที่ 2 ได้แก่ วัตถุอันตรายที่การผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครองต้องแจ้งให้พนักงานเจ้าหน้าที่ทราบก่อนและต้องปฏิบัติตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กำหนดด้วย

(3) วัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ได้แก่ วัตถุอันตรายที่การผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครองต้องได้รับใบอนุญาต

(4) วัตถุอันตรายชนิดที่ 4 ได้แก่ วัตถุอันตรายที่ห้ามมิให้มีการผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครอง

สำหรับฟอร์มัลดีไฮด์ จัดอยู่ในประเภทที่ 2 คือเป็น วัตถุอันตรายที่การผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครองต้องแจ้งให้พนักงานเจ้าหน้าที่ทราบก่อนและต้องปฏิบัติตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กำหนด โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมและกรมประมง

2.3.7 การตรวจวัดและวิเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศ

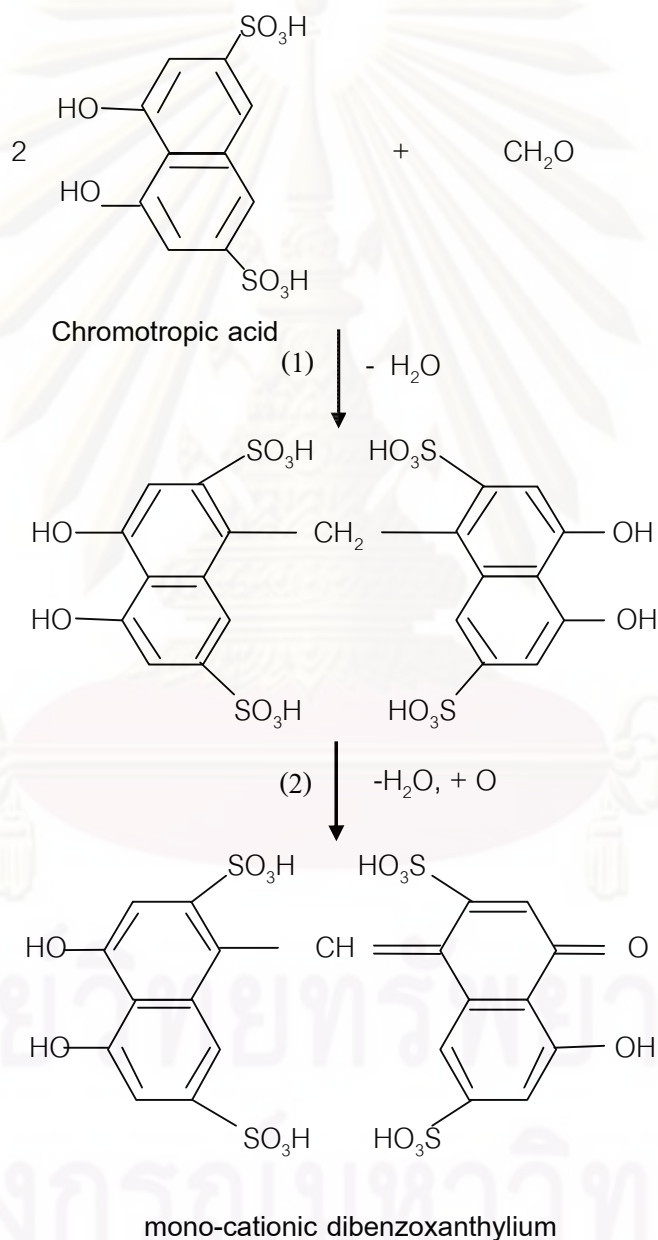
ส่วนใหญ่วิธีการตรวจวัดฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศอยู่บนพื้นฐานการวัดแบบ Photometric และรูปแบบของการเก็บตัวอย่างขึ้นอยู่กับตัวกลางที่จะใช้ในการตรวจวัดระดับความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศ ซึ่งวิธีการเก็บตัวอย่าง และการตรวจวัดฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศได้ สรุปไว้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงวิธีการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างของฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศ [14]

วิธีการ	การเก็บตัวอย่าง	การวิเคราะห์	สิ่งรบกวน
Chromotropic acid :NIOSH 3500	midget impinger	spectrophotometry	phenol, other organic substances
Paraosaniline (original)	midget impinger	spectrophotometry	sulful dioxide
Paraosaniline (modified)	midget impinger	spectrophotometry	sulful dioxide
Parasaniline (TGM-555)	continuous	colorimetric	sulful dioxide
MBTH	absorber	spectrophotometry	
Acetylacetone spectrophotometric	midget impinger	spectrophotometry	other aldehydes, amines, sulful dioxide
Acetylacetone fluorimetric	midget impinger	fluorimetry	other aldehydes, amines, sulful dioxide
2,4-DNPH aqueous ethanol	midget impinger	HPLC	acetaldehyde
2,4-DNPH adsorbent	adsorbent tube	HPLC	acetaldehyde
NIOSH 3501	midget impinger	polarography	other aldehydes
OSHA acidic hydrazine	midget impinger	polarography	acetaldehyde
NIOSH 2502	reactive adsorbent	gas chromatography	
Passive monoitor (3M, DuPont)	reactive adsorbent	spectrophotometry	
Air Quality Research	reactive adsorbent	spectrophotometry	
Envirotech	moist adsorbent	spectrophotometry	other aldehydes

2.3.8 หลักการวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ตามวิธีของ NIOSH Manual of Analytical Methods 3500 [15]

ในการวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ ตามวิธีของ NIOSH Methods 3500 นั้น นำ chromotropic acid ($(\text{HO})_2\text{C}_{10}\text{H}_4(\text{SO}_3\text{H})_2$) มาทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (strong media) ของปฏิกิริยา เกิดเป็น mono-cationic dibenzoxanthylium ในรูปของสารละลายสีม่วง ดังรูปที่ 2.11 จากนั้นนำไปวัดปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์โดยการวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 nm



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง chromotropic acid กับ ฟอร์มาลดีไฮด์ [16]

2.4 แกลบ (rice husk) [17–21]

แกลบ เป็นผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว เป็นส่วนเปลือกของข้าวสาร ซึ่งในข้าวเปลือกจะมีแกลบอยู่ประมาณ 22.5–25.2% โดยน้ำหนัก จึงทำให้ปริมาณของแกลบจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของข้าวเปลือก แกลบส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นรูปทรงรีเมื่อยาว สีเหลืองอมน้ำตาล หรือเหลืองนวลแล้วแต่ภูมิภาคที่มีการปลูกข้าว มีความยาวในช่วง 6–10 mm เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2–2.5 mm ความหนาของผนังเซลล์ประมาณ 0.1 mm และมีความหนาแน่นโดยประมาณ 0.148 g/cm³ แกลบมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส ลิกนิน ซิลิกา และธาตุต่างๆ ซึ่งจะมีปริมาณที่แตกต่างกันไปขึ้นกับสภาพแวดล้อมแต่ละท้องถิ่น เช่น ดิน น้ำ และอากาศ

เนื่องจากแกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่หาง่ายและมีราคาถูก จึงได้มีการนำแกลบไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น นำไปใช้ปรับปรุงดิน ทำให้ดินร่วนซุย ช่วยให้ดินอุ้มน้ำได้ดี ใช้ทำเป็นปุ๋ยหมัก นำไปเทรองพื้นในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เพื่อไม่ให้พื้นชื้นแฉะและมีกลิ่นเหม็น ใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ นำไปผสมกับดินเหนียวทำเป็นอิฐ นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนถ่านไม้ได้ โดยแกลบจะให้พลังงานความร้อนประมาณ 3,800 kcal/kg ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านไม้ที่ให้พลังงานร้อนประมาณ 4,500–5,000 kcal/kg ในปัจจุบันได้นำแกลบไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องจักรไอน้ำเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า ผลพลอยได้จากการเผาแกลบคือ ถ้ำแกลบ (rice husk ash) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นต่าง ถ้ำแกลบที่เผาได้จะมีลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสภาวะที่เผา คือ การเผาแกลบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 °C ในสภาวะไร้อากาศ จะได้ถ้ำแกลบสีดำ ซึ่งประกอบไปด้วยซิลิกาและคาร์บอน ส่วนการเผาแกลบที่อุณหภูมิสูงและมีอากาศเพียงพอ จะได้ถ้ำแกลบสีขาว เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำแกลบสีขาวพบว่า มีปริมาณซิลิกา (SiO₂) อยู่ถึง 86.9 – 97.3% ซิลิกาที่ได้จากแกลบสามารถนำไปใช้เตรียมสารเคมีอื่นๆได้ เช่น ใช้เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งใช้ในการผลิตผงซักฟอกและสบู่ ใช้เคลือบกระดาษ ผลิตแก้ว และเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ ใช้เตรียมซิลิโคนใช้เป็นสารกึ่งตัวนำและเซลล์สุริยะ ใช้เตรียมซิลิโคนไนไตรด์ เป็นวัสดุแทนโลหะที่ใช้ในการผลิตเครื่องยนต์ดีเซลและยังใช้เตรียมซิลิกาเจลได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้แกลบและถ้ำแกลบเป็นวัตถุดิบอีกมากมาย เช่น ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารมลพิษในน้ำเสีย เช่น ดูดซับโครเมียม (Cr⁶⁺), สารประกอบฟีนอลิก, ดูดซับตะกั่วและปรอท เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ประสิทธิภาพสูงสำหรับเซลล์แบตเตอรี่ ใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลงานงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากแกลบ ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากแกลบทั้งในประเทศและต่างประเทศ [18, 22–30]

ปี	ผู้วิจัย	กระบวนการ						สมบัติ	
		ทำให้เป็นถ่าน			การกระตุ้น			ของถ่านกัมมันต์	
		อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	สารกระตุ้น	อัตราส่วน สาร : แกลบ (w/w)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	พื้นที่ผิว (m ² /g)	I ₂ No. (mg/g)
ผลงานวิจัยในประเทศ									
2541	รัตนา และ สุนันทา	-	-	-	-	1000	240	59	-
2545	สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม	400	30	ไอน้ำ NaOH	-	700	60	421	-
2548	จักรพงษ์ และ ณีฎฐกิตติ์	-	-	ZnCl ₂	1 : 1	900	-	342	
2550	ศิริภาค สุขใจมิตร	-	-	NaOH	1 : 1	550	360	179	
2551	เกศศิริ เหล่าวัชรสุวรรณ	400	60	H ₃ PO ₄	1 : 1	600	60		886
ผลงานวิจัยในต่างประเทศ									
2000	Yalcin และ Sevinc	-	-	10% ZnCl ₂ /CO ₂		600	180/60	480	
				30%FeSO ₄ /CO ₂		600	180/60	168	
2002	Guo และคณะ	350-500	-	KOH	4 : 1	800	30	3014	
				NaOH	3 : 1	750	90	2820	
2007	Guo และคณะ			H ₃ PO ₄ 30%	3 : 2	450		1295	
2008	Kalderis และคณะ	-	-	ZnCl ₂	1 : 1	700	30	750	
				H ₃ PO ₄	1 : 0.75	700	30	173	
				NaOH	1 : 0.5–1	700	30	< 10	
2009	Liou และ Wu	-	-	H ₃ PO ₄	1 : 2	500	60	1741	
				ZnCl ₂	1 : 2	500	60	2434	

Rong และคณะ [31] ศึกษาผลของการออกซิไดซ์ด้วยอากาศในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ บนถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใยเรยอน โดยทำการออกซิไดซ์ด้วยอากาศปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในช่วง 350–450 °C และใช้เวลา 1–3 ชั่วโมง และทำการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใยธรรมชาติ จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เช่น ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดของรูพรุน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เกาะที่ผิวถ่าน พบว่า ไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ เป็นแบบที่ 1 ตามข้อเสนอของ Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT) ถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใยเรยอนจะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใยธรรมชาติ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์สูงกว่า โดยถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใยเรยอนที่ทำการออกซิไดซ์ด้วยอากาศที่อุณหภูมิ 420 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีพื้นที่ผิวสูงถึง 1635 m²/g และยังพบหมู่ carboxylic acid เกาะอยู่ที่ผิวคาร์บอน ซึ่งสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจนได้ จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้สามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ได้ดีถึง 771.6 mL/g ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใยธรรมชาติสามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ได้เพียง 196.5 mL/g

Rong และคณะ [32] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใยเรยอนโดยนำไปเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการความร้อน 2 K/นาที่ ในช่วงอุณหภูมิ 550–950 °C และนำไปดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ พบว่า อุณหภูมิในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์แปรผันตรงกับความสามารถในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ และถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง พบว่ามี Breakthrough time มาก

Boonamnuayvitaya และคณะ [33] ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟสำหรับดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ ทำการแปรผันตัวกระตุ้นด้วย ไอน้ำคาร์บอนไดออกไซด์ และ ซิงค์คลอไรด์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์มีพื้นที่ผิว 470 ± 12 m²/g และพบหมู่ฟังก์ชันเป็นสารมีขั้วที่ผิวรูพรุน ทำให้สามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์สูงสุดถึง 245 mL/g ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ จะมีพื้นที่ผิวสูงสุดถึง 914 ± 21 m²/g แต่พบหมู่ฟังก์ชันเป็นพวกไม่มีขั้ว จึงมีความสามารถในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ได้เพียง 130 mL/g ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ดังนั้นแสดงว่าการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์จึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีมากกว่าลักษณะพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน

Kumagai และคณะ [34] ศึกษาการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์และอะซีทัลดีไฮด์ด้วยตัวดูดซับที่ได้จากแกลบ โดยนำแกลบมาทำให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 250, 400, 600 และ 800 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 500–700 mL/min เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง และนำแกลบอีกส่วนมากกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหล 500–700 mL/min ที่อุณหภูมิ 875°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์

และไอระเหยของอะซีทัลดีไฮด์ที่อยู่ในถุงตัวอย่างที่ทำจากพอลิไวนิล ฟลูออไรด์ฟิล์ม โดยจะบรรจุไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ ความเข้มข้น 1.0 ppm และบรรจุไอระเหยอะซีทัลดีไฮด์ความเข้มข้น 100 ppm ไว้อย่างละ 200 mL โดยมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ <1% ที่อุณหภูมิ 22–24 °C ทำวัดความเข้มข้นของไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ด้วย Kitagawa formaldehyde detection tubes, Japan และวัดความเข้มข้นของไอระเหยอะซีทัลดีไฮด์ด้วย Gastec acetaldehyde detection tubes, Japan พบว่า แกลบที่ทำให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 600°C จะมีพื้นที่ผิวสูงสุด 166 m²/g ส่วนแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 875°C จะมีพื้นที่ผิวสูง 466 m²/g ในขั้นตอนการดูดซับไอระเหยจะเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวที่มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1119 m²/g จากการทดลองพบว่า แกลบที่ถูกกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 875°C สามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์และไอระเหยอะซีทัลดีไฮด์ในถุงตัวอย่างได้เร็วที่สุด และตัวดูดซับที่ได้จากแกลบมีอัตราการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว

Jing และคณะ [35] ศึกษาผลของค่าความชื้นสัมพัทธ์ในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกอิมเพรกเนชันด้วยสารละลาย organosilane/methanol พบว่า ค่าความชื้นสัมพัทธ์แปรผกผันการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ และผิวของถ่านกัมมันต์ที่ถูกอิมเพรกเนชันด้วยสารละลาย organosilane/methanol จะทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ได้ดี และให้ breakthrough time นานกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ถูกอิมเพรกเนชัน

ดังนั้น จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ คือ ชนิดและโครงสร้างของวัสดุดิบ วิธีการกระตุ้น เช่น วิธีทางกายภาพและทางเคมี อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัสดุดิบ อุณหภูมิในการกระตุ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น อัตราการให้ความร้อน รวมไปถึงตัวกลางที่ใช้ในการกระตุ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอระเหยสารอินทรีย์ คือ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ เช่น พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ผิวคาร์บอน รวมไปถึงอุณหภูมิ ความชื้น อัตราการไหล และปริมาณของสารอินทรีย์

บทที่ 3

เครื่องมือ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทำถ่านกัมมันต์

- ภาชนะดินเผา พร้อมฝาปิด
- ตู้อบความร้อน : Model UE/BE 200–800, Memmert, Germany.
- เตาเผา (multiple furnace) : Model L9/12/P320, Nabertherm, Germany.
- ชุดกรองสูญญากาศ : Model A-350, Eyela, Japan.
- ตะแกรงร่อนมาตรฐานคัดขนาดเบอร์ 100 และ 325 mesh
- อุปกรณ์ล้างถ่านกัมมันต์
- ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว,

CGC-11, Bangkok Science Center, Thailand.

3.1.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ

- เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง : Model BP 211D, Sartorius, Germany.
- เครื่องชั่งแบบละเอียด 2 ตำแหน่ง : Model BJ 1000C, Switzerland.
- เครื่อง pH Meter : Model Seven Easy pH Meter-Toledo, Mettler Toledo,

Switzerland.

- กระดาษกรอง No.1, Whatman

- โถดูดความชื้น (desiccator)

- พาราฟิล์ม Whatman

- ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

- เครื่อง Elemental Analyzer (CHNS/O Analyzer) : Model PE2400 Series II,

Perkin Elmer, United States of America.

- เครื่องวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย: Model BET–SORP

MINI, BEL, Japan.

- เครื่อง Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive

Spectrometer (SEM-EDS) : Model JSM-6400, JEOL, Japan.

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

- เครื่อง Ultrasonic cleaner : Model E30H, Elma, Germany.

- เครื่อง UV-Vis Spectrometer : Model UVA 150318 Type Helios Alpha,

Thermo, England. พร้อมคิวเวตต์

3.1.5 อุปกรณ์สำหรับใช้ในการศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ในระบบคอลัมน์

- คอลัมน์ทำด้วยแก้วรูปตัวยู (U) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.5 cm สูง 10 cm พร้อมชุดข้อต่อเชื่อมเข้ากับสายยางซิลิโคน
- สายยางซิลิโคนและสายรัด
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ: Digital Water bath SB-651, EYELA, Japan.
- มาตรวัดอัตราไหลแบบฟองสบู่ (Soap film flow meter) : HEWLETT-PACKARD 100 mL
- นาฬิกาจับเวลา
- วาล์วควบคุมความดันแก๊ส
- แก๊สไนโตรเจน (Commercial grade)
- เทอร์โมมิเตอร์
- ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL และจุกยางเจาะรู 2 รู พร้อมหลอดนำแก๊ส
- พาราฟิล์ม Whatman และสำลี

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ

ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์

นำแกลบมาล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออก จากนั้นนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ แบ่งเป็น 2 กระบวนการดังนี้

1. กระบวนการทำให้เป็นถ่าน (carbonization) ทำการเผาแกลบให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. กระบวนการกระตุ้น (activation) ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น โดยนำถ่านแกลบที่เผาได้ไปกระตุ้นด้วย NaOH H₃PO₄ และ ZnCl₂ ตามลำดับ ด้วยอัตราส่วนน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ (w/w) เป็น 1:1 และ 2:1 โดยนำไปแช่ในสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105–110 °C จากนั้นนำไปบรรจุในภาชนะดินเผาและปิดฝาเพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยาการสันดาปในขณะที่เผาทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 350 และ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปทำการล้างสารเคมีออกโดยถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH และล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง และล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ให้ล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง ล้างด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง และสารละลาย HCl เจือจาง 5% ส่วนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H₃PO₄ ให้ล้างสารเคมีด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง จนกระทั่งน้ำล้างถ่านมีสภาพเป็นกลางหรือมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5–7.5 แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110–120 °C แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด ด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐานคัด

ขนาดเบอร์ 100 mesh แล้วอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านไปเก็บใส่ขวดนำไปไว้ในโถดูดความชื้น ถ่านกัมมันต์ที่อบแห้งแล้ว นำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน นัมเบอร์ (Iodine Number) ด้วยวิธีการมาตรฐานของ ASTM D 4607–86 เพื่อหาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบที่เหมาะสมวิธีการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ก



รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ

3.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ (Commercial Activated Carbon)

- วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน โดยใช้เครื่อง Elemental Analyzer (EA)

- ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ โดยใช้เครื่อง BET – SORP MINI

- ศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS)

3.2.3 ศึกษาอุณหภูมิและตัวกระตุ้นที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

ขั้นตอนการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านกัมมันต์

ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แต่ละชนิดประมาณ 0.05 g เเทลงบนตะแกรงขนาดมาตรฐานเบอร์ 325 mesh ขนาด 5x3 cm โดยที่ถ่านกัมมันต์ไม่สามารถทะลุรูของตะแกรงไปได้ แล้วนำถ่านกัมมันต์ไปวางในภาชนะดูดความชื้นที่บรรจุสารละลาย 37% formaldehyde 200 mL และปิดผนึกอย่างมิดชิดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ถ่านกัมมันต์ดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ถูกดูดซับผสมกับน้ำ deionized 18 M Ω ปริมาตร 500 mL และนำไปผ่านเครื่อง ultrasonic cleaner เป็นเวลา 30 นาที เพื่อสกัดไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้ออกมา แล้วนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง No.1 สารละลายตัวอย่างที่กรองได้จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านกัมมันต์

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ ตามวิธีของ NIOSH Manual of Analytical Methods 3500, 1994 [15]

เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ ด้วยวิธี Spectroscopy โดยการนำสารละลายตัวอย่างมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย chromotropic acid จะได้สารละลายที่มีสีม่วง จากนั้นนำไปวัดการดูดกลืนแสงในช่วง visible แล้วนำค่า absorbance ที่ได้ไปหาค่าความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐาน โดยใช้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ที่หาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลาย Na_2SO_3 1.13 M, H_2SO_4 0.02 N และ NaOH 0.01 N

สารเคมีที่ใช้

1. chromotropic acid (4,5-dihydroxy-2,7-naphthalene disulfonic acid disodium salt) (Sigma-Aldrich) 1% เก็บในขวดสีน้ำตาลและเตรียมใหม่ทุกสัปดาห์
2. H_2SO_4 96%
3. formaldehyde stock solution 1 mg/mL
4. formalin solution 37%, (Ajax)
5. H_2SO_4 0.02 N
6. NaOH 0.01 N
7. Na_2SO_3 1.13 M (เตรียมใหม่ทุกครั้งที่ใช้)
8. NaHSO_3 1% (เตรียมใหม่ทุกสัปดาห์)

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์

1. เตรียม formaldehyde stock solution 1 mg/mL
 ปิเปต 37% formalin solution จำนวน 2.7 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 mL เจือจางด้วยน้ำ deionized 18 M Ω จนมีปริมาตรเป็น 1000 mL สารละลายที่ได้สามารถเก็บได้นาน 3 เดือน

2. การปรับเทียบมาตรฐานสารละลาย formaldehyde 1 mg/mL
 (Standardization of formaldehyde stock solution)

2.1 ปิเปตสารละลาย Na_2SO_3 1.13 M มา 5 mL ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 mL จากนั้นคนด้วยแท่งแม่เหล็ก

2.2 ปรับ pH ให้อยู่ระหว่าง 8.5-10 ด้วยกรดหรือเบส แล้วบันทึกค่า pH

2.3 เติม formaldehyde stock solution จำนวน 10 mL จะได้สารละลายที่มีค่า pH ประมาณ 11

2.4 ไทเทรตสารละลายให้กลับมาอยู่ที่ค่า pH ในข้อ 2.2 ด้วย H_2SO_4 0.02 N บันทึกปริมาตรกรดที่ใช้ (หากค่า end point pH เกิน ให้ไทเทรตกลับด้วย NaOH 0.01 N แล้วบันทึกปริมาณเบสที่ใช้)

2.5 คำนวณความเข้มข้นของ formaldehyde stock solution, C_s (mg/mL) จากสูตร

$$C_s = \frac{30.0 (N_a \cdot V_a - N_b \cdot V_b)}{V_s}$$

เมื่อ 30.0 = 30.0 g/equivalent of formaldehyde

N_a = นอร์มอลลิตีของ H_2SO_4 (0.02 N)

V_a = ปริมาณของ H_2SO_4 ที่ใช้ไทเทรต (mL)

N_b = นอร์มอลลิตีของ NaOH (0.01 N)

V_b = ปริมาณของ NaOH ที่ใช้ไทเทรตกลับ (mL)

V_s = ปริมาณของ formaldehyde stock solution (mL)

การสอบเทียบและควบคุมคุณภาพ

ในการเตรียมกราฟมาตรฐานควรใช้สารละลายมาตรฐานอย่างน้อย 6 ความเข้มข้น

1. เตรียม formaldehyde solution ให้มีความเข้มข้น 10 ppm โดยปิเปต formaldehyde stock solution 1 mg/mL มา 0.1 mL แล้วเจือจางด้วยน้ำ deionized 18 MΩ จนมีปริมาตรเป็น 10 mL

2. ปิเปตสารละลายที่เตรียมไว้มา 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0 และ 2.5 mL ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 25 mL

3. เติม 1% $NaHSO_3$ จนได้ปริมาตรเป็น 4 mL แล้วเติม 1% chromotropic acid 0.1 mL ทำการผสมกัน

4. ค่อยๆ เติม conc. H_2SO_4 acid 6 mL ลงไปอย่างช้าๆ ปิดด้วยจุกและเขย่าเบาๆ

5. นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $95^\circ C$ เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นทิ้งให้สารละลายเย็นที่อุณหภูมิห้อง

6. นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 nm

7. สร้างกราฟมาตรฐานจาก ค่า absorbance กับความเข้มข้นของ formaldehyde (ppm)

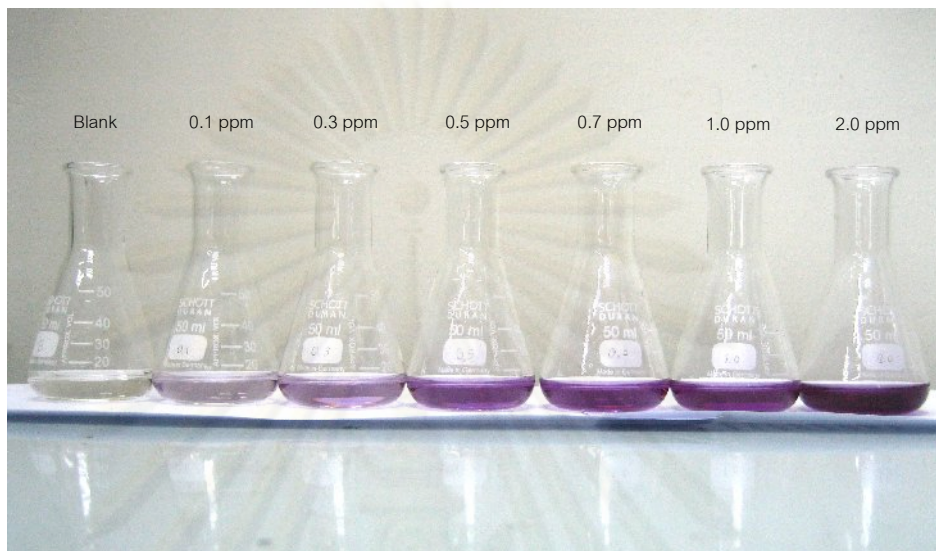
การเตรียมและวัดตัวอย่าง

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 1 mL ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 25 mL เติม 1% $NaHSO_3$ ปริมาตร 3 mL และเติม 1% chromotropic acid 0.1 mL ทำการผสมกัน

2. ค่อยๆ เติม conc. H_2SO_4 acid 6 mL ลงไป จากนั้นปิดด้วยจุกและเขย่าเบาๆ

3. นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $95^\circ C$ เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นทิ้งให้สารละลายเย็นที่อุณหภูมิห้อง

4. นำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 nm ค่า absorbance ของสารละลายตัวอย่างที่ได้นำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของ formaldehyde (ppm)



รูปที่ 3.3 การเกิดสีของสารละลายมาตรฐาน

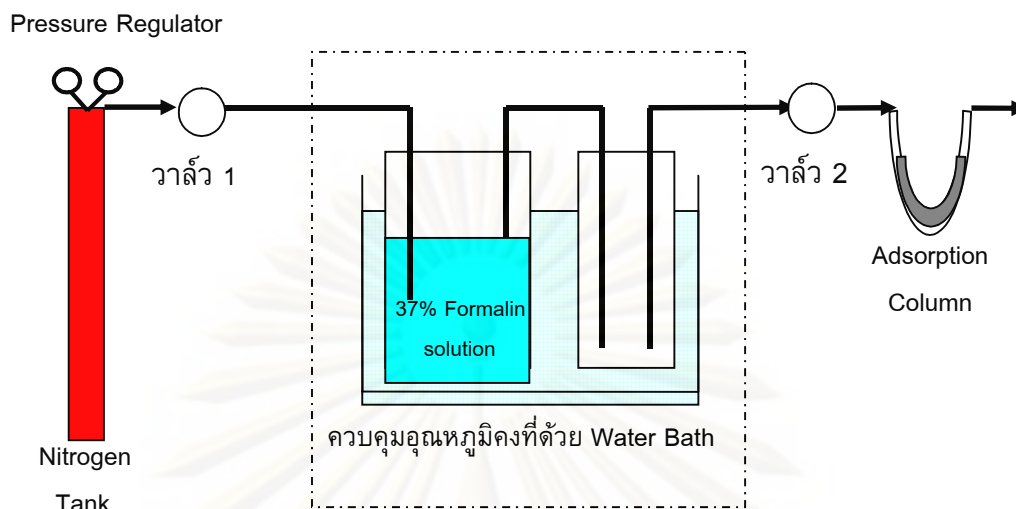
3.2.4 ศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ในระบบคอลัมน์

ในการทดลองขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาผลของอัตราการไหลที่มีต่อปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ โดยจะเลือกถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมพัลส์ที่ดีที่สุดมาทำการทดลองเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีเชิงจำหน่ายพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว

การเตรียมถ่านกัมมันต์

นำถ่านกัมมันต์ไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วใส่ในโถดูดความชื้น เพื่อให้ถ่านกัมมันต์ไม่มีความชื้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ประมาณ 1 g บันทึกน้ำหนักถ่านละเอียดถึง 4 ตำแหน่ง บันทึกเป็นน้ำหนักก่อนการดูดซับ จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ใส่ในคอลัมน์รูปตัวยูที่เตรียมไว้

การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในระบบคอลัมน์ ตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์การดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์

การควบคุมตัวแปร

ในการทดลองจะควบคุมความดันให้คงที่ที่ 1 bar และควบคุมอุณหภูมิที่ 29 °C ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราการไหลของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 100 และ 500 mL/min

การศึกษาผลของอัตราการไหลของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีต่อปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ ทำดังนี้

1. เปิดวาล์วก๊าซไนโตรเจน เพื่อใช้เป็นแก๊สสำหรับพาไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่คอลัมน์ จากนั้นปรับความดันให้คงที่ที่ 1 bar

2. เปิดวาล์วตัวที่ 1 และปรับอัตราการไหลของก๊าซ ด้วยมาตรวัดอัตราการไหลแบบฟองสบู่ ให้อัตราการไหลคงที่ที่ 100 mL/min

3. ตรวจสอบอัตราการไหลของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นอีกครั้ง ที่วาล์วตัวที่ 2 ก่อนที่ไอระเหยจะผ่านเข้าสู่คอลัมน์

4. ทำการชั่งน้ำหนักของถ่านกัมมันต์เป็นน้ำหนักหลังการดูดซับ ณ เวลาการดูดซับที่ 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420 และ 480 นาที จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์กับเวลา

5. การทดลองนี้จะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นจะปรับอัตราการไหลให้อัตราการไหลคงที่ที่ 500 mL/min และทำซ้ำตามข้อ 2-4



รูปที่ 3.5 ระบบคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอโอดีนของพอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์กับเวลา

3.2.5 ศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากปริมาณการดูดซับไอโอดีนพอร์มาลดีไฮด์ ด้วย Pearson's Correlation (2-tailed)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองตามวิธีการทดลองในบทที่ 3 ซึ่งจะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 5 ส่วนดังนี้คือ

ส่วนที่ 1 ศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบและการหาค่าไอโอดีนห้มเบอร์ของถ่านกัมมันต์ เพื่อหาอัตราส่วนน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบที่เหมาะสมและนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

ส่วนที่ 2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

ส่วนที่ 3 ศึกษาอุณหภูมิและตัวกระตุ้นที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมิตัวเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

ส่วนที่ 4 ศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ในระบบคอลัมน์

ส่วนที่ 5 ศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ ด้วย Pearson's Correlation (2-tailed)

4.1 ศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบและการหาค่าไอโอดีนห้มเบอร์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยนำแกลบไปผ่านกระบวนการทำให้เป็นถ่าน (carbonization) ที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ถ่านแกลบที่มีลักษณะเป็นแท่งสีดำเงาตลอด ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะแกลบแห้งและถ่านแกลบที่ได้จากการเผา

นำถ่านแกลบที่ได้จากการเผาเข้าสู่กระบวนการกระตุ้น (activation) โดยนำถ่านแกลบไปกระตุ้นด้วย NaOH H₃PO₄ และ ZnCl₂ ตามลำดับ ด้วยอัตราส่วนน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ (w/w) เป็น 1:1 และ 2:1 ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 350 และ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะนำไปล้างสารเคมีด้วยน้ำสะอาด น้ำร้อน และสารละลาย HCl เจือจาง 5% จนกระทั่งน้ำล้างถ่านมีค่า pH สภาพเป็นกลางหรือมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-7 แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110–120 °C แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดแล้วจนสามารถร่อนด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐานคัดขนาดเบอร์ 100 mesh ได้ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนัมเบอร์ ตามวิธีการมาตรฐานของ ASTM D 4607-86 จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 (บันทึกผลการทดลองในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ

กระบวนการกระตุ้น		ค่าไอโอดีนัมเบอร์ (mg/g)			
อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน (w/w) สารกระตุ้น : ถ่านแกลบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
		350	ถ่านแกลบ	34.69	
350	NaOH : ถ่านแกลบ = 1:1	277.07	275.68	275.42	276.06 ± 0.89
	NaOH : ถ่านแกลบ = 2:1	275.74	274.73	276.28	275.58 ± 0.79
700	NaOH : ถ่านแกลบ = 1:1	474.17	465.16	464.73	468.02 ± 5.33
	NaOH : ถ่านแกลบ = 2:1	463.45	463.08	470.39	465.64 ± 4.11
350	H ₃ PO ₄ : ถ่านแกลบ = 1:1	207.20	203.99	206.40	205.86 ± 1.67
	H ₃ PO ₄ : ถ่านแกลบ = 2:1	308.96	286.88	288.60	294.81 ± 12.28
700	H ₃ PO ₄ : ถ่านแกลบ = 1:1	187.11	194.27	178.20	186.53 ± 8.05
	H ₃ PO ₄ : ถ่านแกลบ = 2:1	241.05	235.83	240.44	239.11 ± 2.85
350	ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ = 1:1	202.30	204.79	201.84	202.98 ± 1.59
	ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ = 2:1	325.16	331.28	337.83	331.42 ± 6.34
700	ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ = 1:1	277.84	271.21	273.59	274.21 ± 3.36
	ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ = 2:1	529.42	598.00	590.74	572.72 ± 37.67

การหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดนั้น เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยทำการดูดซับจำนวน mg ของไอโอดีนบนถ่านกัมมันต์ 1 g กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนมเบอร์สูงจะมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนมเบอร์ต่ำ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่า แกลบที่ถูกเผาที่อุณหภูมิ 350 °C มีค่าไอโอดีนนมเบอร์เพียง 34.72 ± 0.21 mg/g ทั้งนี้เนื่องจากภายในรูพรุนนั้นยังคงมีน้ำมันดินหลงเหลืออยู่และมีจำนวนรูพรุนน้อย จึงเป็นเหตุให้สามารถดูดซับไอโอดีนได้น้อยกว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นต่างๆ มาก ด้วยเหตุนี้จึงมิได้นำถ่านแกลบที่ไม่ได้กระตุ้นไปทำการทดลองในขั้นต่อไป และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบโดยจำแนกสารกระตุ้นแต่ละชนิด พบว่า ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C กระตุ้นด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ 1:1 และ 2:1 นั้น มีค่าไอโอดีนนมเบอร์เท่ากับ 276.06 ± 0.89 และ 275.58 ± 0.79 mg/g ตามลำดับ ซึ่งถือว่าค่าไอโอดีนนมเบอร์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันคล้ายกับถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C กระตุ้นด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ 1:1 และ 2:1 นั้น มีค่าไอโอดีนนมเบอร์เท่ากับ 468.02 ± 5.33 และ 465.64 ± 4.11 mg/g ตามลำดับ

ในขณะที่ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 และ $ZnCl_2$ เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบมากขึ้นจาก 1:1 เป็น 2:1 ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นด้วย กล่าวคือ ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 350°C กระตุ้นด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ 1:1 และ 2:1 มีค่าไอโอดีนนมเบอร์เท่ากับ 205.86 ± 1.67 และ 294.81 ± 12.28 mg/g ตามลำดับ และถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700 °C กระตุ้นด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ 1:1 และ 2:1 มีค่าไอโอดีนนมเบอร์เท่ากับ 186.53 ± 8.05 และ 239.11 ± 2.85 mg/g ตามลำดับ

ส่วนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ 350°C กระตุ้นด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ 1:1 และ 2:1 มีค่าไอโอดีนนมเบอร์เท่ากับ 202.98 ± 1.59 และ 331.42 ± 6.34 mg/g ตามลำดับและถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ 700°C กระตุ้นด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ 1:1 และ 2:1 มีค่าไอโอดีนนมเบอร์เท่ากับ 274.21 ± 3.36 และ 572.72 ± 37.67 mg/g ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารกระตุ้นที่เพิ่มมากขึ้นจะเข้าไปแทรกซึมอยู่ในเนื้อแกลบและเข้าไปทดแทนสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในเนื้อแกลบมากยิ่งขึ้น จะทำให้ถ่านแกลบมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าไอโอดีนนมเบอร์ที่ได้เพิ่มมากยิ่งขึ้น

จากการทดลองสรุปได้ว่า การกระตุ้นถ่านแกลบด้วยสารกระตุ้นต่างๆ นั้น ส่งผลให้ถ่านแกลบที่ได้มีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น ยิ่งเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ

สารกระตุ้นต่อถ่านแกลบให้มากขึ้น ค่าไอโอดีนนมเบอร์ที่ได้จะเพิ่มสูงขึ้น โดยถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ ด้วยอัตราส่วนน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ 2:1 มีค่าไอโอดีนนมเบอร์สูงสุดคือ 572.72 mg/g ซึ่งเข้าใกล้ค่าไอโอดีนนมเบอร์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดให้ถ่านกัมมันต์ควรมีค่าไอโอดีนนมเบอร์ 600 mg/g [6] ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบที่ 2:1 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

4.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

4.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนของถ่านกัมมันต์

เมื่อได้อัตราส่วนน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบที่เหมาะสมแล้ว นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาธาตุที่มีอยู่เพื่อดูปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ดังแสดงในตารางที่

4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์	% C	% H	% N
NaOH, $350\text{ }^{\circ}C$	73.526	3.132	ND
NaOH, $700\text{ }^{\circ}C$	79.201	1.572	ND
H_3PO_4 , $350\text{ }^{\circ}C$	42.575	2.029	ND
H_3PO_4 , $700\text{ }^{\circ}C$	21.257	0.801	ND
$ZnCl_2$, $350\text{ }^{\circ}C$	38.733	2.155	ND
$ZnCl_2$, $700\text{ }^{\circ}C$	38.895	0.849	ND
ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์	79.200	ND	ND

หมายเหตุ: ND = Not detected

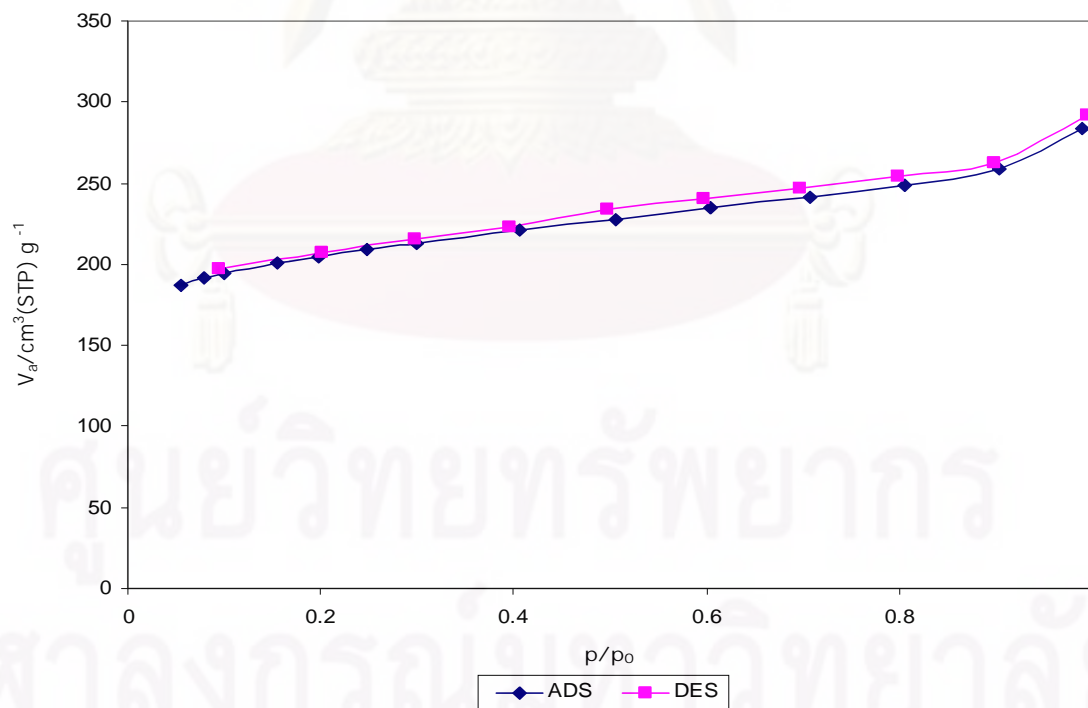
จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการผลิตถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่เผากระตุ้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผากระตุ้นให้มากขึ้น ปริมาณของคาร์บอนที่ได้จะเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณไฮโดรเจนจะลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lua และ Guo [36] ที่ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกกะลาปาล์มกระตุ้นด้วยแก๊ส CO_2 ที่อุณหภูมิ $500\text{--}900\text{ }^{\circ}C$ พบว่า ปริมาณคาร์บอนที่ได้แปรผกผันกับปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจน ในขณะที่ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ มีปริมาณคาร์บอนเพียง 21.257% น้อยกว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $350\text{ }^{\circ}C$ ที่มีปริมาณ

คาร์บอน 42.575% ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นความร้อนที่สูงเกินไปสำหรับกรดฟอสฟอริก จึงทำให้กรดฟอสฟอริกเกิดการสลายตัว ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ผิวคาร์บอน จึงเป็นเหตุให้ปริมาณคาร์บอนมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวิศรุต โลจนานนท์ [37] ได้ทำการทดลองการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริกคือ ที่อุณหภูมิ 350 °C

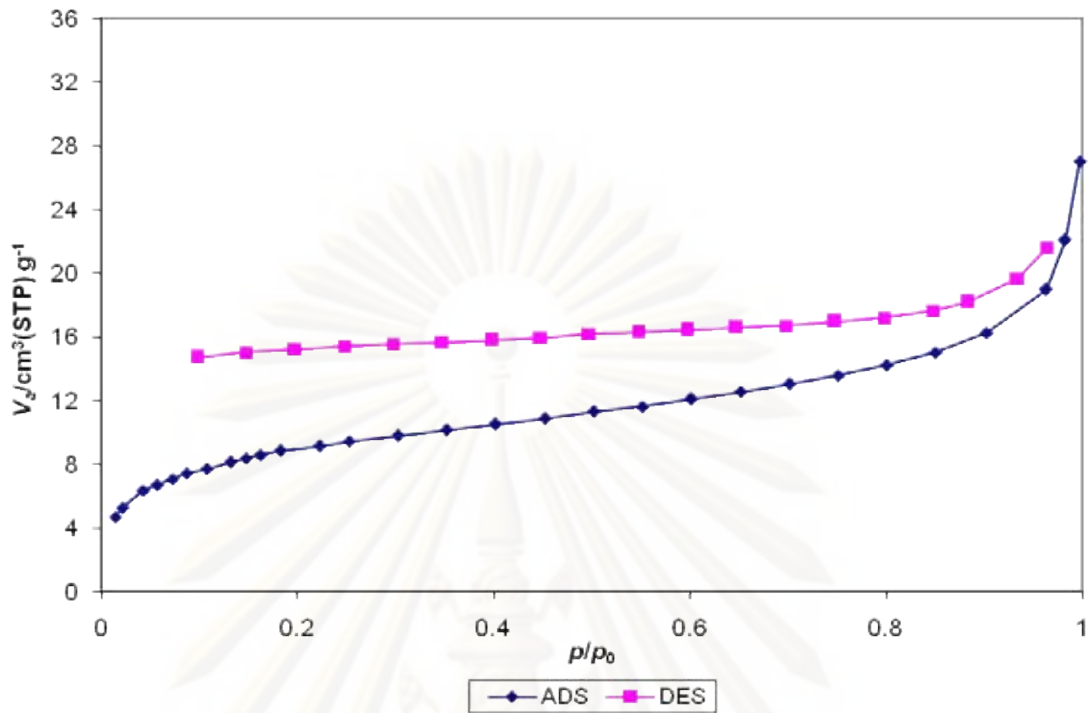
หากเปรียบเทียบระหว่างสารกระตุ้น จะพบว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH จะมีปริมาณคาร์บอนมากที่สุด รองลงมาเป็นถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 และถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ตามลำดับ โดยถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 °C จะมีปริมาณคาร์บอนเหลืออยู่มากที่สุดถึง 79.201% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ 79.200%

4.2.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์

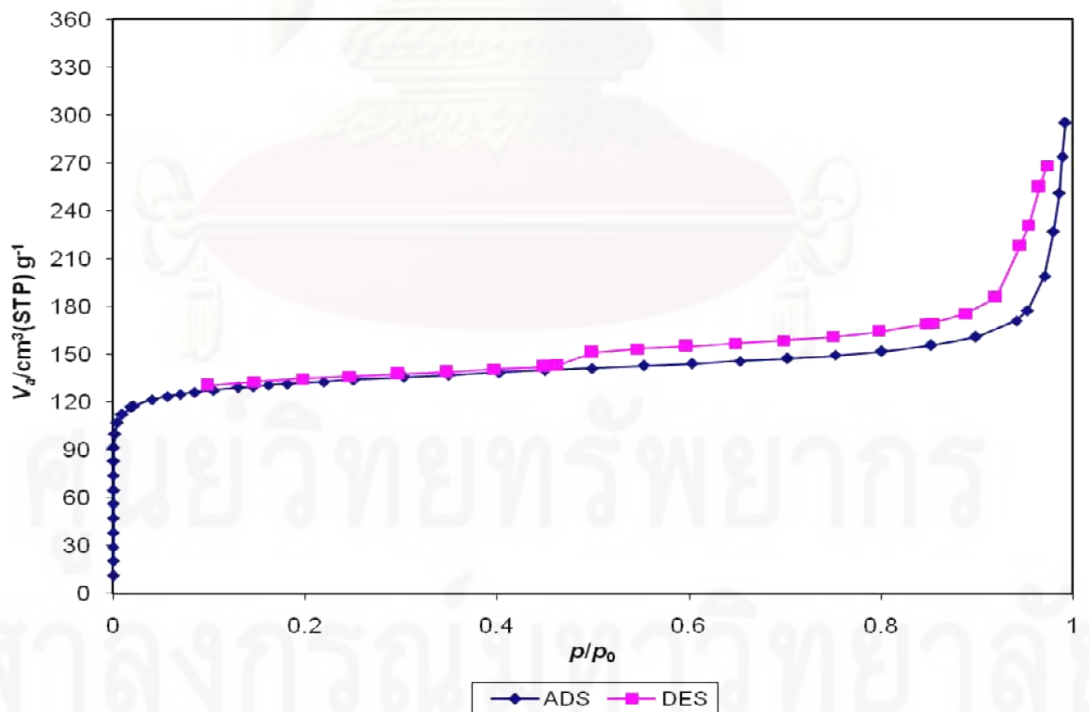
ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน เป็นเส้นกราฟที่แสดงความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์กับความดันของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K โดยใช้เครื่อง BET – SORP MINI ผลการทดลองการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.2 – 4.8



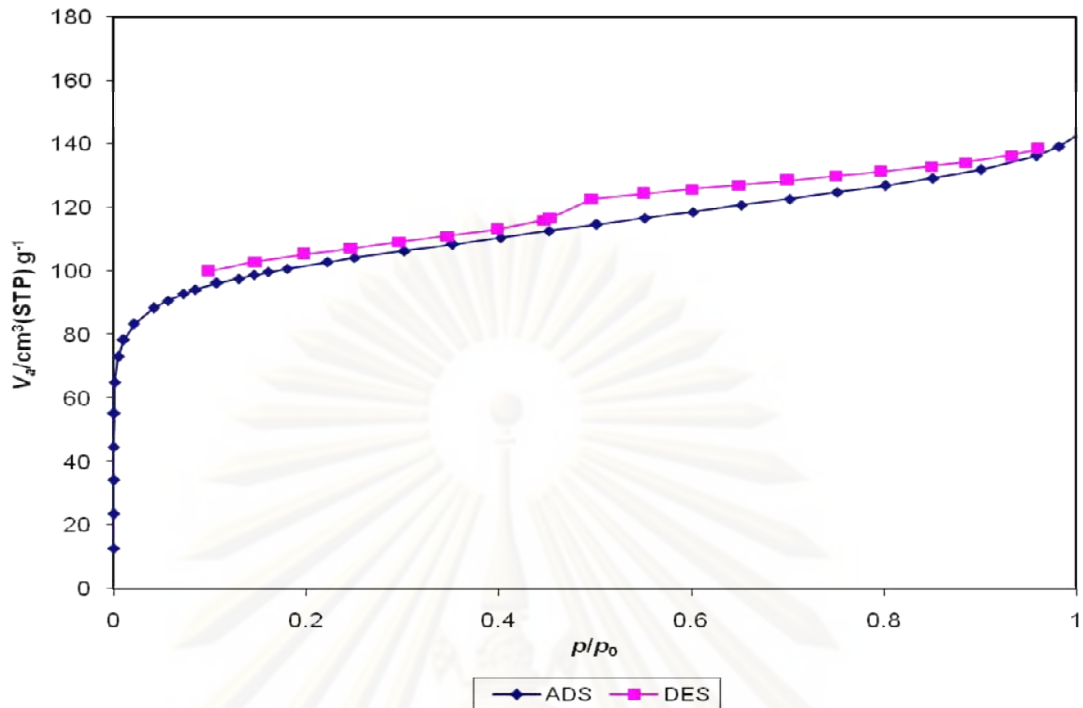
รูปที่ 4.2 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์



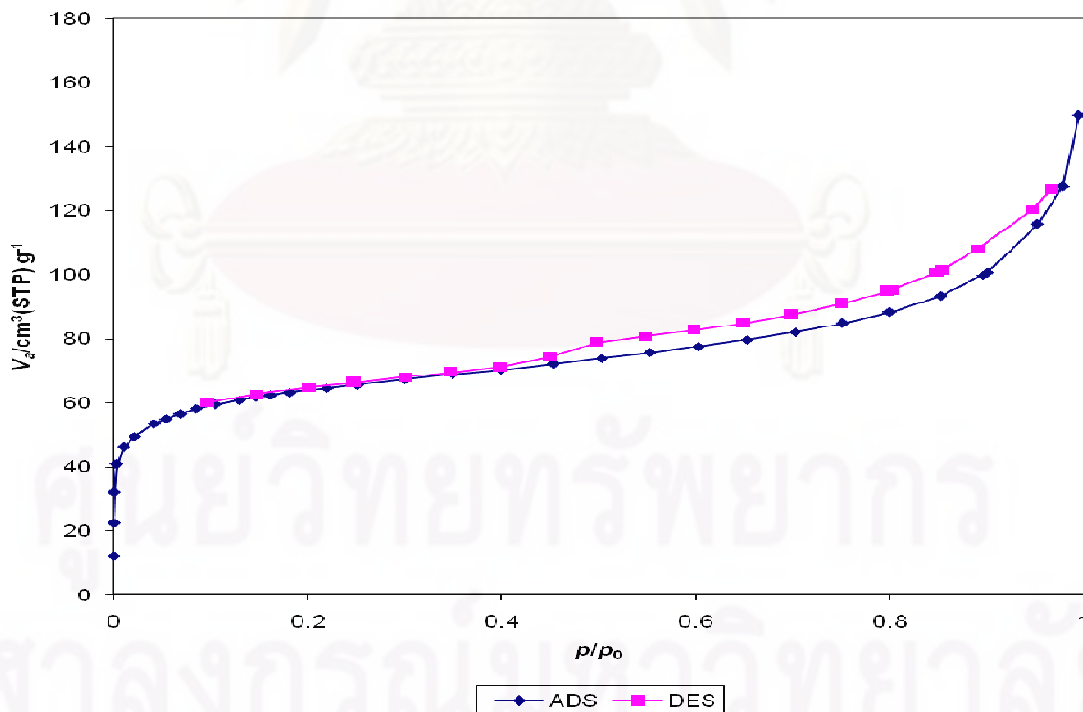
รูปที่ 4.3 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C



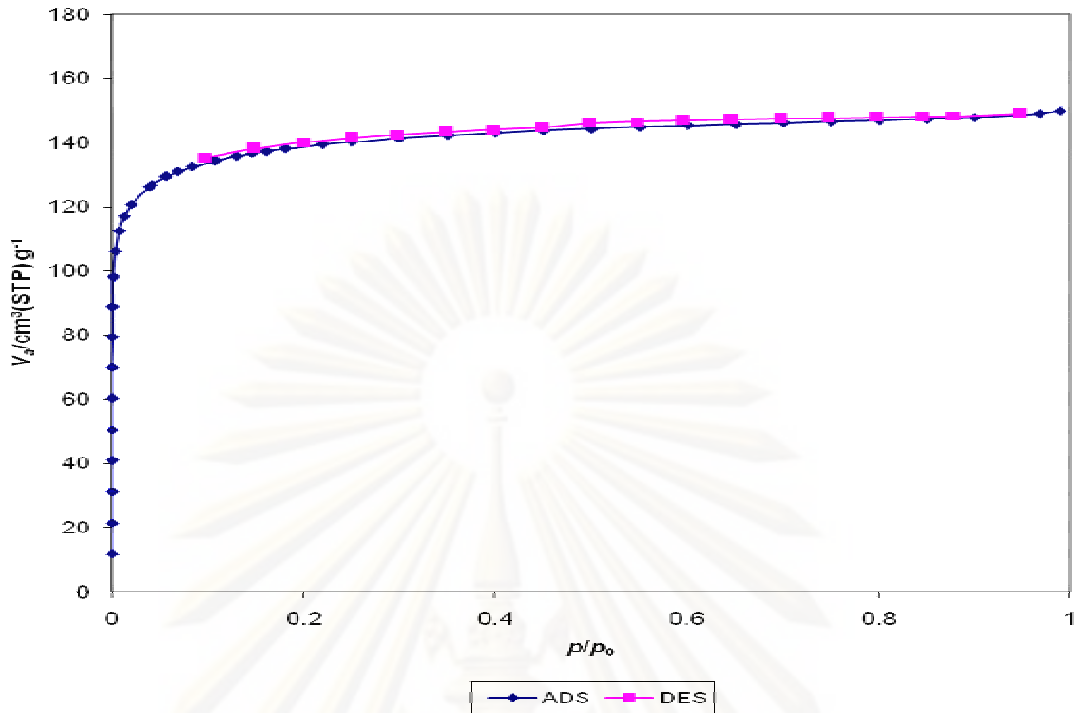
รูปที่ 4.4 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C



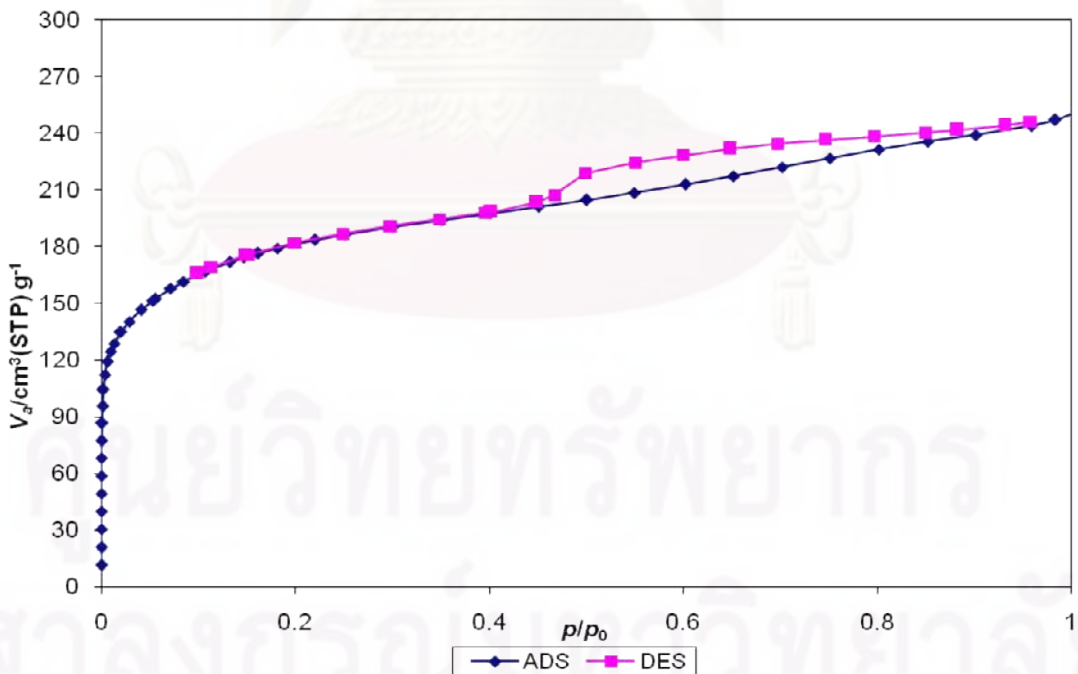
รูปที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 350 °C



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700 °C



รูปที่ 4.7 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 ที่อุณหภูมิ 350 °C



รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K ของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 ที่อุณหภูมิ 700 °C

จากรูปที่ 4.2–4.8 แสดงให้เห็นถึงไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดที่ผลิตได้ รวมถึงไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ซึ่งจะอธิบายได้ดังนี้

ไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 กับ 700 °C และถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H₃PO₄ ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นแบบเดียวกันคือ เป็นไอโซเทอมแบบที่ 2 ตามข้อเสนอของ Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT) กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความดัน จำนวนโมเลกุลของก๊าซจะถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเริ่มคงที่ แสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) นั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการดูดซับโมเลกุลของก๊าซในโตรเจนแบบหลายชั้น (multilayer) และยังเกิดช่องว่างฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) ขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากในขณะทำการ desorption โดยการลดความดันนั้น จำนวนโมเลกุลของก๊าซในโตรเจนจะค่อยๆ หลุดออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้มีโมเลกุลของก๊าซในโตรเจนอยู่ในรูพรุนเป็นจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์เหล่านี้มีขนาดรูพรุนค่อนข้างเล็กจึงทำให้จำนวนโมเลกุลก๊าซไม่สามารถออกมาได้จึงทำให้เกิดช่องว่างนี้ขึ้น และเมื่อถึง ณ ค่าความดันหนึ่ง ก๊าซในโตรเจนก็จะสามารถออกมาได้เป็นปกติ เส้นกราฟของ desorption ก็จะอยู่ในระดับเดียวกับเส้นกราฟของ adsorption ดังเดิม จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์เหล่านี้ประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดกลาง

ไอโซเทอมของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H₃PO₄ ที่อุณหภูมิ 350 °C และถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นไอโซเทอมแบบที่ 1 กับ 4 ตามข้อเสนอของ BDDT กล่าวคือ มีการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ผิวรูพรุนขนาดเล็ก แต่เมื่อความดันสูงขึ้นมากกว่า 0.4 จะมีการดูดซับเพิ่มขึ้นแบบหลายชั้นอย่างมีจำกัดและยังเกิดช่องว่างฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) แต่ไม่ชัดมาก นั้นแสดงว่ามีการดูดซับของก๊าซบนถ่านกัมมันต์ที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดกลาง

ส่วนไอโซเทอมของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นไอโซเทอมแบบที่ 1 ตามข้อเสนอของ BDDT กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความดัน จำนวนโมเลกุลของก๊าซจะถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเริ่มคงที่ แสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) นั้นเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งแสดงว่าเป็นการดูดซับของก๊าซบนถ่านกัมมันต์ที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก

4.2.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยด้วยเครื่อง BET-MINI ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

จากรูปไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด พบว่า การดูดซับก๊าซในโตรเจนมีทั้งแบบชั้นเดียวและแบบหลายชั้นทำให้สามารถวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวได้ทั้งจากสมการแลงเมียร์ และสมการ BET และวิเคราะห์หาปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยตามสมการ BET ผลการทดลองทั้งหมดได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3 (ผลการทดลองในภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์	สมการ BET			สมการ Langmuir
	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	พื้นที่ผิว (m^2/g)
NaOH, 350 °C	31.44	0.0380	4.831	50.04
NaOH, 700 °C	502.07	0.4341	3.450	583.87
H ₃ PO ₄ , 350 °C	371.67	0.2173	2.539	469.48
H ₃ PO ₄ , 700 °C	233.20	0.2211	3.792	307.08
ZnCl ₂ , 350 °C	527.81	0.2317	1.756	639.13
ZnCl ₂ , 700 °C	648.28	0.3836	2.367	842.31
ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์	644.26	0.4393	2.727	957.30

จากตารางที่ 4.3 ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบที่เผากระตุ้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ 700 °C จะมีพื้นที่ผิวมากที่สุดตามสมการ BET และสมการแลงเมียร์ มีค่า 648.28 m²/g และ 842.31 m²/g ตามลำดับ ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวมากกว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH และ H₃PO₄ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kalderis และคณะ [29] ได้ทำการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบโดยกระตุ้นด้วย NaOH, H₃PO₄ และ ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ 700 °C พบว่า ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ จะมีพื้นที่ผิวมากที่สุดถึง 750 m²/g ตามสมการ BET ทั้งนี้เป็นเพราะ ZnCl₂ มีความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ทำให้มีปริมาณ ZnCl₂ เหลืออยู่บนแกลบได้มากกว่าสารกระตุ้นตัวอื่นๆ อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดความชื้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรดอย่างแรง จึงมีความสามารถในการซึมแพร่เข้าไปในแกลบและทดแทนที่หรือทำปฏิกิริยากับพวกสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในแกลบได้ดีกว่าสารกระตุ้นชนิดอื่นๆ รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว, ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ 350 °C และถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C มีค่าพื้นที่ผิว 644.26, 527.81 และ 502.07 m²/g ตามลำดับตามสมการ BET

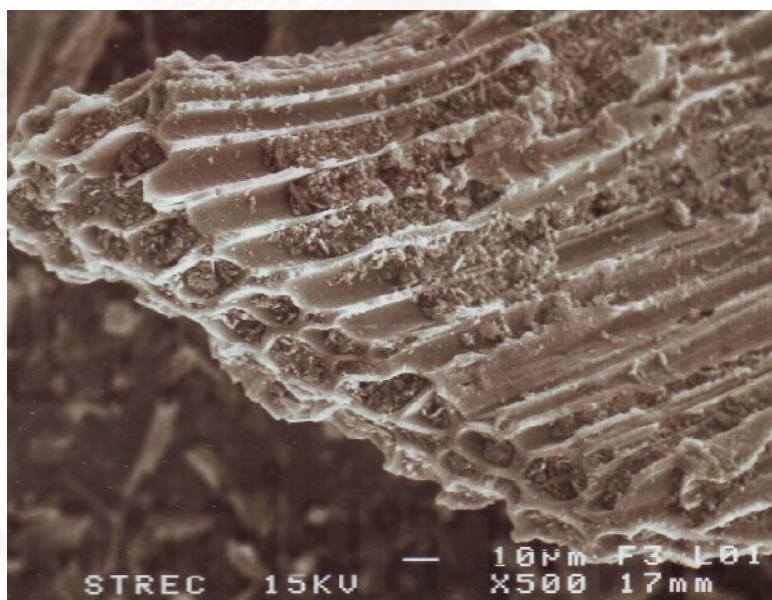
ในขณะที่ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H₃PO₄ ที่อุณหภูมิ 350 °C มีพื้นที่ผิวมากกว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H₃PO₄ ที่อุณหภูมิ 700 °C สอดคล้องกับการหาค่าปริมาณคาร์บอนในการทดลองที่ผ่านมา เป็นเพราะเกิดการสูญเสียคาร์บอน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของถ่านกัมมันต์ จึงเป็นเหตุให้พื้นที่ผิวที่ได้มีค่าลดลง ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ให้พื้นที่ผิวต่ำสุด คือ ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C ให้พื้นที่ผิวเพียง 31.44 m²/g ตาม

สมการ BET และ $50.04 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามสมการแลงเมียร์ เนื่องจากอาจเกิดการกระตุ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

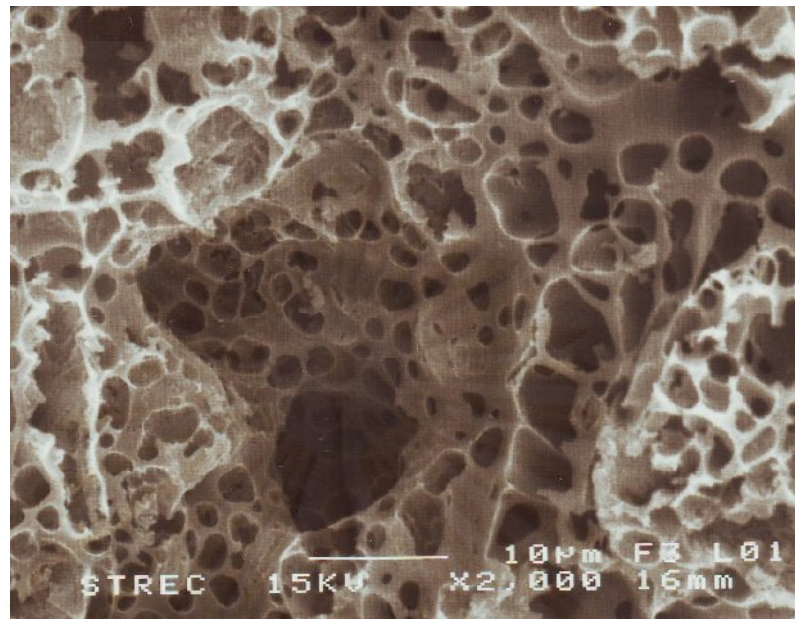
ในการศึกษาปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ พบว่า ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ $700 \text{ }^\circ\text{C}$ จะมีปริมาตรรูพรุนสูงที่สุดถึง $0.4341 \text{ cm}^3/\text{g}$ ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าวที่มีค่าปริมาตรรูพรุน $0.4393 \text{ cm}^3/\text{g}$ อีกทั้งยังมากกว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl_2 และ H_3PO_4 ในขณะที่ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ $350 \text{ }^\circ\text{C}$ จะมีปริมาตรรูพรุนน้อยที่สุดเพียง $0.0380 \text{ cm}^3/\text{g}$ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีพื้นที่ผิวต่ำ

ส่วนขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ จะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเป็นขนาดกลางตามระบบ IUPAC อยู่ในช่วง $2\text{--}50 \text{ nm}$ โดย ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ $350 \text{ }^\circ\text{C}$ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ที่สุดถึง 4.831 nm ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีจำนวนรูพรุนน้อย ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวน้อย ในขณะที่ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl_2 ที่อุณหภูมิ $350 \text{ }^\circ\text{C}$ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กที่สุดเพียง 1.756 nm ซึ่งจัดว่าเป็นรูพรุนขนาดเล็กตามระบบ IUPAC คืออยู่ในช่วงน้อยกว่า 2 nm แต่เนื่องจากมีจำนวนรูพรุนมาก จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสูง จากผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนเฉลี่ยจากสมการ BET จะสอดคล้องกับผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ดังที่ได้กล่าวมา

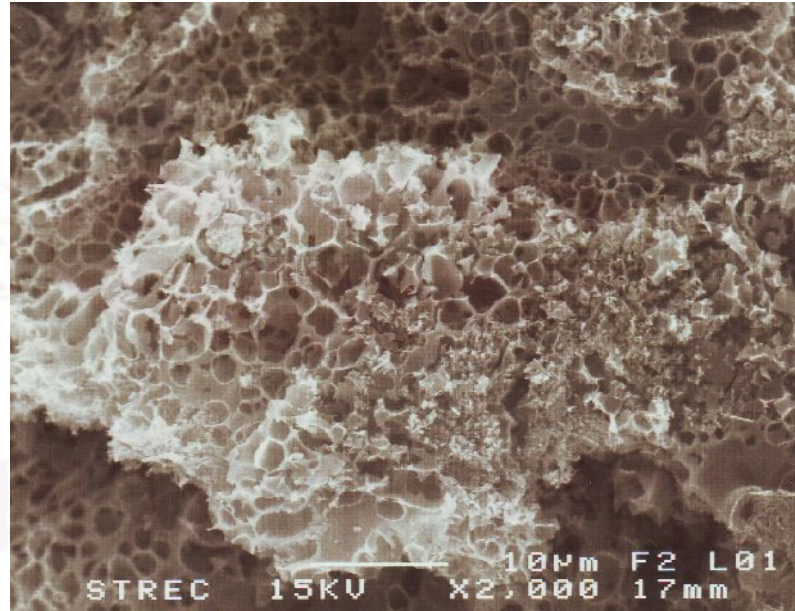
4.2.4 ศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยใช้ เครื่อง SEM-EDS เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ แสดงดังรูปที่ 4.9–4.15



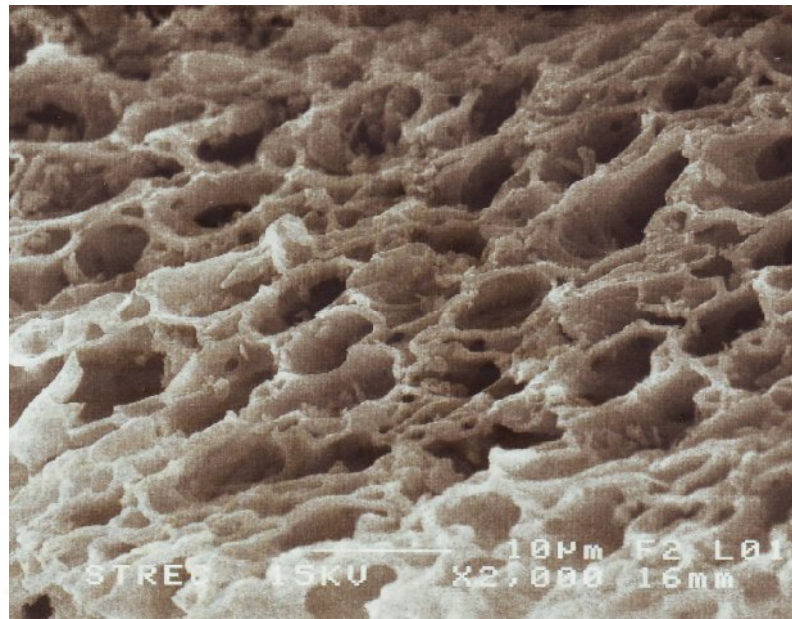
รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว



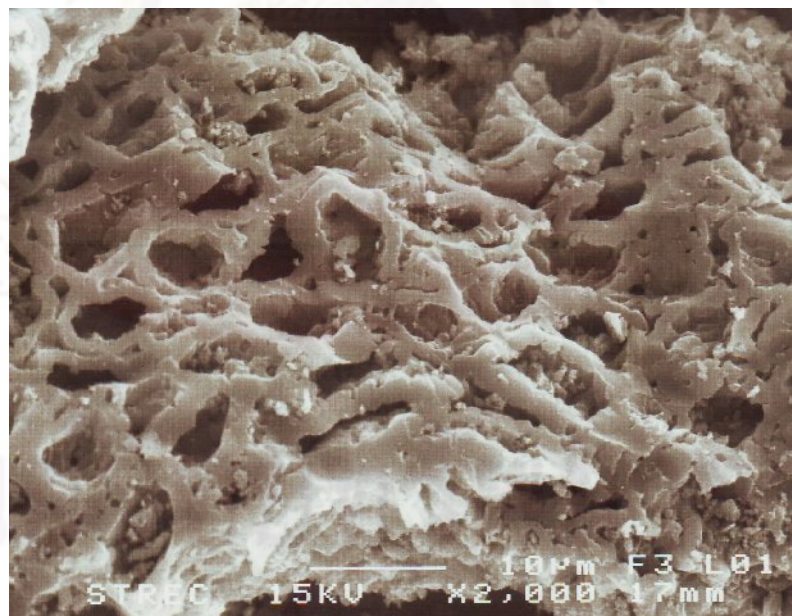
รูปที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C



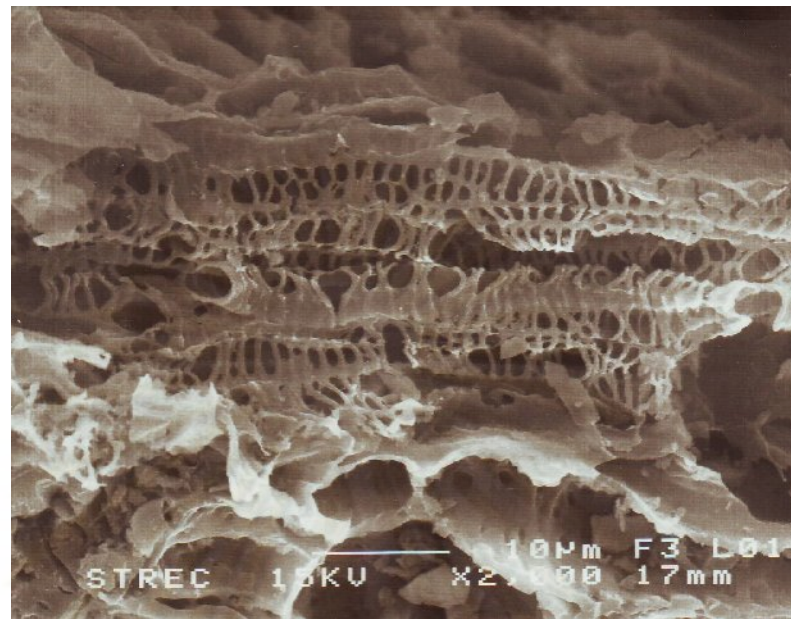
รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C



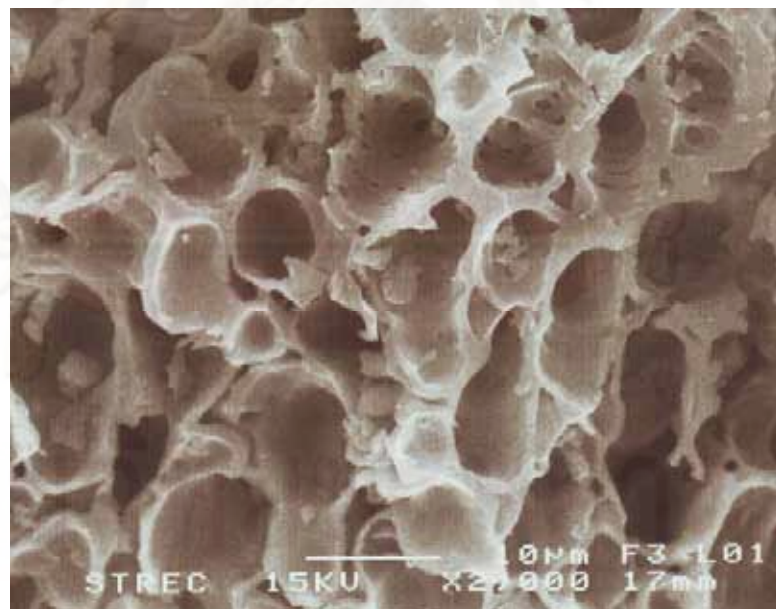
รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 350 °C



รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700 °C



รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ 350 °C



รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ 700 °C

จากรูปถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดพบว่า ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว มีลักษณะแตกต่างจากลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ คือมีลักษณะเป็นท่อ แนวตามยาว มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบทำให้ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีปริมาตรรูพรุนมาก ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสูง

ส่วนลักษณะพื้นผิวของถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH และ $ZnCl_2$ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น จาก 350 เป็น 700 °C พบว่า พื้นผิวของถ่านที่ได้มีความพรุนมากขึ้น ผังของรูพรุนบางลง มีจำนวนรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ผิวก็มากขึ้น แตกต่างจากถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น จาก 350 เป็น 700 °C กลับพบว่า ลักษณะพื้นผิวมีความพรุนน้อยลง ส่งผลให้มีปริมาตรรูพรุนน้อยลง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุนที่ผ่านมา หากเปรียบเทียบระหว่างสารกระตุ้นจะพบว่า ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH จะมีผักรูพรุนบางกว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 และ $ZnCl_2$

4.3 ศึกษาอุณหภูมิและตัวกระตุ้นที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

เมื่อนำถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดที่เตรียมได้มาดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัว จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 (ผลการทดลองดูในภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

ถ่านกัมมันต์	ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัว (mg/g)
NaOH, 350 °C	208.89 ± 0.71
NaOH, 700 °C	394.25 ± 3.94
H_3PO_4 , 350 °C	254.12 ± 1.53
H_3PO_4 , 700 °C	284.24 ± 0.76
$ZnCl_2$, 350 °C	198.76 ± 6.94
$ZnCl_2$, 700 °C	241.30 ± 7.65
ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์	381.63 ± 2.65

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH และถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจาก 350 เป็น 700 °C พบว่า ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ย ส่วนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นให้มากขึ้น พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์กลับน้อยลง แต่มีค่าปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากถ่านแกลบกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700°C มีปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่า ถ่านแกลบกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 350°C จึงเป็นเหตุให้มีปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์มากกว่า

หากจำแนกถ่านกัมมันต์ตามสารกระตุ้นแต่ละชนิดที่กระตุ้นอุณหภูมิ 700°C พบว่า ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH จะสามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีที่สุด มีค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดถึง 394.25 ± 3.94 mg/g ทั้งนี้เนื่องจากถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH มีพื้นที่ผิวสูง ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยค่อนข้างใหญ่ จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับไอระเหยได้ดีกว่าสารกระตุ้นชนิดอื่นๆ และมีความสามารถในการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ทั่วไปที่ผลิตจากกะลามะพร้าวที่มีค่าปริมาณการดูดซับ 381.63 ± 2.65 mg/g ซึ่งหากเปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนระหว่างถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH กับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ทั่วไปที่ผลิตจากกะลามะพร้าว พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ทั่วไปที่ผลิตจากกะลามะพร้าวจะมีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH แต่เนื่องจากมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กกว่า จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับไอระเหยได้น้อยกว่า รองลงมาเป็นถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 และถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และเมื่อเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 กับถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ พบว่า ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ จะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 แต่เนื่องจากมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กกว่า จึงทำให้ไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์แทรกซึมเข้าไปได้น้อยกว่า

จากการทดลองดังกล่าว จึงเลือกใช้ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

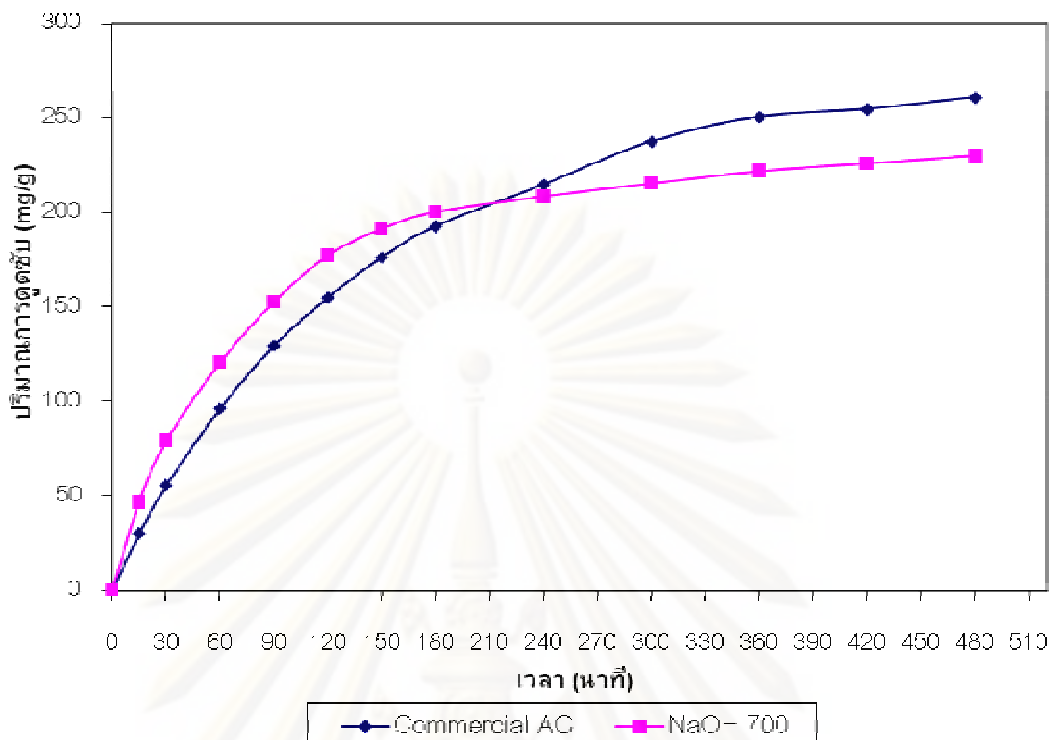
4.4 ศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ในระบบคอลัมน์

ในการศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ในระบบคอลัมน์ โดยใช้ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ 2:1 เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว โดยนำถ่านกัมมันต์จำนวน 1 g ผ่านไอระเหย

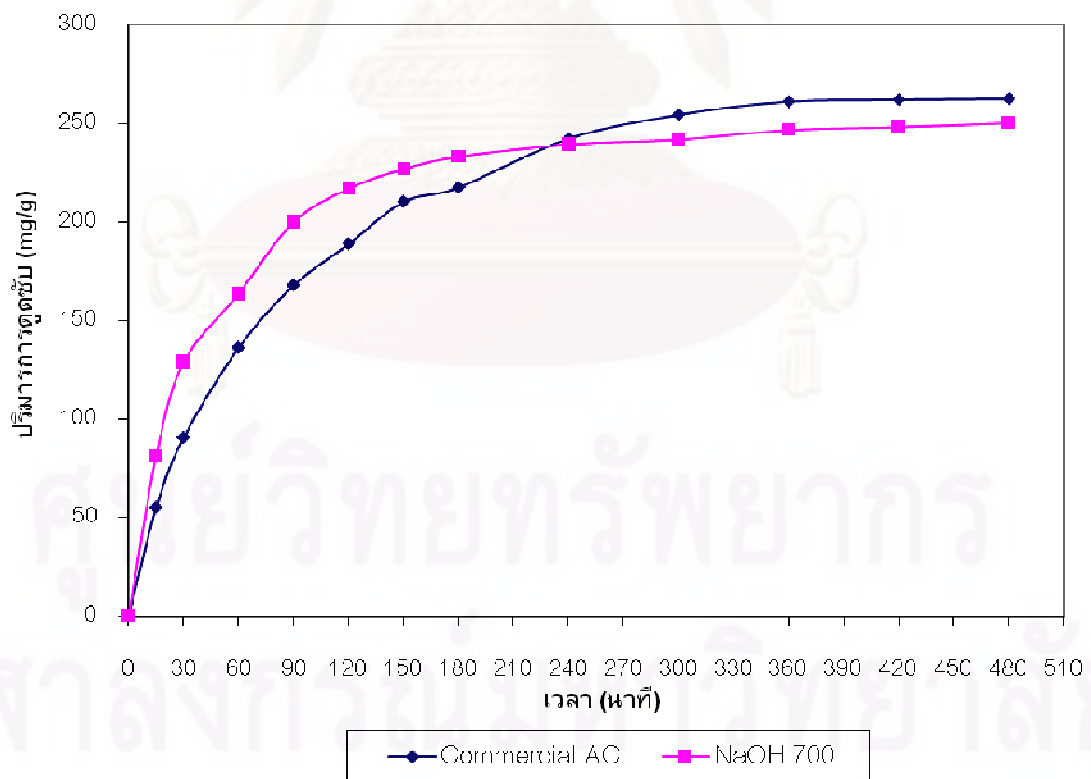
ฟอร์มาลดีไฮด์ ที่อัตราการไหล 100 และ 500 mL/min ที่อุณหภูมิ 29 °C และความดัน 1 bar หาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ ณ เวลาการดูดซับที่ 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420 และ 480 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 จากนั้นนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์กับเวลา โดยกำหนดแกนตั้ง (แกน y) เป็นค่าปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ มีหน่วยเป็น mg/g และแกนนอน (แกน x) เป็นเวลา มีหน่วยเป็น นาที กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C กับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์กับเวลา ที่อัตราการไหล 100 mL/min แสดงดังรูปที่ 4.16 และที่อัตราการไหล 500 mL/min แสดงดังรูปที่ 4.17 (ผลการทดลองในภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ เทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 100 และ 500 mL/min

ที่ เวลา (นาที)	ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ (mg/g)			
	อัตราการไหล 100 mL/min		อัตราการไหล 500 mL/min	
	ถ่านกลบที่ถูก กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C	ถ่านกัมมันต์ ที่มีจำหน่าย เชิงพาณิชย์	ถ่านกลบที่ถูก กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C	ถ่านกัมมันต์ ที่มีจำหน่าย เชิงพาณิชย์
15	46.92 ± 2.44	29.87 ± 1.23	81.12 ± 0.92	54.97 ± 5.99
30	79.13 ± 1.55	55.38 ± 3.00	128.97 ± 2.29	90.51 ± 2.30
60	120.76 ± 2.76	96.13 ± 4.05	163.79 ± 1.37	136.09 ± 3.94
90	152.73 ± 0.20	129.39 ± 7.96	200.08 ± 2.13	167.72 ± 4.45
120	177.44 ± 1.34	154.90 ± 9.23	217.06 ± 0.98	188.74 ± 4.45
150	191.51 ± 1.36	176.29 ± 8.19	226.98 ± 0.81	210.11 ± 4.35
180	200.39 ± 1.45	192.79 ± 7.83	233.30 ± 1.42	217.40 ± 4.58
240	208.65 ± 1.92	214.79 ± 5.84	239.52 ± 0.34	242.12 ± 4.60
300	215.50 ± 2.00	237.60 ± 4.68	241.96 ± 1.08	254.22 ± 4.54
360	221.91 ± 1.92	250.60 ± 4.70	246.78 ± 0.89	260.89 ± 4.67
420	225.98 ± 1.14	254.78 ± 4.53	248.28 ± 1.15	261.82 ± 4.61
480	230.04 ± 0.77	260.92 ± 4.06	250.31 ± 0.87	262.33 ± 4.56



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บน ถ่านกัมมันต์กับเวลา ที่อัตราการไหล 100 mL/min/ถ่านกัมมันต์ 1 g



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บน ถ่านกัมมันต์กับเวลา ที่อัตราการไหล 500 mL/min/ถ่านกัมมันต์ 1 g

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C กับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ที่อัตราการไหล 100 mL/min กับเวลา พบว่า เมื่อดูดซับไอระเหยไปได้เพียง 30 นาที ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C จะสามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ได้ถึง 79.13 ± 1.55 mg/g ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่สามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ ได้เพียง 55.38 ± 3.00 mg/g เมื่อทำการดูดซับผ่านไปถึง 180 นาที พบว่า ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C ยังคงสามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลา 180 นาทีแรก ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C สามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ได้เร็วกว่าและมากกว่าครึ่งเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ จนกระทั่งเวลาผ่านไป 240 นาที จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์กับเวลา ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด จะค่อยๆ เป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มเข้าสู่สมดุล โดยถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์จะมีปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์มากกว่าถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C อยู่เล็กน้อย

เมื่อปรับอัตราการไหลของไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ให้เร็วขึ้นจากอัตราการไหล 100 mL/min เป็นอัตราการไหล 500 mL/min พบว่า ลักษณะเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ที่อัตราการไหล 500 mL/min ดังแสดงในรูปที่ 4.17 มีแนวโน้มคล้ายกับลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์กับเวลา ที่อัตราการไหล 100 mL/min หลังจากปรับอัตราการไหลให้เพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C และถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ จะเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียง 30–40 mg/g ในแต่ละช่วงเวลา นั้นแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลมีผลค่อนข้างน้อยในการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด และเมื่อเริ่มเข้าสู่สมดุล ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน

4.5 ศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ ด้วย Pearson's Correlation (2-tailed)

ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ อันได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ ด้วย Pearson's Correlation (2-tailed) ให้ผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ ด้วย Pearson's Correlation (2-tailed)

	พื้นที่ผิว	ปริมาตร รูพรุน	ขนาดรูพรุน เฉลี่ย	ปริมาณ ดูดซับ HCHO
พื้นที่ผิว Pearson's Correlation	1	.879**	-.812*	.398
Sig. (2-tailed)		.009	.026	.377
N	7	7	1	7
ปริมาตรรูพรุน Pearson's Correlation	.879**	1	-.487	.757*
Sig. (2-tailed)	.009		.267	.049
N	7	7	7	7
ขนาดรูพรุน Pearson's Correlation	-.812*	-.487	1	.070
Sig. (2-tailed)	.026	.267		.882
N	1	7	7	7
ปริมาณการดูดซับ HCHO Pearson's Correlation	.398	.757*	.070	1
Sig. (2-tailed)	.377	.049	.882	
N	7	7	7	7

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

จากตารางที่ 4.6 เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ พบว่า พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาตรรูพรุน อย่างมีนัยสำคัญ ($r = .879$), $p < 0.01$ นั้นหมายความว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง จะมีปริมาตรรูพรุนสูงไปด้วย ในขณะที่พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์เชิงลบกับขนาดรูพรุน อย่างมีนัยสำคัญ ($r = -.812$), $p < 0.05$ กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง จะมีรูพรุนขนาดเล็ก จึงสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง จะมีปริมาตรรูพรุนสูง แต่มีรูพรุนขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังพบว่า สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ คือ ปริมาตรรูพรุน ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ อย่างมีนัยสำคัญ ($r = .757$), $p < 0.05$ กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ที่มีปริมาตรรูพรุนสูงจะสามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนต่ำกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ คือ

5.1.1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบและการหาค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนน้ำหนักของสารกระตุ้นต่อถ่านแกลบ (w/w) ที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH, H₃PO₄ และ ZnCl₂ คือ 2 : 1 ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนัมเบอร์มากที่สุดคือ ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ 700 °C มีค่าไอโอดีนัมเบอร์ เท่ากับ 572.72 mg/g

5.1.2 สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ โดยวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน, หาไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจน, พื้นที่ผิว, ปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว

พบว่า

- ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C มีปริมาณคาร์บอนมากที่สุดถึง 79.201% มีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ 79.200%

- ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดที่ผลิตได้ มีทั้งแบบการดูดซับแบบชั้นเดียวและแบบหลายชั้น แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์สามารถที่ผลิตได้ประกอบด้วยรูพรุนขนาดกลางและขนาดเล็ก

- ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ 700 °C จะมีพื้นที่ผิวมากที่สุดตามสมการ BET และสมการแลงเมียร์ มีค่าถึง 648.28 m²/g มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ มีพื้นที่ผิว 644.26 m²/g ตามสมการ BET

- ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C จะมีปริมาตรรูพรุนสูงที่สุดถึง 0.4341 cm³/g ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่มีค่าปริมาตรรูพรุน 0.4393 cm³/g

- ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ที่สุดถึง 4.831 nm ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพียง 2.727 nm

5.1.3 การศึกษาอุณหภูมิและตัวกระตุ้นที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ในการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมิตัวเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว

พบว่า อุณหภูมิกระตุ้นที่เหมาะสมของถ่านแกลบในการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมัตัวคือ ที่อุณหภูมิ 700 °C และสารกระตุ้นที่เหมาะสมของถ่านแกลบในการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมัตัวคือ NaOH

ความสามารถในการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมัตัวบนถ่านกัมมันต์เป็นดังนี้คือ ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C จะดูดซับไอระเหยได้มากที่สุดถึง 394.25 ± 3.94 mg/g รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ และถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 700 °C ซึ่งมีค่าปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ 381.63 ± 2.65 และ 284.24 ± 0.76 mg/g ตามลำดับ ส่วนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ 350 °C จะดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ได้น้อยที่สุดเพียง 198.76 ± 6.94 mg/g

5.1.4 ศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ในระบบคอลัมน์

พบว่า ถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ได้มากกว่าและดูดซับได้เร็วกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าวในช่วงเวลา 180 นาทีแรกก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สมดุล และยังพบว่าอัตราการไหลของไอระเหยมีผลค่อนข้างน้อยต่อการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด

5.1.5 ศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ ด้วย Pearson's Correlation (2-tailed)

พบว่า ปริมาตรรูพรุนมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ อย่างมีนัยสำคัญ ($r = .757$), $p < 0.05$ กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ที่มีปริมาตรรูพรุนสูงจะสามารถดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีกว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนต่ำกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัตถุดิบที่เหลือทิ้งทางการเกษตรหรืออุตสาหกรรม ที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ เพื่อเป็นการแปรรูปวัสดุให้มีคุณค่ามากขึ้นและเป็นการช่วยลดปัญหาเรื่องการทิ้งของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรมในสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

2. ควรศึกษาสภาวะที่เหมาะสมอื่นๆ เช่น ระยะเวลาในการกระตุ้น ปริมาณและสารกระตุ้นอื่นๆ หรือศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบด้วยวิธีทางกายภาพ เพื่อให้ได้ถ่านแกลบที่มีพื้นที่ผิวสูง และสามารถดูดซับก๊าซได้มากขึ้น

3. ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง ควรทำการอบก่อนนำมาใช้ทุกครั้ง เพื่อป้องกันปัญหาถ่านมีความชื้นและสิ่งสกปรกเกาะตามรูพรุน ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

4. ก่อนที่จะทำการศึกษาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ในระบบคอลัมน์ ควรตรวจสอบรอยต่อของท่อนำก๊าซที่จุดต่างๆ อย่างถี่ถ้วน และตรวจสอบอัตราการไหลของไอระเหยให้คงที่ทุกจุด



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] เทพวิฑูรย์ ทองศรี. มลพิษทางอากาศภายในอาคาร [บทความวิทยุกระจายเสียงรายการสารระยยามบายกระจายเสียงจากสถานีวิทยุกระจายเสียงแห่งประเทศไทย]. พุศจิกายน 2547.
- [2] ลิขิต ศรีประเสริฐสุข. การตรวจวัดฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศโดยใช้ท่อบรรจุตัวดูดซับชนิดของแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [3] นพภาพร พานิช และคณะ. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. กรุงเทพฯ : ศูนย์บริการวิชาการ แห่งจุฬาลงกรณ์, 2547.
- [4] กรมศุลกากร. สถิติการนำเข้า-ส่งออก ถ่านกัมมันต์[Online]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.customs.go.th/Statistic/StatisticIndex.jsp> [11 มิถุนายน 2552]
- [5] Wang, N. and Low, M.J.D. Spectroscopic Studies of carbons. XVII: The Charing Of Rice hulls. Materials Chemistry and Physics 26(1990): 117-130.
- [6] อุตสาหกรรม, กระทรวง. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ (มอก. 900-2532). กรุงเทพมหานคร : กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547.
- [7] Hessler, J.W. Activated carbon. London : Leonard Hill, 1967. อ้างถึงใน สุจนีย์ คุ้มเสียมม. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [8] มานพ ติระรัตนสมโภช. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิต วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [9] กรมควบคุมมลพิษ. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ [Online]. แหล่งที่มา : <http://msds.pcd.go.th/index.asp> [31 กรกฎาคม 2552]
- [10] วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus Camaldulensis* Dehnh. โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2543.
- [11] กรมควบคุมมลพิษ. ฟอร์มาลดีไฮด์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : อินทิเกรตเต็ด โปรโมชัน เทคโนโลยี, 2541.
- [12] แก้ว ขจรไชยกูล. การตรวจวัดฟอร์มาลดีไฮด์ภายในห้องปฏิบัติการในโรงพยาบาล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิต วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

- [13] กรมศุลกากร. สถิติการนำเข้า-ส่งออก ฟอรัมาลดีไฮด์[Online]. 2550.
แหล่งที่มา: <http://www.customs.go.th/Statistic/StatisticIndex.jsp> [11 มิถุนายน 2552]
- [14] World Health Organization. 1989. Environmental Health Criteria for formaldehyde 89.
อ้างถึงใน แก้ว ขจรไชยกูล. การตรวจวัดฟอรัมาลดีไฮด์ภายในห้องปฏิบัติการใน
โรงพยาบาล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [15] NIOSH Manual of Analytical Methods. FORMALDEHYDE by VIS 3500. [Online].
1994. Available from : www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/3500.pdf [2009,
Mar 15]
- [16] Fagnani, E., Melios, C.B., Pezza, L., Pezza. H.R. Chromotropic acid-formaldehyde
reaction in strongly acidic media. The role of dissolved oxygen and replacement
of concentrated sulphuric acid. Talanta. 60 (2003) : 171–176.
- [17] วีระยุทธ เจือวัฒนศิริกุล. การพัฒนาเทคนิคการดูดซับทองด้วยถ่านกัมมันต์. ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [18] Guo, Y., Qi, J., Yang, S., Yu, K., Wang, Z. and Xu, H. Adsorption of Cr(VI) on
micro-and mesoporous rice husk-based activated carbon. Materials Chemistry and
physics. 78 (2002) : 132–137.
- [19] Qi, j., Li, Z., Guo, Y., Xu, H. Adsorption of phenolic compounds on micro-and
mesoporous rice husk-based active carbons. Materials Chemistry and Physics 87
(2004) : 96–101.
- [20] Feng, Q., Lin, Q., Gong, F., Sugita, S., Shoya, M. Adsorption of lead and mercury by
rice husk ash. Journal of Colloid and Interface Science. 278 (2004) : 1–8.
- [21] ปัทมาศตราบุตร และ นที วิบูลย์ปัญญากุล. การลดสารมลพิษในน้ำด้วยวัสดุดูดซับที่
ปรับปรุงจากแกลบ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [22] รัตนา มหชัย และ สุนันทา เสงร์ศรี. การหาพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับถ่านกัมมันต์ เกล็ดิน ถ่าน
แกลบและถ่านแกลบเผา. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2541 (อัดสำเนา)
- [23] สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม. การศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ. วิศวกรรมสาร ม.ข. 29
(มกราคม-พฤษภาคม 2545) : 87–100.
- [24] จักรพงษ์ ชมพูนุช และ ณีฐกิตติ์ อมรกาญจนวัฒน์. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากถั่วแกลบ.
ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต, 2548.
- [25] ศิริภาค สุขใจมิตร. การดูดซับตะกั่วไอออนบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถั่วแกลบดำ.
ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. 2550.
- [26] เกศศิริ เหล่าวัชรธรรม. การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่

เตรียมจากฟางข้าว แกลบ และชานอ้อย โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก. มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย 28 (ตุลาคม-ธันวาคม 2551) : 84–98.

- [27] Yalcin, N. and Sevinc, V. Studies of the surface area and porosity of activated carbon prepared from rice husks. Carbon. 38 (2000) : 1943–1945.
- [28] Guo, Y. and Rockstraw, D.A. Activated carbons prepared from rice hull by one-step phosphoric acid activation. Microporous and Mesoporous Material. 100 (2007) : 12–19.
- [29] Kalderis, D., Bethanis, S., Paraskeva, P. and Diamadopoulos, E. Production of activated carbon from bagasse and rice husk by a single-stage chemical activation method at low retention times. Bioresource Technology. 99 (January 2008) : 6809–6816.
- [30] Liou, T.H., and Wu, S.H. Characteristic of microporous/mesoporous carbons prepared from rice husk under base-and acid-treated condition. Journal of Hazardous Materials. 171 (June 2009) : 693–703.
- [31] Rong, H., Ryu, Z., Zheng, J. and Zheng, Y. Effect of air oxidation of rayon-based activated carbon fibers on the adsorption behavior for formaldehyde. Carbon. 40 (March 2002) : 2291–2300.
- [32] Rong, H., Ryu, Z., Zheng, J. and Zheng, Y. Influence of heat treatment of rayon-based activated carbon fibers on the adsorption for formaldehyde. Journal of Colloid and Interface Science. 261 (January 2003) : 207–212.
- [33] Boonamnuayvitaya, V., B., Sae-ung, S. and Wiwut, T. Preparation of activated carbon from coffee residue for the adsorption of formaldehyde. Separation and Purification Technology. 42(July 2005) : 159–168.
- [34] Kumagai, S., Sasaki, K., Shimizu, Y., Takeda, K. Formaldehyde and acetaldehyde adsorption properties of heat-treated rice husks. Separation and Purification Technology. 61(2007) : 398–403.
- [35] Jing, L., Zhong, L., Bing, L., Qibin, X., Hongxia, X. Effect of relative on adsorption of formaldehyde on modified activated carbons. Chinese Journal of Chemical Engineering. 16(2008) : 871–875.
- [36] Lua, A.C., Guo, J. Preparation and characterization of activated carbons from oil-palm stones for gas-phase adsorption. Colloids and Surfaces 179 (2001) : 151–162.
- [37] วิศรุต โลจนานนท์. ผลของการเตรียมตัวชนิดถ่านจากเปลือกถั่วลิสงด้วยกรดฟอสฟอริกต่อการดูดซับไอเบนซีนเจือจาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.



ภาคผนวก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์ค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ซึ่งสมมติว่าเป็นสารพิษในน้ำ ตามวิธี ASTM D 4607-86 รายละเอียดการวิเคราะห์ มีดังนี้

1. เครื่องมือ

- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- บิวเรตต์ขนาด 50 mL
- เตาอบอุณหภูมิ 110-150 °C
- ขวดปริมาตรรูปชมพู่ ขนาด 250 mL พร้อมจุกแก้วสำหรับปิด
- ปีกเกอร์
- กระจกตวงปริมาตร ขนาด 100, 500 mL
- กรวยกรอง
- กระดาษกรองเบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mL
- ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 mL
- ปีเปตขนาด 5, 10, 25, 50, 100 mL
- กระจกตวงปริมาตร ขนาด 100, 500 mL
- ขวดสีชาสำหรับเก็บสารละลายไอโอดีนและสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต
- โถดูดความชื้น (Decicator)

2. สารเคมีที่ใช้

2.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เตรียมโดยผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 mL ลงในน้ำกลั่น 550 mL เขย่าให้เข้ากัน

2.2 สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไอโอเดต (KIO_3) 0.1000 N เตรียมโดยอบโปแตสเซียมไอโอเดตที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งมาจำนวน 3.5667 ± 0.1 g ละลายน้ำกลั่นปริมาณ 100 mL ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 mL ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 mL

2.3 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 0.100 N เตรียมโดยละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 24.820 g ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด 75 ± 25 mL เติมโซเดียมคาร์บอเนต ($NaCO_3$) 0.10 ± 0.01 g ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 mL ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 mL เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา ทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการตรวจสอบความเข้มข้น

2.4 สารละลายมาตรฐานไอโอดีน 0.100 N เตรียมโดย ชั่งไอโอดีน 12.7 g และโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.1 g ผสมให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่นประมาณ 50 mL ทิ้งสารละลายไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะเพื่อให้แน่ใจว่าของแข็งละลายหมด ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 mL ให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 mL เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชาตรวจสอบความเข้มข้น กับสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N

2.5 สารละลายแบ็ง เตรียมโดยชั่งแบ็ง 1.0 g ในน้ำเย็น 5–10 mL คนสารละลายพร้อมกับเติมน้ำกลั่นเพิ่มอีก 25 ± 5 mL เทสารละลายลงในน้ำเดือด 1 ลิตรแล้วต้มต่อให้เดือด อีก 4-5 นาที น้ำแบ็งที่ได้จะใช้ภายในวันที่เตรียมเท่านั้น

3. การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย

3.1 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

ใช้ปิเปตดูดสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต 25 mL ใส่ในขวดรูปชมพู่ จากนั้นเติมโปแตสเซียมไอโอไดด์ 2.0 g เขย่าจนละลาย ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 mL ลงในขวดรูปชมพู่แล้วไตเตรตทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N สีของสารละลายไอโอดีนจางลงจนกระทั่ง เป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด End Point) หยดน้ำแบ็ง 2-3 หยด สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ทำการไทเทรตอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตโดยใช้สูตร

$$N_1 = (P.R) / S$$

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (N)

P = ปริมาตรสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (mL)

R = ความเข้มข้นสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (N)

S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ (mL)

3.2 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ใช้ปิเปตดูดสารละลายไอโอดีน 25 mL ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วไทเทรตทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N เมื่อสีของสารละลายไอโอดีนจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด End Point) หยดน้ำแบ็ง 2–3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการไทเทรตซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายไอโอดีนโดยใช้สูตร

$$N_2 = (S \cdot N_1) / L$$

- เมื่อ N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)
 S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ (mL)
 N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (N)
 L = ปริมาตรสารละลายไอโอดีน (mL)

4. วิธีการหาค่าไอโอดีนนมเบอร์

4.1 บดถ่านกัมมันต์ที่ต้องการทดสอบค่า Iodine No. ให้ละเอียด จนสามารถร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 100 mesh ได้ 95% และสามารถร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 325 mesh ได้ 60%

4.2 นำถ่านกัมมันต์ที่บดแล้วมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110–120 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

4.3 ชั่งและบันทึกน้ำหนักของถ่านตัวอย่าง ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 ใส่ในขวดรูปชมพู่ 250 mL

หมายเหตุ ต้องชั่งน้ำหนัก 3 ค่าตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่า C มีค่า น้อยกว่า, เท่ากับ และมากกว่า 0.02

4.4 ปิเปต 5% สารละลายไฮโดรคลอริกเจือจาง จำนวน 10 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ปิดจุกเขย่าเบาๆ เพื่อให้ตัวอย่างเปิดตัวอย่างทั่วถึง เปิดจุกแล้วนำไปตั้งบน hot plate ในตู้ดูดควัน จนกระทั่งสารละลายเดือด ปล่อยให้เดือดต่อประมาณ 30 ± 2 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ หลังจากนั้นนำตัวอย่างออก ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

4.5 ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.100 N จำนวน 100 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดจุกขวดทันที และเขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 30 ± 1 วินาที เปิดจุกแล้วกรองสารละลายผ่านกระดาษกรองพับจีบเบอร์ 42 และเบอร์ที่เท่าเทียมกัน

4.6 ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 mL ใส่ลงในขวดเปล้ารูปชมพู่ ทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N จนกระทั่งเปลี่ยนสีเหลืองอ่อน หยดน้ำแบ่ง 2 mL ทำการไทเทรตต่อจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

4.7 คำนวณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับโดยตัวดูดซับ (C) จากสูตร

$$C = (N_2 \times S) / F$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายไอโอดีนหลังการดูดซับ (N)

N_2 = ความเข้มข้นของสารละลาย (N)

S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (mL)

F = ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ในการไทเทรต (mL)

ค่า C ที่ได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.008-0.0334 N ถ้าไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องทำการทดลองใหม่โดยการเปลี่ยนน้ำหนักของถ่านตัวอย่าง โดยถ้าค่า C น้อยกว่าที่กำหนดต้องลดปริมาณถ่านตัวอย่างลง ถ้าค่า C มากกว่าที่กำหนดต้องเพิ่มปริมาณถ่านตัวอย่าง จนได้ค่า C อยู่ในช่วงดังกล่าว

4.8 คำนวณหาค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) จากสูตร

$$X/M = A - (2.2 B \times S) / M$$

เมื่อ X/M = ค่าการดูดซับจำเพาะ (mg/g)

A = $N_1 \times 12693.0$

B = $N_2 \times 126.93$

S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต (mL)

M = น้ำหนักของถ่านตัวอย่าง (g)

นำค่า X/M ที่ได้ทั้งสามค่ามาสร้างกราฟระหว่างแกน x คือ log C แกน y คือ log [X/M] จะได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ตำแหน่งที่ C = 0.02 หรือ log C = - 1.699 จะทราบค่าบนแกน y สมมติเท่ากับ Y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า I_2 No. ดังนี้

$$I_2 \text{ No.} = 10^Y$$

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ ASTM D 4607-86

M (g)				M (g)			
E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1570	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.386
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.779	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.660	0.567	2750	0.411	0.360	0.309



ภาคผนวก ข
บันทึกผลการทดลองหาค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองหาค่า Iodine number ของแกลบที่ผ่านกระบวนการเผาให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Example	Conc. Na ₂ S ₂ O ₃ (N ₁)	Conc. I ₂ (N ₂)	A	B	Wt of sample M (g)	Vol. of Na ₂ S ₂ O ₃ (mL)	C	X/M (mg/g)	log C	log X/M	I ₂ No. (mg/g)
ถ่านแกลบ ครั้งที่ 1	1.0000	0.0952	1269.3	12.0837	32.4153	7.1	0.0135	33.3347	-1.8697	1.5229	34.6872
					29.5827	9.5	0.0181	34.3698	-1.7423	1.5362	
					27.1467	11.9	0.0227	35.1036	-1.6440	1.5454	
ถ่านแกลบ ครั้งที่ 2	1.0000	0.0952	1269.3	12.0837	33.1875	6.95	0.0132	32.6792	-1.8794	1.5143	34.5246
					29.9872	9.3	0.0177	34.0835	-1.7520	1.5325	
					27.5248	11.6	0.0221	34.9112	-1.6556	1.5430	
ถ่านแกลบ ครั้งที่ 3	1.0000	0.0952	1269.3	12.0837	32.7481	7.0	0.0133	33.0770	-1.8761	1.5195	34.9402
					29.7625	9.3	0.0177	34.3408	-1.7520	1.5358	
					27.0124	11.7	0.0223	35.4750	-1.6517	1.5499	

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองหาค่า Iodine number ของถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Example	Conc. Na ₂ S ₂ O ₃ (N ₁)	Conc. I ₂ (N ₂)	A	B	Wt of sample M (g)	Vol. of Na ₂ S ₂ O ₃ (mL)	C	X/M (mg/g)	log C	log X/M	I ₂ No. (mg/g)
NaOH : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 1	0.0997	0.0940	1265.4912	11.9314	3.7665	9.70	0.0182	268.3860	-1.7399	2.4287	277.0767
					3.3007	11.90	0.0224	288.7654	-1.6498	2.4605	
					2.8358	15.00	0.0282	307.4109	-1.5498	2.4877	
NaOH : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 2	0.0997	0.0949	1265.4912	12.0456	3.8374	8.50	0.0161	271.0792	-1.7932	2.4331	275.6767
					3.5826	10.50	0.0199	275.5649	-1.7011	2.4402	
					3.3130	12.75	0.0242	279.9918	-1.6162	2.4471	
NaOH : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 3	0.0988	0.0941	1254.0684	11.9441	3.7660	9.50	0.0179	266.7118	-1.7471	2.4260	275.4229
					3.3055	11.90	0.0223	284.7896	-1.6517	2.4545	
					2.8352	15.00	0.0282	303.2989	-1.5498	2.4819	
NaOH : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 1	0.1002	0.0970	1271.8386	12.3122	4.6257	7.20	0.0140	232.7893	-1.8539	2.3670	275.7401
					3.8478	9.00	0.0175	267.1806	-1.7570	2.4268	
					3.0698	12.90	0.0250	300.4818	-1.6021	2.4778	
NaOH : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 2	0.0982	0.0974	1246.4526	12.3630	4.6251	7.50	0.0146	225.3926	-1.8356	2.3529	274.7262
					3.8470	9.40	0.0183	257.5476	-1.7375	2.4109	
					3.0690	11.80	0.0230	301.5670	-1.6383	2.4794	
NaOH : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 3	0.0990	0.0935	1256.6070	11.8680	4.6255	7.40	0.0138	229.8986	-1.8601	2.3615	276.2822
					3.8478	9.20	0.0172	264.1506	-1.7644	2.4219	
					3.0695	13.00	0.0243	298.8051	-1.6142	2.4754	

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาค่า Iodine number ของถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Example	Conc. Na ₂ S ₂ O ₃ (N ₁)	Conc. I ₂ (N ₂)	A	B	Wt of sample M (g)	Vol. of Na ₂ S ₂ O ₃ (mL)	C	X/M (mg/g)	log C	log X/M	I ₂ No. (mg/g)
NaOH : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 1	0.0982	0.0953	1246.4526	12.0964	2.5103	6.50	0.0124	427.6278	-1.9066	2.6311	474.1728
					2.2009	9.45	0.0180	460.2519	-1.7440	2.6630	
					1.8902	12.00	0.0229	490.4812	-1.6402	2.6906	
NaOH : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 2	0.0988	0.0960	1254.0684	12.1853	2.5110	7.20	0.0138	422.5620	-1.8601	2.6259	465.1574
					2.2001	9.80	0.0188	450.5947	-1.7258	2.6537	
					1.8909	12.20	0.0234	490.2506	-1.6308	2.6904	
NaOH : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 3	0.0992	0.0938	1259.1456	11.9060	2.5101	8.00	0.0150	418.1507	-1.8239	2.6213	464.7292
					2.2003	10.10	0.0189	452.0267	-1.7235	2.6552	
					1.8905	12.40	0.0233	494.2343	-1.6326	2.6939	
NaOH : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 1	0.0992	0.0946	1259.1456	12.0076	2.5109	6.40	0.0121	434.1386	-1.9172	2.6376	463.4469
					2.2001	9.75	0.0184	455.2442	-1.7352	2.6582	
					1.8908	13.30	0.0252	480.1161	-1.5986	2.6813	
NaOH : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 2	0.0990	0.0935	1256.6070	11.8680	2.5105	6.90	0.0129	428.7794	-1.8894	2.6322	463.0789
					2.2001	9.50	0.0178	458.4182	-1.7504	2.6613	
					1.8908	13.6	0.0254	476.7910	-1.5952	2.6783	
NaOH : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 3	0.0992	0.0946	1259.1456	12.0076	2.5101	6.50	0.0123	433.2246	-1.9104	2.6327	470.3932
					2.2007	9.20	0.0174	461.7222	-1.7593	2.6644	
					1.8901	13.00	0.0246	484.4868	-1.6091	2.6853	

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองหาค่า Iodine number ของถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $350\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Example	Conc. $Na_2S_2O_3$ (N_1)	Conc. I_2 (N_2)	A	B	Wt of sample M (g)	Vol. of $Na_2S_2O_3$ (mL)	C	X/M (mg/g)	log C	log X/M	I_2 No. (mg/g)
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 1	0.0988	0.0941	1254.0684	11.9441	5.6351	7.90	0.0149	185.7074	-1.8268	2.2688	207.2049
					5.0403	9.55	0.0154	199.0205	-1.7447	2.2989	
					4.0387	13.20	0.0214	224.6296	-1.6055	2.3515	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 2	0.0992	0.0955	1259.1456	12.1218	5.6464	7.20	0.0149	188.9940	-1.8601	2.2764	203.9858
					4.9163	10.05	0.0154	201.6012	-1.7167	2.3045	
					4.6736	11.0	0.0214	206.6496	-1.6778	2.3152	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 3	0.0992	0.0938	1259.1456	11.9060	5.6353	8.20	0.0154	185.3249	-1.8125	2.2679	206.3954
					4.9351	10.00	0.0188	200.4445	-1.7258	2.3020	
					4.0382	13.20	0.0248	226.1887	-1.6055	2.3545	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 1	0.1002	0.0934	1271.8386	11.8553	3.7667	8.30	0.0155	280.1817	-1.8097	2.4474	308.9584
					3.3002	10.20	0.0191	304.7710	-1.7190	2.4840	
					2.8355	12.85	0.0240	330.3434	-1.6198	2.5190	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 2	0.0995	0.0974	1262.9535	12.3630	4.2321	6.90	0.0134	254.0779	-1.8729	2.4050	286.8798
					3.7663	8.95	0.0183	270.6970	-1.7595	2.4325	
					3.3002	10.80	0.0210	293.6818	-1.6778	2.4325	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 3	0.0995	0.0974	1262.9535	12.3630	4.2320	7.50	0.0146	250.2278	-1.8356	2.3983	288.6024
					3.7660	9.00	0.0175	270.3574	-1.7570	2.4319	
					3.3003	10.70	0.0208	294.4970	-1.6817	2.4691	

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่า Iodine number ของถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

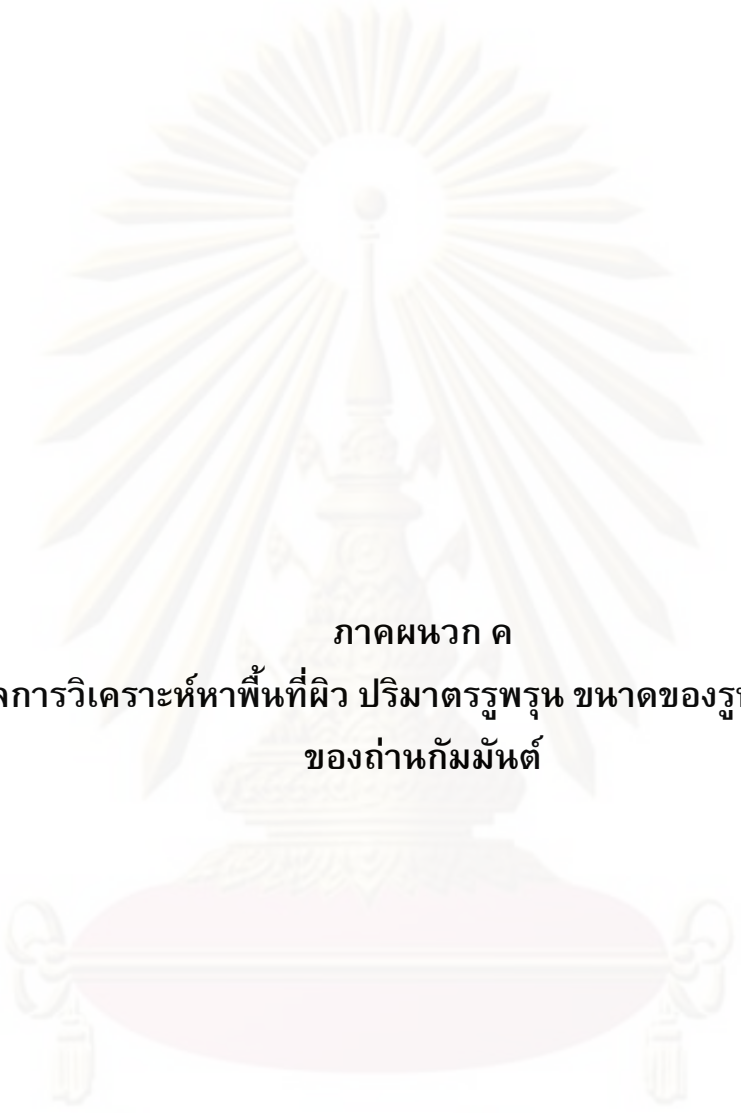
Example	Conc. $Na_2S_2O_3$ (N_1)	Conc. I_2 (N_2)	A	B	Wt of sample M (g)	Vol. of $Na_2S_2O_3$ (mL)	C	X/M (mg/g)	log C	log X/M	I_2 No. (mg/g)
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 1	0.1004	0.0936	1274.3772	11.8806	5.6358	9.90	0.0185	180.2083	-1.7328	2.2558	187.1113
					5.0407	11.35	0.0212	193.9649	-1.6737	2.2877	
					4.0385	16.10	0.0301	211.3574	-1.5214	2.3250	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 2	0.0987	0.0884	1252.7991	11.2206	5.6351	9.50	0.0168	180.7046	-1.7747	2.2570	194.2674
					5.0403	11.20	0.0198	193.7035	-1.7033	2.2871	
					4.3399	13.75	0.0243	210.4602	-1.6144	2.3232	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 3	0.1000	0.0972	1269.3000	12.3376	6.3883	7.10	0.0138	168.5248	-1.8601	2.2267	178.1968
					5.6358	10.00	0.0194	177.0597	-1.7122	2.2481	
					4.3393	16.20	0.0315	191.1802	-1.5017	2.2814	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 1	0.0982	0.0966	1246.4526	12.2614	4.6255	8.05	0.0156	222.5279	-1.8068	2.3474	241.0460
					3.7668	11.50	0.0222	248.5502	-1.6536	2.3954	
					3.3007	14.00	0.0270	263.2173	-1.5686	2.4203	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 2	0.0982	0.0966	1246.4526	12.2614	4.6257	8.20	0.0158	221.6436	-1.8013	2.3457	235.8305
					3.7667	12.00	0.0232	244.9761	-1.6345	2.3891	
					3.3005	14.50	0.0280	259.1467	-1.5528	2.4135	
H_3PO_4 : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 3	0.0982	0.0966	1246.4526	12.2614	4.6252	8.00	0.0155	221.8402	-1.8097	2.3480	240.4363
					3.7661	12.00	0.0232	245.0266	-1.6345	2.3892	
					3.3007	13.50	0.0261	267.3182	-1.5833	2.4270	

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองหาค่า Iodine number ของถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Example	Conc. $Na_2S_2O_3$ (N_1)	Conc. I_2 (N_2)	A	B	Wt of sample M (g)	Vol. of $Na_2S_2O_3$ (mL)	C	X/M (mg/g)	log C	log X/M	I_2 No. (mg/g)
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 1	0.0990	0.0915	1256.6070	11.6141	6.3886	6.10	0.0112	172.2985	-1.9508	2.2363	202.3019
					5.6356	8.60	0.0157	183.9854	-1.8041	2.2648	
					4.3397	12.80	0.0234	214.1978	-1.6308	2.3308	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 2	0.0990	0.0915	1256.6070	11.6141	6.3886	7.00	0.0128	168.6989	-1.8928	2.2271	204.7859
					5.6353	9.10	0.0167	181.7282	-1.7773	2.2594	
					4.3393	12.10	0.0221	218.3393	-1.6556	2.3391	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 3	0.0990	0.0915	1256.6070	11.6141	6.3882	7.50	0.0137	166.7096	-1.8633	2.2220	201.8366
					5.6358	9.30	0.0170	180.8053	-1.7696	2.2572	
					4.3392	12.30	0.0225	217.1667	-1.6478	2.3368	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 1	0.1002	0.0970	1271.8386	12.3122	3.7662	7.30	0.0142	287.1441	-1.8477	2.4581	325.1622
					3.3001	9.10	0.0177	313.4739	-1.7520	2.4962	
					2.8354	11.80	0.0229	340.0136	-1.6402	2.5315	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 2	0.1002	0.0934	1271.8386	11.8553	3.7665	7.10	0.0133	288.5062	-1.8761	2.4602	331.2836
					3.3004	9.20	0.0172	312.6551	-1.7645	2.4951	
					2.8354	11.60	0.0217	341.8533	-1.6635	2.5338	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 3	0.1002	0.0934	1271.8386	11.8553	3.7668	7.10	0.0133	288.4832	-1.8761	2.4601	337.8314
					3.3003	8.90	0.0166	315.0355	-1.7799	2.4984	
					2.8353	11.30	0.0211	344.6250	-1.6757	2.5373	

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองหาค่า Iodine number ของถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ เป็น เวลา 1 ชั่วโมง

Example	Conc. $Na_2S_2O_3$ (N_1)	Conc. I_2 (N_2)	A	B	Wt of sample M (g)	Vol. of $Na_2S_2O_3$ (mL)	C	X/M (mg/g)	log C	log X/M	I_2 No. (mg/g)
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 1	0.1000	0.0972	1269.3000	12.3376	4.6255	5.20	0.0101	243.8997	-1.9957	2.3872	277.8433
					3.8484	8.95	0.0174	266.7012	-1.7595	2.4260	
					3.2958	11.80	0.0229	287.9471	-1.6402	2.4593	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 2	0.0993	0.0921	1260.4149	11.6903	3.7666	10.30	0.0190	264.3000	-1.7212	2.4221	271.2064
					3.3009	12.20	0.0225	286.7845	-1.6478	2.4576	
					2.8359	15.20	0.0280	306.6013	-1.5528	2.4866	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 1 : 1 ครั้งที่ 3	0.0993	0.0921	1260.4149	11.6903	3.7663	9.70	0.0179	268.4182	-1.7471	2.4288	273.5899
					3.3006	12.90	0.0238	281.3560	-1.6234	2.4493	
					2.8356	16.25	0.0291	297.1103	-1.5243	2.4729	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 1	0.0990	0.0941	1256.6070	11.9441	2.2595	6.90	0.0130	475.8998	-1.8861	2.6775	529.4196
					1.9808	9.30	0.0175	511.0213	-1.7570	2.7084	
					1.7012	12.25	0.0231	549.4437	-1.6364	2.7399	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 2	0.0995	0.0976	1262.9535	12.3884	1.9802	7.10	0.0139	540.0699	-1.8570	2.7324	597.9984
					1.7014	9.50	0.0185	590.1233	-1.7328	2.7709	
					1.4221	13.10	0.0256	637.0742	-1.5918	2.8042	
ZnCl ₂ : ถ่านแกลบ 2 : 1 ครั้งที่ 3	0.0995	0.0976	1262.9535	12.3884	1.9803	7.20	0.0140	538.6664	-1.8536	2.7313	590.7449
					1.7017	9.90	0.0193	583.6128	-1.7144	2.7661	
					1.4223	13.30	0.0259	633.1074	-1.5867	2.8015	



ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูปทรง ขนาดของรูปทรงเฉลี่ย
ของถ่านกัมมันต์

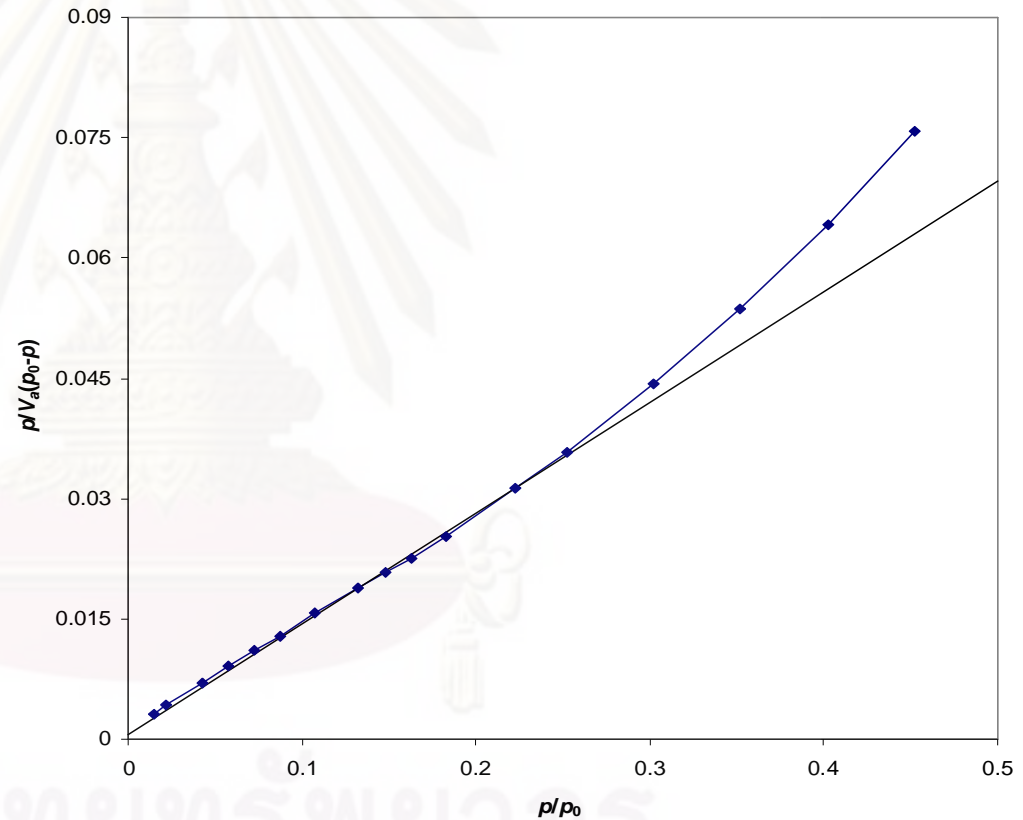
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C ตามสมการ BET

Slope	0.1379
Intercept	0.00053642
Correlation coefficient	0.9991
V_m	7.2228 cm ³ (STP)/g
$a_{s,BET}$	31.437 m ² /g
C	258.1
Total pore volume	0.037971 cm ³ /g
($p/p_0=0.990$)	
Average pore diameter	4.8314 nm

No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$	No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$
1	0.014545	0.0031548	9	0.1478	0.020720
2	0.021634	0.0041851	10	0.1628	0.022598
3	0.042944	0.0070628	11	0.1829	0.025317
4	0.057484	0.0090973	12	0.2226	0.031342
5	0.072458	0.0110550	13	0.2526	0.035772
6	0.087480	0.0128870	14	0.3024	0.044280
7	0.107800	0.0156610	15	0.3523	0.053576
8	0.132200	0.0187680	16	0.4024	0.064112

BET-Plot

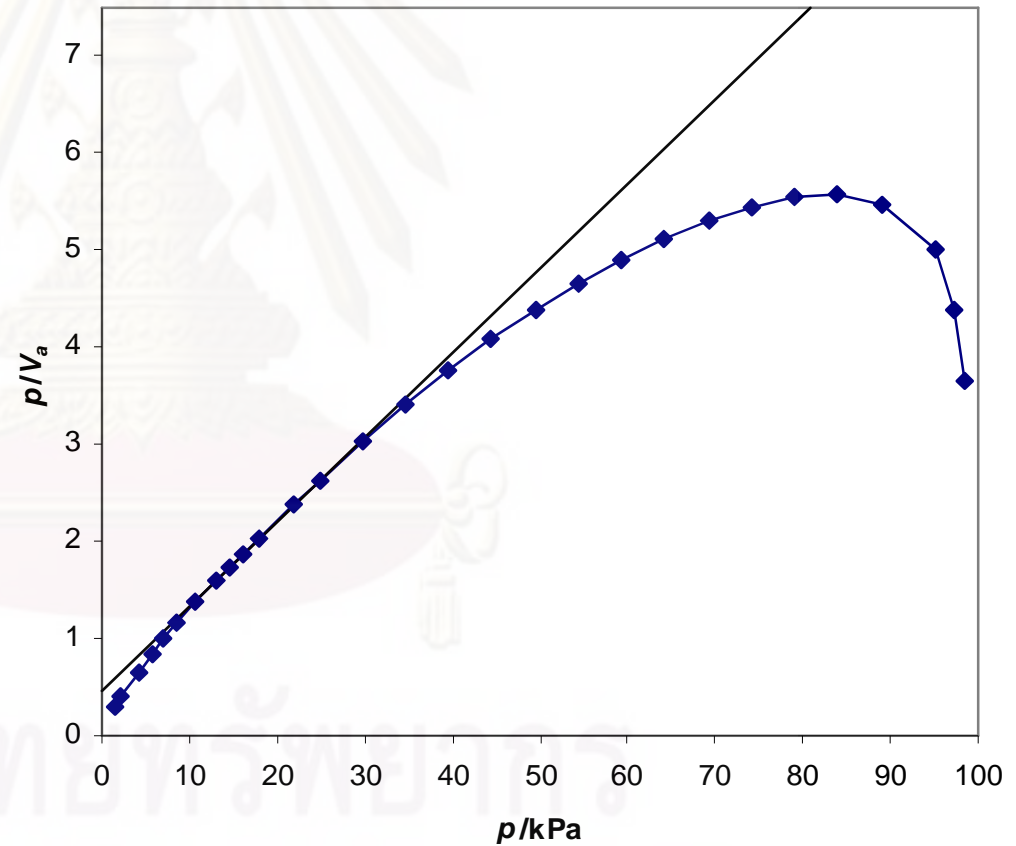


ตารางที่ ค.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C ตามสมการ Langmuir

Slope	0.086968
Intercept	0.4677
Correlation coefficient	0.9997
V_m	11.499 cm ³ (STP)/g
$a_{s,Lang}$	350.047 m ² /g
B	0.1859

No	p/kPa	p/V_a	No	p/kPa	p/V_a
1	1.4231	0.3042	14	29.743	3.0378
2	2.1184	0.4009	15	34.663	3.4137
3	4.2083	0.6624	16	39.595	3.7706
4	5.6355	0.8406	17	44.510	4.0887
5	7.1073	1.0058	18	49.438	4.3770
6	8.5833	1.1538	19	54.374	4.6661
7	10.576	1.3714	20	59.302	4.8929
8	12.983	1.5991	21	64.255	5.1179
9	14.516	1.7339	22	69.175	5.3048
10	15.996	1.8585	23	74.111	5.4537
11	17.976	2.0326	24	79.051	5.5521
12	21.879	2.3952	25	83.963	5.5864
13	24.839	2.6285	26	89.122	5.4747

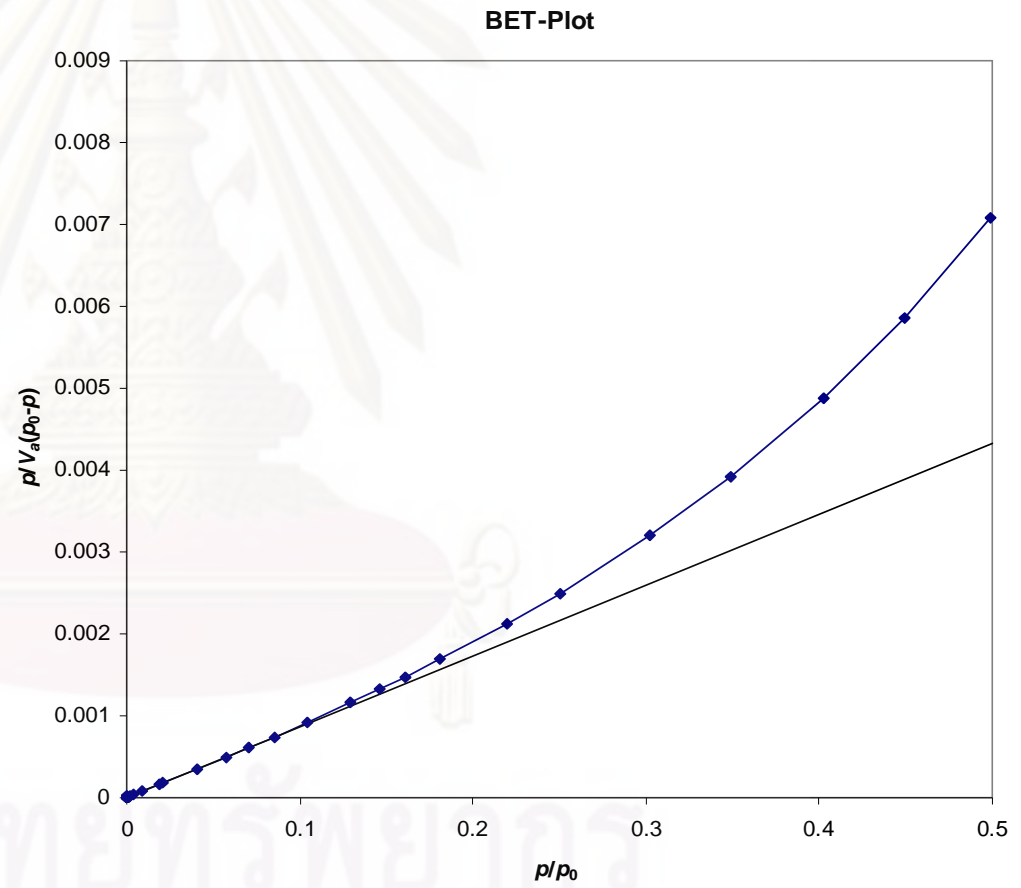
Langmuir-Plot



ตารางที่ ค.3 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C ตามสมการ BET

Slope 0.0086678
 Intercept 0.0000012404
 Correlation coefficient 0.9999
 V_m 115.35 cm³(STP)/g
 $a_{s,BET}$ 502.07 m²/g
 C 698.89
Total pore volume 0.4341 cm³/g
 ($p/p_0=0.990$)
Average pore diameter 3.4587 nm

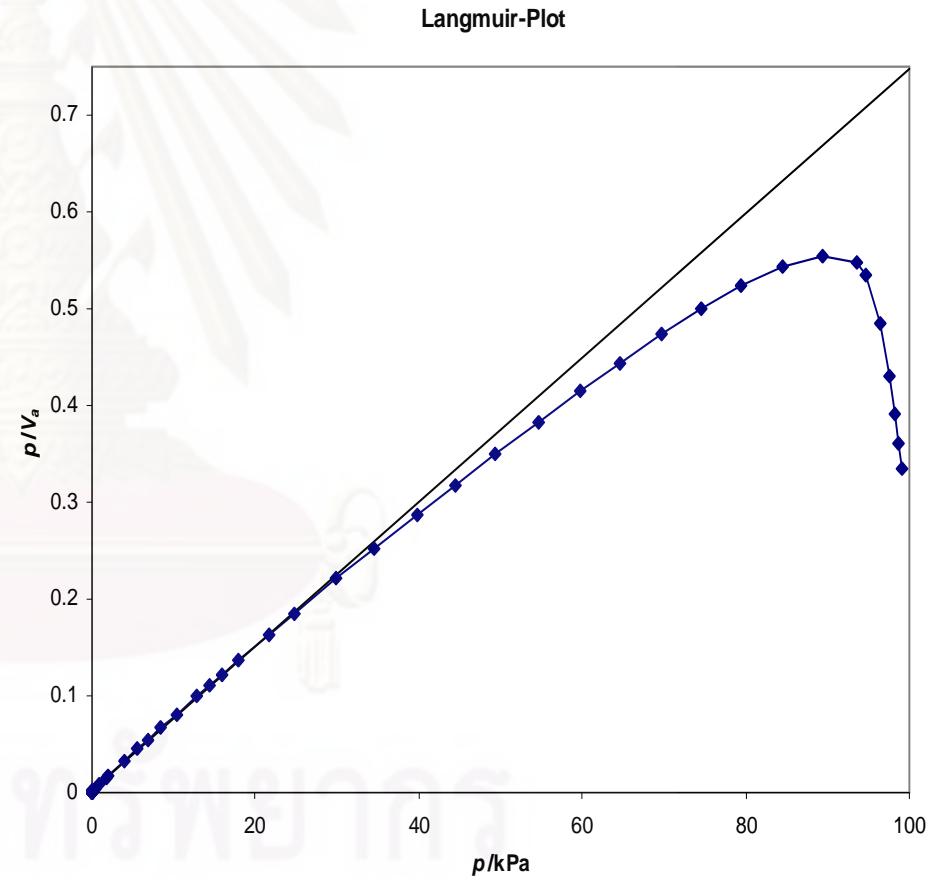
No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$	No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$
1	0.001656	0.00001661	11	0.1297	0.0011566
2	0.004306	0.00004040	12	0.1463	0.0013214
3	0.009352	0.00008414	13	0.1615	0.0014772
4	0.018982	0.00016589	14	0.1812	0.0016863
5	0.021209	0.00018429	15	0.2196	0.0021219
6	0.040367	0.00034664	16	0.2504	0.0024970
7	0.057243	0.00049157	17	0.3026	0.0032042
8	0.070102	0.00060397	18	0.3494	0.0039254
9	0.085081	0.00073752	19	0.4026	0.0048699
10	0.1048	0.00091908	20	0.4495	0.0058483



ตารางที่ ค.4 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C ตามสมการ Langmuir

Slope 0.074546
 Intercept 0.0032242
 Correlation coefficient 0.9999
 V_m 134.15 cm³ (STP)/g
 $a_{s,Lang}$ 583.87 m²/g
 B 2.3121

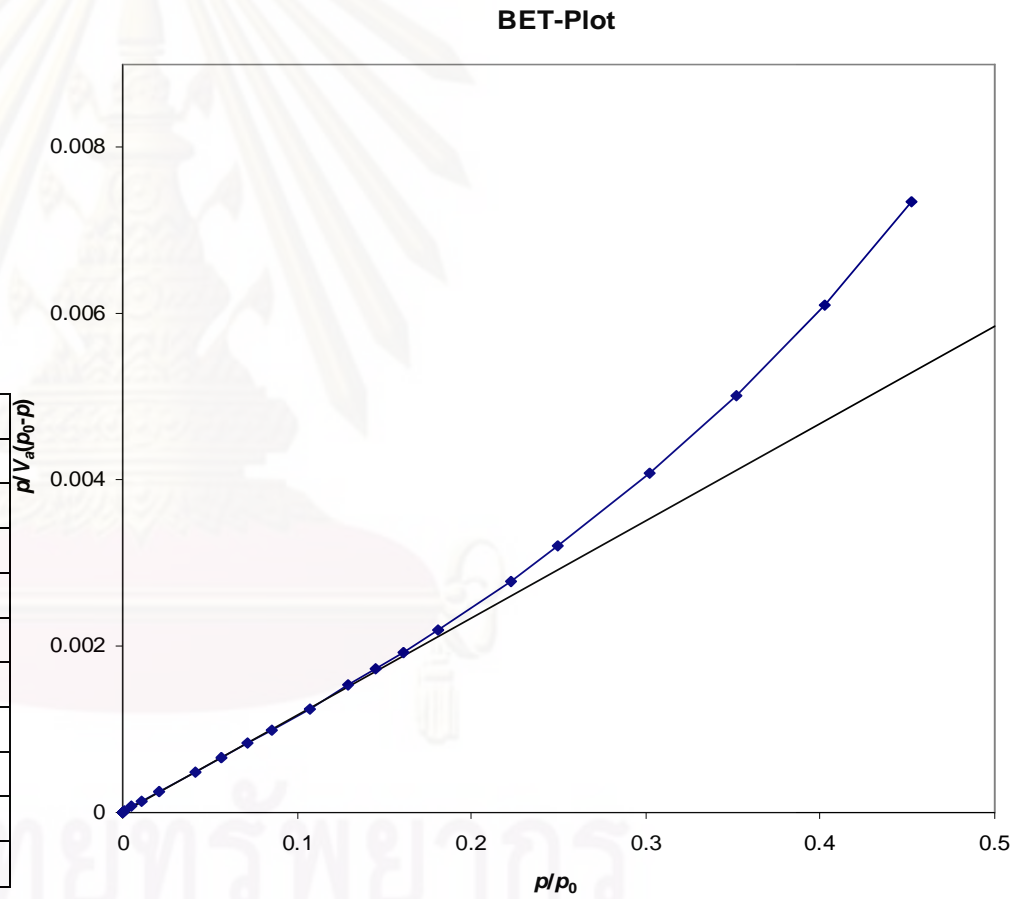
No	p/kPa	p/V _a	No	p/kPa	p/V _a	No	p/kPa	p/V _a
1	0.1626	0.001628	13	15.938	0.1222	25	69.642	0.4730
2	0.4228	0.003950	14	17.885	0.1362	26	74.581	0.4996
3	0.9188	0.008189	15	21.678	0.1634	27	79.468	0.5233
4	1.8662	0.016000	16	24.720	0.1848	28	84.579	0.5438
5	2.0857	0.017739	17	29.887	0.2207	29	89.291	0.5547
6	3.9722	0.032733	18	34.518	0.2523	30	93.479	0.5468
7	5.6351	0.045621	19	39.795	0.2876	31	94.739	0.5338
8	6.9036	0.055308	20	44.450	0.3183	32	96.544	0.4851
9	8.3835	0.066488	21	49.394	0.3505	33	97.549	0.4298
10	10.335	0.081097	22	54.659	0.3836	34	98.248	0.3913
11	12.787	0.099255	23	59.717	0.4148	35	98.630	0.3605
12	14.429	0.111300	24	64.681	0.4445			



ตารางที่ ค.5 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 350 °C ตามสมการ BET

Slope 0.011705
 Intercept 0.0000054319
 Correlation coefficient 0.9999
 V_m 85.392 cm³ (STP)/g
 $a_{s,BET}$ 371.67 m²/g
 C 2155.9
Total pore volume 0.2173 cm³/g
 ($p/p_0=0.990$)
Average pore diameter 2.5391 nm

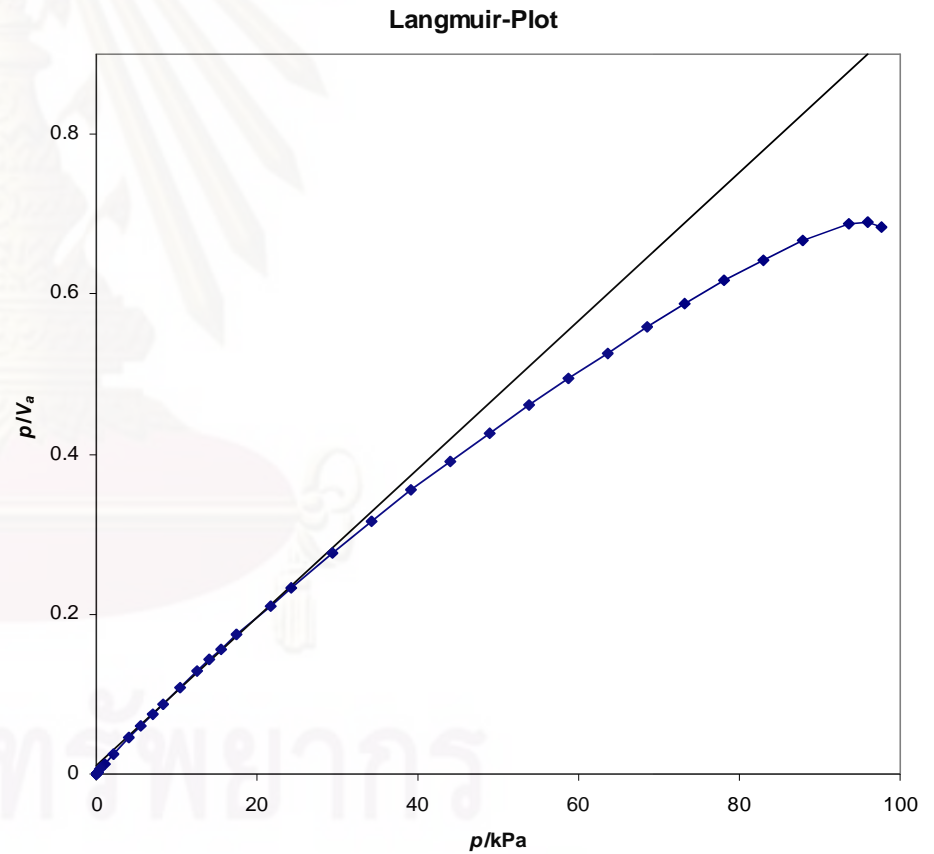
No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$	No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$
1	0.00042	7.6164E-06	11	0.1296	0.0015264
2	0.00147	0.000022641	12	0.1456	0.0017271
3	0.00503	0.000069365	13	0.1609	0.0019250
4	0.01056	0.00013636	14	0.1805	0.0021874
5	0.02111	0.00025889	15	0.2225	0.0027855
6	0.04175	0.0004938	16	0.2499	0.0032020
7	0.05642	0.00065964	17	0.3021	0.0040764
8	0.07203	0.00083722	18	0.3522	0.0050185
9	0.08519	0.00099037	19	0.4022	0.0060958
10	0.10720	0.0012500	20	0.4522	0.0073395



ตารางที่ ค.6 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามสมการ Langmuir

Slope	0.0092708
Intercept	0.010748
Correlation coefficient	0.9997
V_m	$107.87\text{ cm}^3\text{ (STP)/g}$
$a_{s,Lang}$	$469.48\text{ m}^2/\text{g}$
B	0.8626

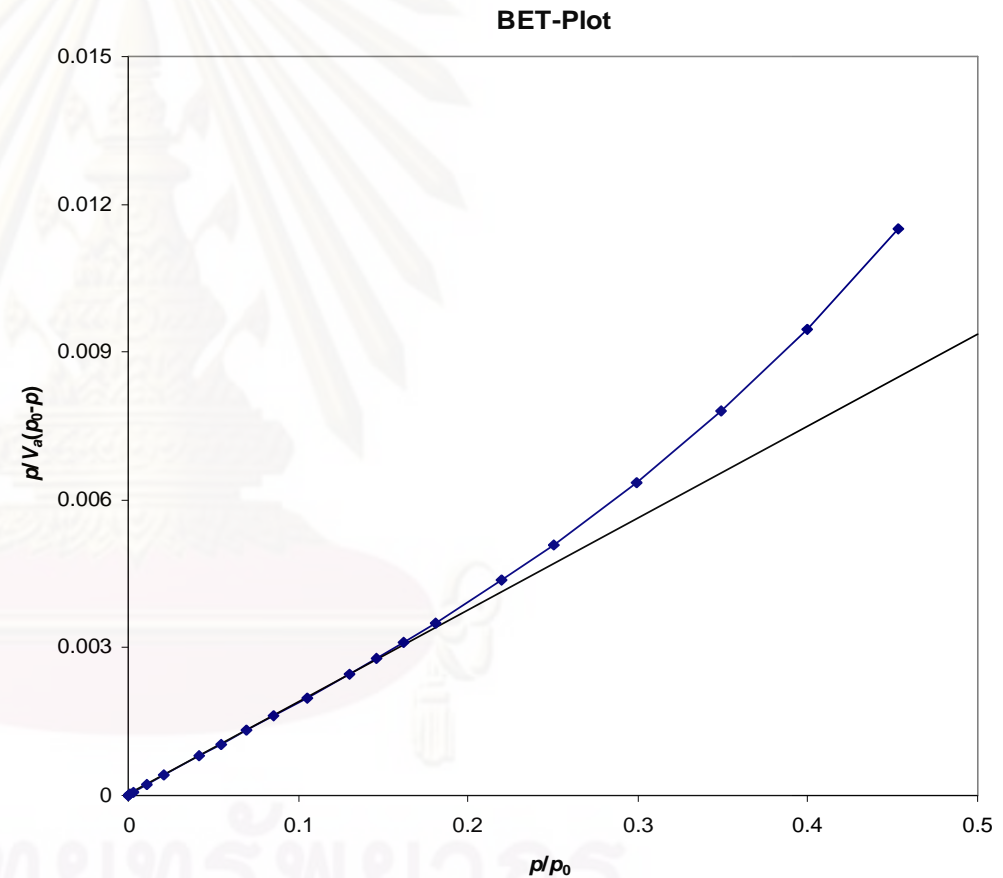
No	p/kPa	p/V_a	No	p/kPa	p/V_a	No	p/kPa	p/V_a
1	0.0040	0.0003182	13	8.266	0.0879	25	48.880	0.4268
2	0.0122	0.0005186	14	10.404	0.1083	26	53.754	0.4613
3	0.0122	0.0003569	15	12.583	0.1290	27	58.631	0.4947
4	0.0243	0.0005454	16	14.133	0.1433	28	63.525	0.5268
5	0.0406	0.0007367	17	15.623	0.1569	29	68.423	0.5583
6	0.1420	0.0021881	18	17.534	0.1741	30	73.292	0.5878
7	0.4869	0.0066815	19	21.620	0.2105	31	78.165	0.6165
8	1.0226	0.0130650	20	24.286	0.2335	32	83.043	0.6431
9	2.0451	0.0245480	21	29.374	0.2766	33	87.876	0.6671
10	4.0456	0.0458550	22	34.248	0.3162	34	93.540	0.6875
11	5.4699	0.0603420	23	39.129	0.3546	35	95.894	0.6897
12	6.9875	0.0753640	24	44.007	0.3913	36	97.704	0.6847



ตารางที่ ค.7 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700^\circ C$ ตามสมการ BET

Slope	0.018633
Intercept	0.00003124
Correlation coefficient	0.9999
V_m	$53.579 \text{ cm}^3 (\text{STP})/\text{g}$
$a_{s,BET}$	$233.20 \text{ m}^2/\text{g}$
C	597.44
Total pore volume	$0.2211 \text{ cm}^3/\text{g}$
$(p/p_0=0.990)$	
Average pore diameter	3.7917 nm

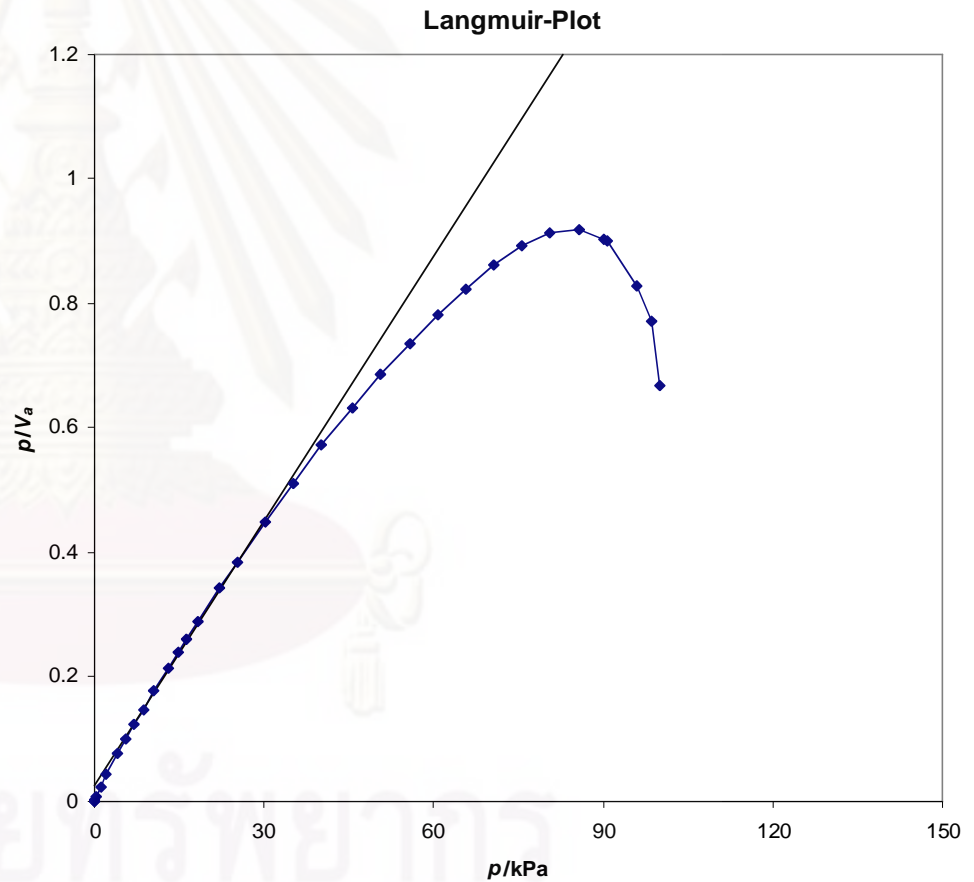
No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$	No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$
1	0.00012096	0.00000543	11	0.1299	0.0024518
2	0.00052421	0.00001630	12	0.1465	0.0027788
3	0.0029431	0.00007228	13	0.1619	0.0030949
4	0.010767	0.00023583	14	0.1814	0.0035061
5	0.021051	0.00043423	15	0.2199	0.0043610
6	0.041335	0.00080875	16	0.2508	0.0050940
7	0.054276	0.0010425	17	0.2996	0.0063635
8	0.069484	0.0013171	18	0.3494	0.0078096
9	0.085181	0.0016041	19	0.3992	0.0094477
10	0.1051	0.0019754	20	0.4532	0.0114990



ตารางที่ ค.8 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^\circ\text{C}$ ตามสมการ Langmuir

Slope 0.014174
 Intercept 0.026929
 Correlation coefficient 0.9996
 V_m 70.553 cm^3 (STP)/g
 $a_{s,Lang}$ 307.08 m^2/g
 B 0.5263

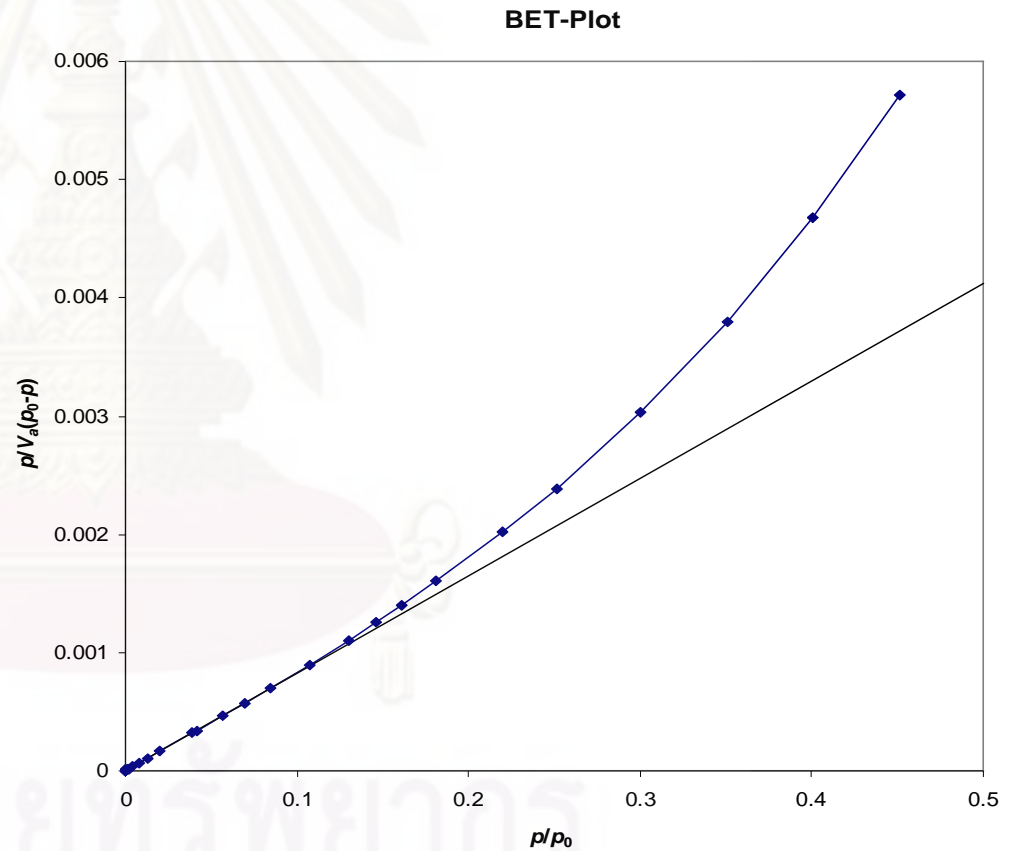
No	p/kPa	p/V_a	No	p/kPa	p/V_a
1	7.0033	0.1235	14	50.670	0.6867
2	8.5845	0.1479	15	55.702	0.7366
3	10.584	0.1781	16	60.701	0.7824
4	13.092	0.2150	17	65.705	0.8245
5	14.755	0.239	18	70.700	0.8617
6	16.307	0.2613	19	75.675	0.8925
7	18.279	0.2891	20	80.597	0.9126
8	22.152	0.3427	21	85.772	0.9188
9	25.266	0.3846	22	90.145	0.9034
10	30.176	0.4490	23	90.657	0.9000
11	35.196	0.5117	24	95.913	0.8278
12	40.207	0.5717	25	98.441	0.7720
13	45.642	0.6332	26	100.12	0.6685



ตารางที่ ค.9 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อุณหภูมิ 350 °C ตามสมการ BET

Slope 0.008244
 Intercept 0.000002318
 Correlation coefficient 0.9999
 V_m 121.27cm³ (STP)/g
 a_{s,BET} 527.81 m²/g
 C 3557.7
Total pore volume 0.2317 cm³/g
 (p/p₀=0.990)
Average pore diameter 1.7561 nm

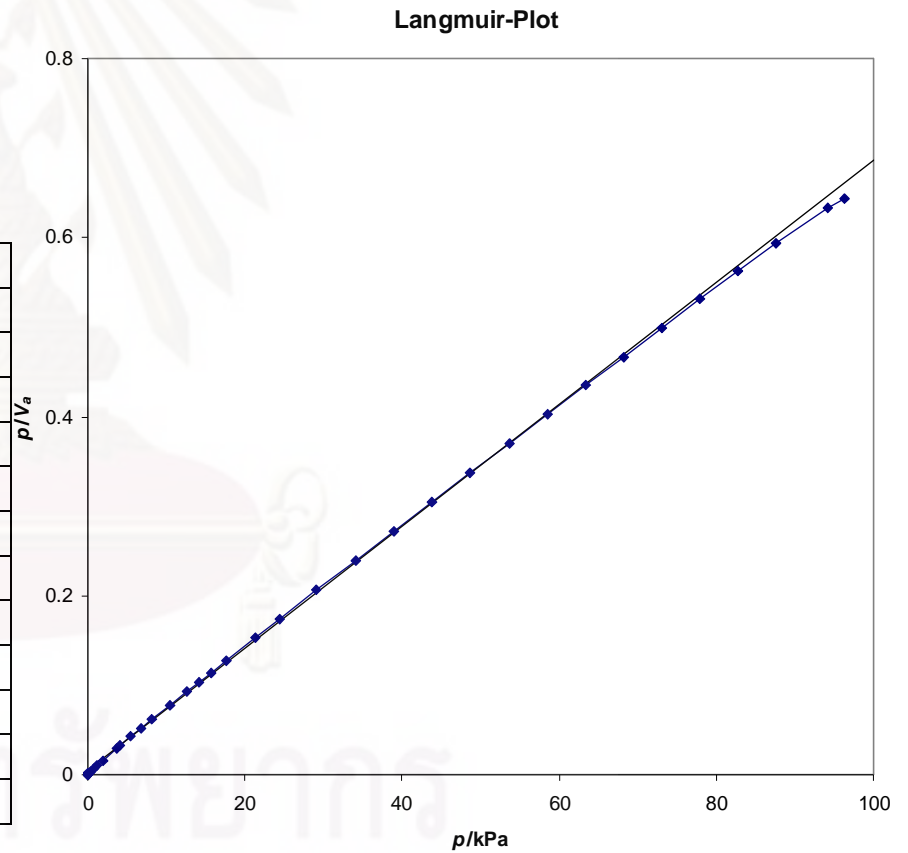
No	p/p ₀	p/V _a (p ₀ -p)	No	p/p ₀	p/V _a (p ₀ -p)
1	0.0036001	0.000034044	11	0.1299	0.0011005
2	0.0076196	0.000068243	12	0.1461	0.0012524
3	0.012599	0.00010921	13	0.1615	0.0014024
4	0.019794	0.0001674	14	0.1814	0.0016055
5	0.038745	0.00031939	15	0.2198	0.0020208
6	0.041714	0.00034311	16	0.2510	0.0023896
7	0.056853	0.00046609	17	0.3000	0.0030312
8	0.069353	0.00056922	18	0.3505	0.0037927
9	0.084523	0.00069706	19	0.4009	0.0046767
10	0.1078	0.00089903	20	0.4512	0.0057189



ตารางที่ ค.10 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ $350\text{ }^{\circ}C$ ตามสมการ Langmuir

Slope 0.00681
 Intercept 0.0055418
 Correlation coefficient 0.9999
 V_m 146.84 cm^3 (STP)/g
 $a_s, Lang$ 639.13 m^2/g
 B 1.2288

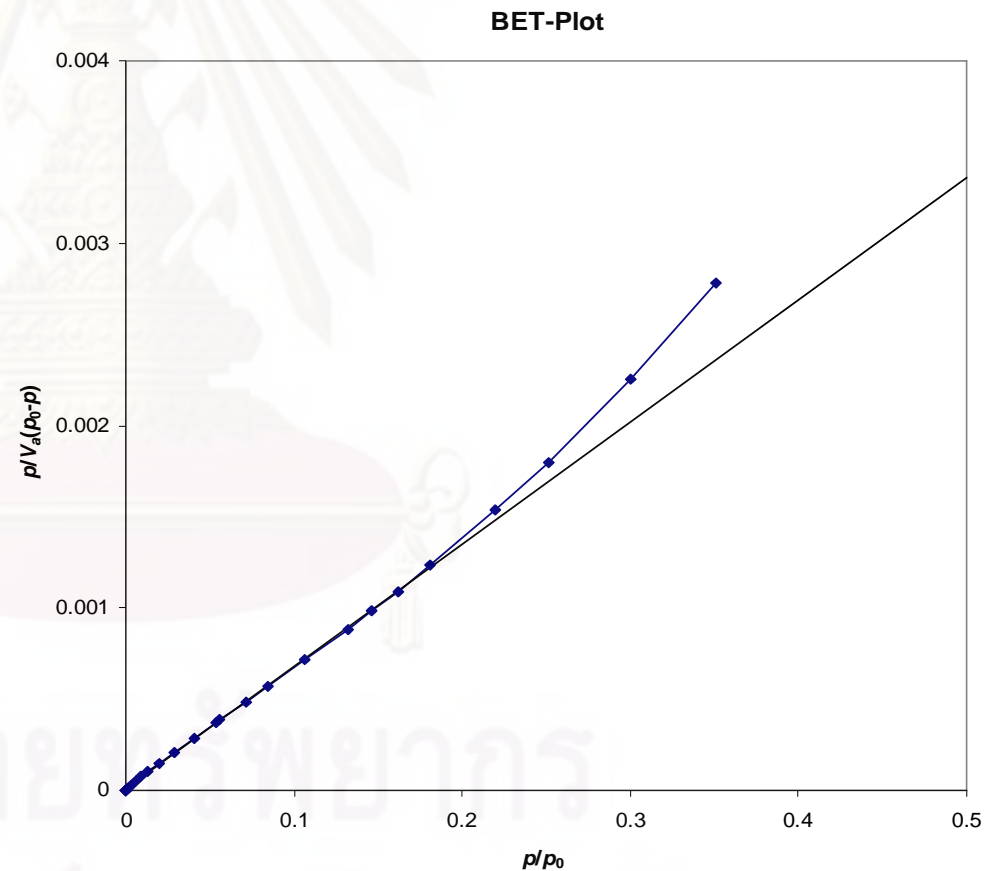
No	p/kPa	p/V_a	No	p/kPa	p/V_a	No	p/kPa	p/V_a
1	0.020286	0.00033676	13	6.7270	0.051383	25	43.839	0.3049
2	0.024344	0.00034835	14	8.1997	0.061908	26	48.716	0.3376
3	0.040573	0.00051074	15	10.456	0.077838	27	53.597	0.3701
4	0.056802	0.00063847	16	12.606	0.092917	28	58.461	0.4024
5	0.1461	0.00149	17	14.176	0.1038	29	63.350	0.4349
6	0.3489	0.0032878	18	15.673	0.1142	30	68.207	0.4669
7	0.7384	0.0065631	19	17.613	0.1276	31	73.067	0.4989
8	1.2212	0.010453	20	21.337	0.1531	32	77.944	0.5308
9	1.9191	0.015909	21	24.372	0.1738	33	82.809	0.5626
10	3.757	0.02977	22	29.135	0.2061	34	87.649	0.5933
11	4.0451	0.031884	23	34.053	0.2393	35	94.254	0.6329
12	5.5138	0.042634	24	38.946	0.2722	36	96.360	0.6428



ตารางที่ ค.11 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ ตามสมการ BET

Slope	0.0067047
Intercept	0.0000092
Correlation coefficient	0.9999
V_m	$148.94\text{cm}^3\text{ (STP)/g}$
a_s, BET	$648.48\text{ m}^2/\text{g}$
C	729.77
Total pore volume	$0.3836\text{ cm}^3/\text{g}$
$(p/p_0=0.990)$	
Average pore diameter	2.367 nm

No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$	No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$
1	0.0032682	0.000029287	11	0.084847	0.00057408
2	0.0059911	0.000050738	12	0.1068	0.00071675
3	0.0092994	0.000075522	13	0.1319	0.00088511
4	0.012818	0.00010113	14	0.1464	0.00098484
5	0.019769	0.00014986	15	0.1617	0.0010928
6	0.028476	0.00020897	16	0.1811	0.0012349
7	0.040484	0.00028832	17	0.2199	0.0015360
8	0.05324	0.00037104	18	0.2511	0.0017985
9	0.055835	0.00038768	19	0.3002	0.0022527
10	0.071395	0.0004875	20	0.3506	0.0027811

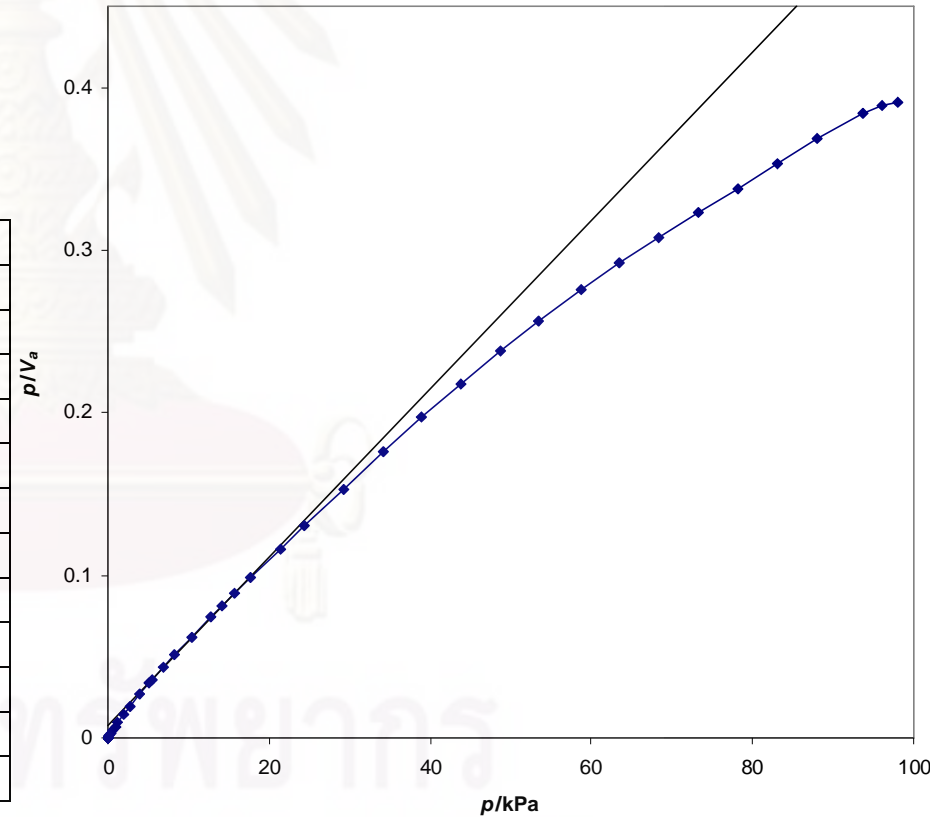


ตารางที่ ค.12 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ ตามสมการ Langmuir

Slope	0.0051673
Intercept	0.007978
Correlation coefficient	0.9998
V_m	$193.52\text{ cm}^3\text{ (STP)/g}$
$a_{s,Lang}$	$842.13\text{ m}^2/\text{g}$
B	0.6477

No	p/kPa	p/V_a	No	p/kPa	p/V_a	No	p/kPa	p/V_a
1	0.077166	0.0008087	13	8.2364	0.050999	25	48.708	0.2380
2	0.1584	0.001522	14	10.365	0.062163	26	53.516	0.2568
3	0.3168	0.0028295	15	12.814	0.074617	27	58.654	0.2758
4	0.5808	0.004889	16	14.223	0.081657	28	63.528	0.2925
5	0.9016	0.0072542	17	15.709	0.089003	29	68.385	0.3082
6	1.2428	0.0096791	18	17.602	0.098275	30	73.275	0.3231
7	1.917	0.014245	19	21.375	0.1165	31	78.250	0.3382
8	2.7617	0.019690	20	24.421	0.1310	32	83.181	0.3535
9	3.9273	0.026837	21	29.205	0.1533	33	88.111	0.3686
10	5.1660	0.034086	22	34.107	0.1757	34	93.663	0.3842
11	5.4178	0.035517	23	38.997	0.1973	35	96.140	0.3894
12	6.9287	0.043933	24	43.826	0.2179	36	97.992	0.3913

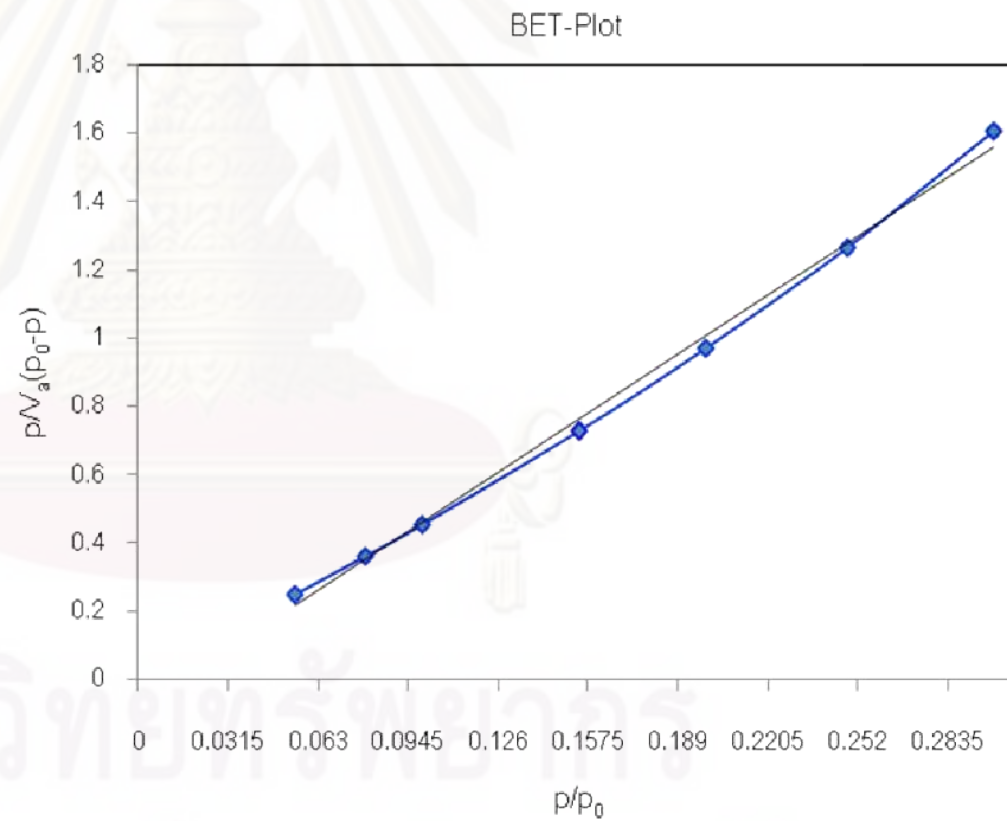
Langmuir-Plot



ตารางที่ ค.13 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจาก กะลามะพร้าว ตามสมการ BET

Slope	0.005491
Intercept	-0.08593
Correlation coefficient	0.9979
V_m	119.70 cm ³ (STP)/g
$a_{s,BET}$	644.30 m ² /g
Total pore volume	0.4393 cm ³ /g
($p/p_0=0.990$)	
Average pore diameter	2.727 nm

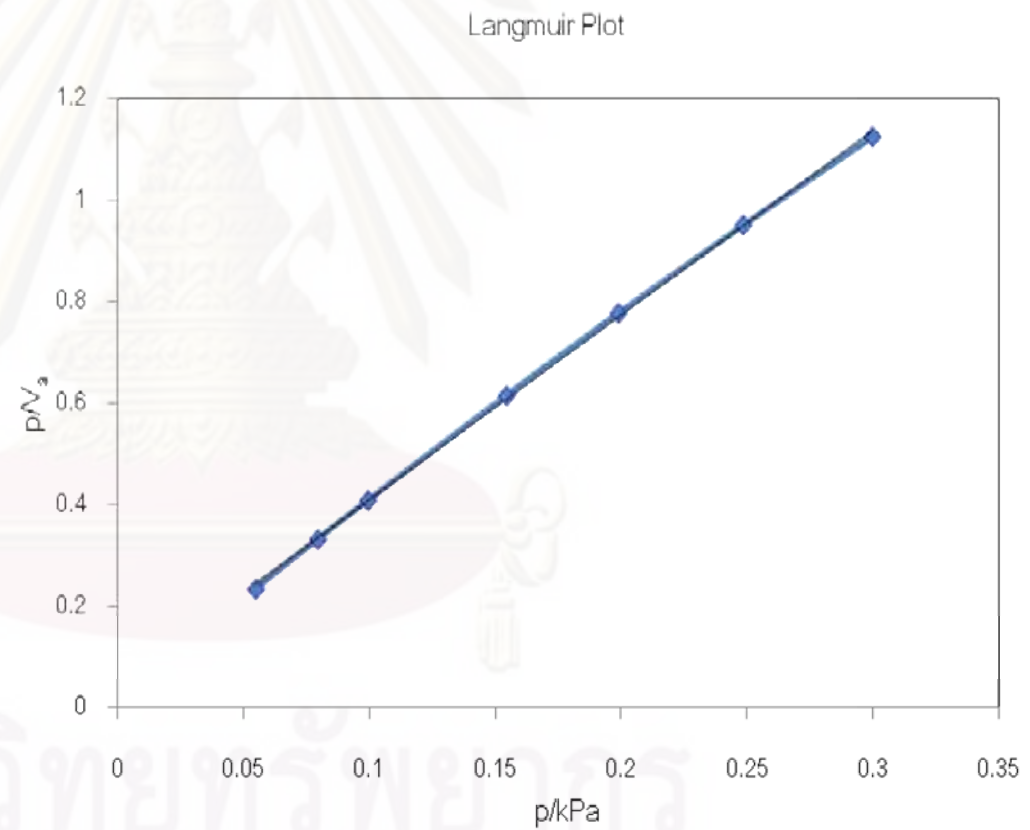
No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$
1	0.054788	0.2483
2	0.079457	0.3609
3	0.099347	0.4538
4	0.15426	0.7270
5	0.19874	0.9691
6	0.24833	1.264
7	0.29954	1.605

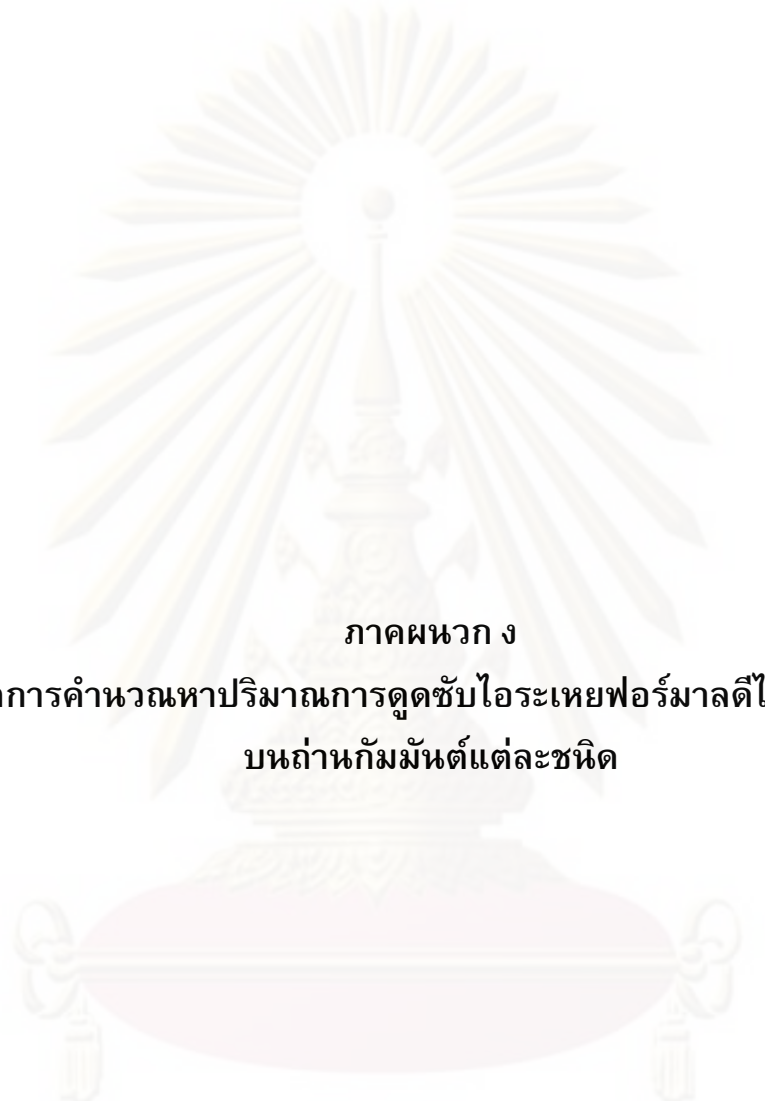


ตารางที่ ค.14 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแกลบที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ตามสมการ Langmuir

Slope	0.003638
Intercept	0.004493
Correlation coefficient	0.9997
$a_{s,Lang}$	$957.3 \text{ m}^2/\text{g}$
B	0.8096

No	p/kPa	p/V_a
1	0.054788	0.2347
2	0.079457	0.3322
3	0.099347	0.4087
4	0.15426	0.6149
5	0.19874	0.7765
6	0.24833	0.9502
7	0.29954	1.1240



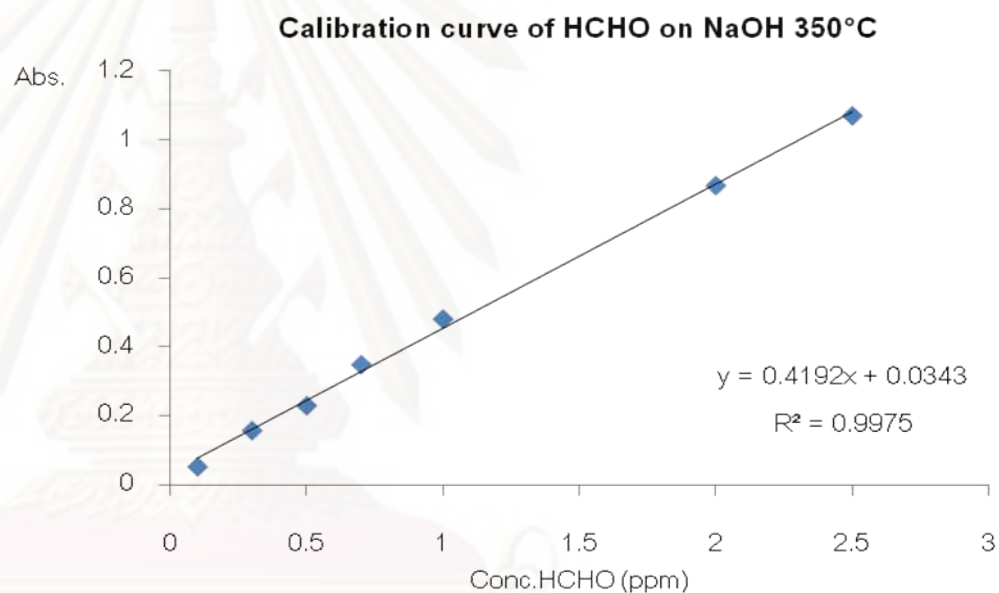


ภาคผนวก ง
ผลการคำนวณหาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมัตัว
บนถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณหาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์อิมิต์บนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 350 °C จำนวน 0.05 g ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrometer ที่ความยาวคลื่น 580 nm

Sample	Abs	Conc. HCHO (ppm)
Std. solution 1	0.054	0.1
Std. solution 2	0.159	0.3
Std. solution 3	0.231	0.5
Std. solution 4	0.350	0.7
Std. solution 5	0.482	1.0
Std. solution 6	0.869	2.0
Std. solution 7	1.071	2.5
NaOH 350 °C ครั้งที่ 1	0.913	2.0961
NaOH 350 °C ครั้งที่ 2	0.907	2.0818
NaOH 350 °C ครั้งที่ 3	0.910	2.0890



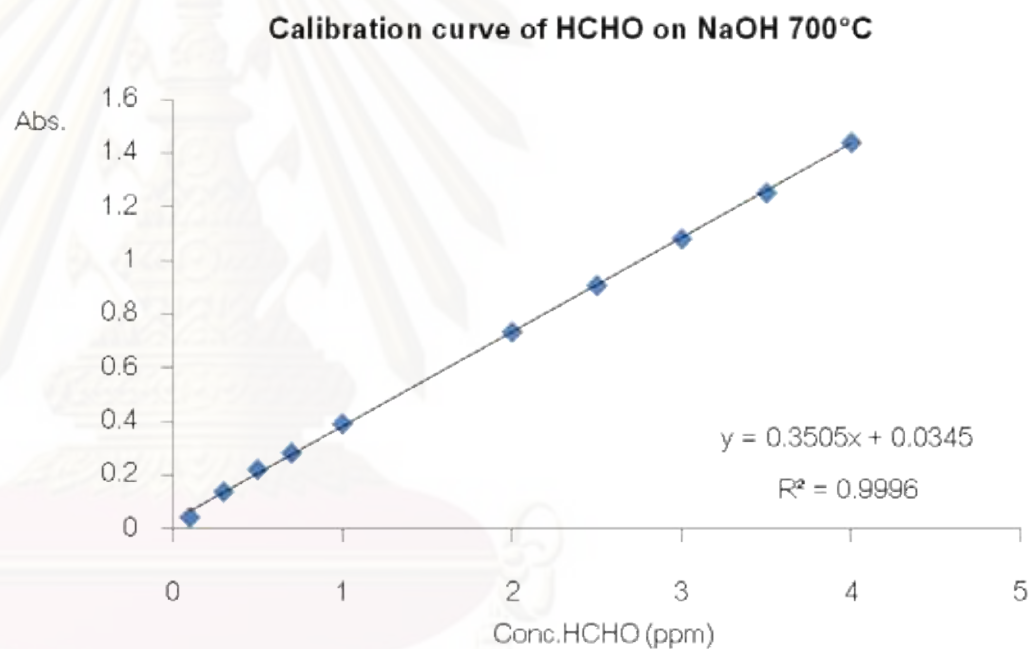
การคำนวณ

จากสมการ $y = 0.4192x + 0.0343$: $y = 0.913$ จะได้ค่า $x = 2.0961$ ppm

ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มาลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย NaOH 350 °C ครั้งที่ 1 มีค่า $\frac{2.0961 \text{ mg}}{1000 \text{ mL}} \times \text{dilution factor} \times \frac{500 \text{ mL}}{0.05 \text{ g}} = 209.61 \text{ mg/g}$

ตารางที่ ง.2 ผลการคำนวณหาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิต์บนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C จำนวน 0.05 g ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrometer ที่ความยาวคลื่น 580 nm

Sample	Abs	Conc. HCHO (ppm)
Std. solution 1	0.046	0.1
Std. solution 2	0.141	0.3
Std. solution 3	0.224	0.5
Std. solution 4	0.285	0.7
Std. solution 5	0.394	1.0
Std. solution 6	0.736	2.0
Std. solution 7	0.909	2.5
Std. solution 8	1.083	3.0
Std. solution 9	1.254	3.5
Std. solution 10	1.441	4.0
NaOH 700 °C ครั้งที่ 1	1.406	3.9130
NaOH 700 °C ครั้งที่ 2	1.411	3.9272
NaOH 700 °C ครั้งที่ 3	1.432	3.9872



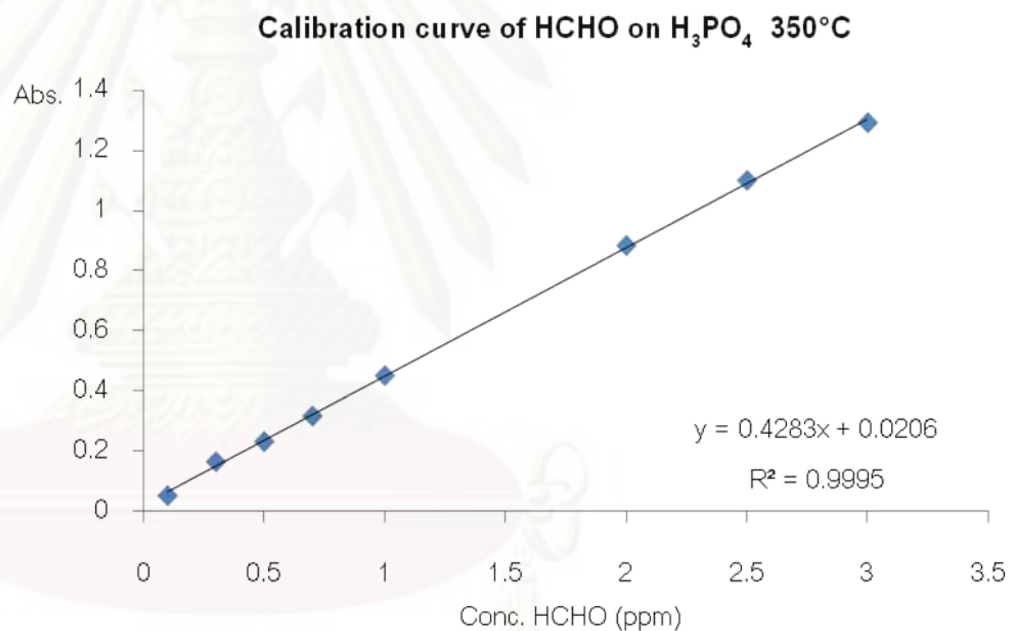
การคำนวณ

จากสมการ $y = 0.3505x + 0.0345$: $y = 1.406$ จะได้ค่า $x = 3.9130$ ppm

ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย NaOH 700 °C ครั้งที่ 1 มีค่า $\frac{3.9130 \text{ mg} \times \text{dilution factor} \times 500 \text{ mL}}{1000 \text{ mL} \times 0.05 \text{ g}} = 391.30 \text{ mg/g}$

ตารางที่ ง.3 การคำนวณหาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 350°C จำนวน 0.05 g ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrometer ที่ความยาวคลื่น 580 nm

Sample	Abs	Conc.HCHO (ppm)
Std. solution 1	0.051	0.1
Std. solution 2	0.164	0.3
Std. solution 3	0.231	0.5
Std. solution 4	0.316	0.7
Std. solution 5	0.451	1.0
Std. solution 6	0.884	2.0
Std. solution 7	1.101	2.5
Std. solution 8	1.293	3.0
H_3PO_4 350°C ครั้งที่ 1	1.102	2.5249
H_3PO_4 350°C ครั้งที่ 2	1.110	2.5435
H_3PO_4 350°C ครั้งที่ 3	1.115	2.5552



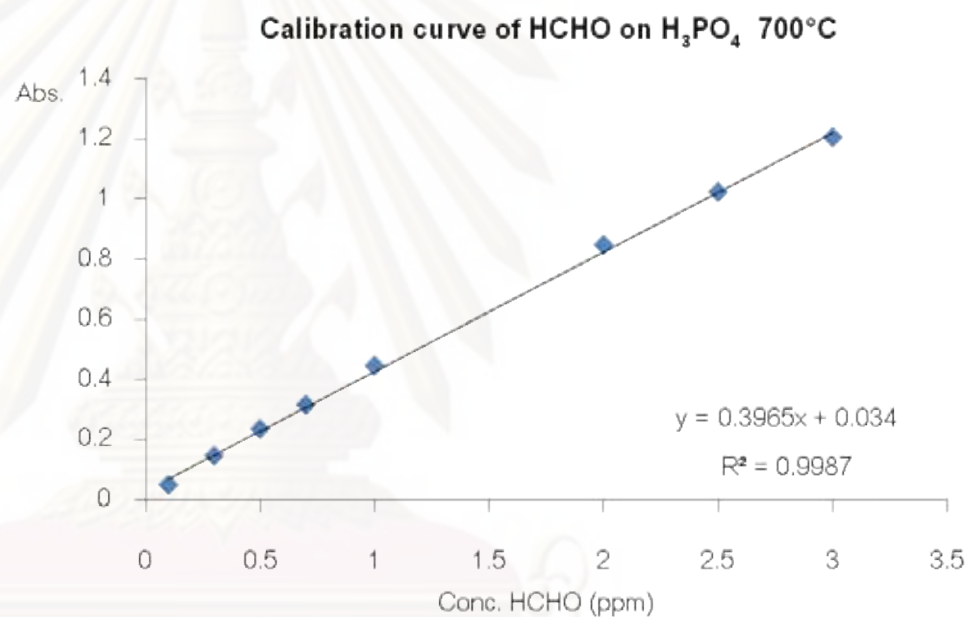
การคำนวณ

จากสมการ $y = 0.4283x + 0.0206$: $y = 1.102$ จะได้ค่า $x = 2.5249$ ppm

ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 350°C ครั้งที่ 1 มีค่า $\frac{2.5249 \text{ mg} \times \text{dilution factor} \times 500 \text{ mL}}{1000 \text{ mL} \times 0.05 \text{ g}} = 252.49 \text{ mg/g}$

ตารางที่ ง.4 การคำนวณหาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ จำนวน 0.05 g ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrometer ที่ความยาวคลื่น 580 nm

Sample	Abs	Conc.HCHO (ppm)
Std. solution 1	0.051	0.1
Std. solution 2	0.148	0.3
Std. solution 3	0.237	0.5
Std. solution 4	0.317	0.7
Std. solution 5	0.448	1.0
Std. solution 6	0.847	2.0
Std. solution 7	1.023	2.5
Std. solution 8	1.205	3.0
$H_3PO_4\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครั้งที่ 1	1.158	2.8348
$H_3PO_4\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครั้งที่ 2	1.164	2.8499
$H_3PO_4\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครั้งที่ 3	1.161	2.8424



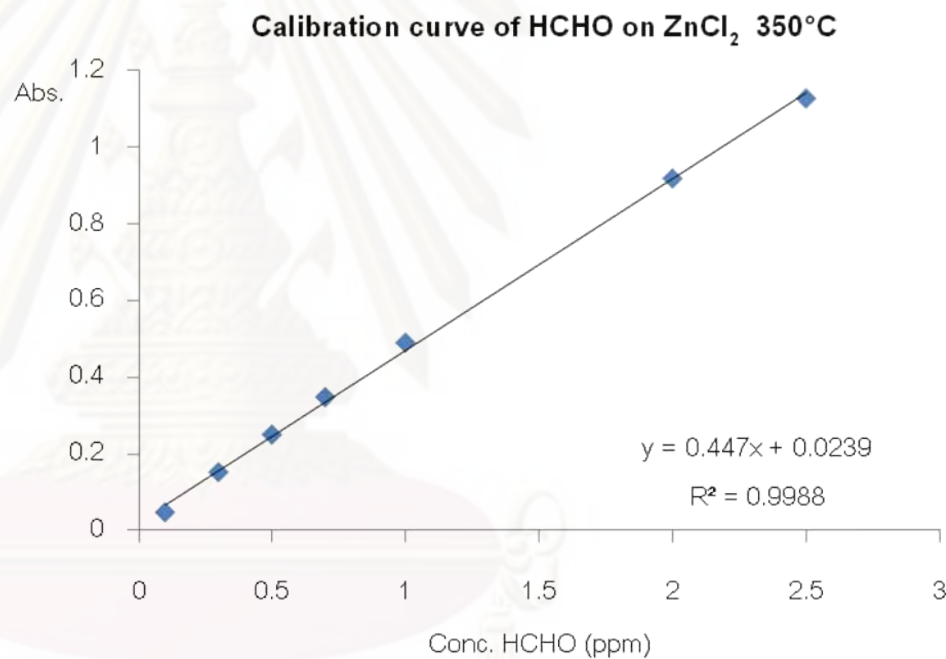
การคำนวณ

จากสมการ $y = 0.3965x + 0.034$: $y = 1.158$ จะได้ค่า $x = 2.8348\text{ ppm}$

ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $H_3PO_4\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครั้งที่ 1 มีค่า $2.8348\text{ mg} \times \frac{\text{dilution factor}}{1000\text{ mL}} \times \frac{500\text{ mL}}{0.05\text{ g}} = 283.48\text{ mg/g}$

ตารางที่ ง.5 การคำนวณหาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl_2 ที่อุณหภูมิ $350\text{ }^\circ\text{C}$ จำนวน 0.05 g ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrometer ที่ความยาวคลื่น 580 nm

Sample	Abs	Conc.HCHO (ppm)
Std. solution 1	0.048	0.1
Std. solution 2	0.153	0.3
Std. solution 3	0.251	0.5
Std. solution 4	0.349	0.7
Std. solution 5	0.491	1.0
Std. solution 6	0.920	2.0
Std. solution 7	1.129	2.5
$\text{ZnCl}_2\ 350\text{ }^\circ\text{C}$ ครั้งที่ 1	0.925	2.0159
$\text{ZnCl}_2\ 350\text{ }^\circ\text{C}$ ครั้งที่ 2	0.935	2.0383
$\text{ZnCl}_2\ 350\text{ }^\circ\text{C}$ ครั้งที่ 3	0.877	1.9085



การคำนวณ

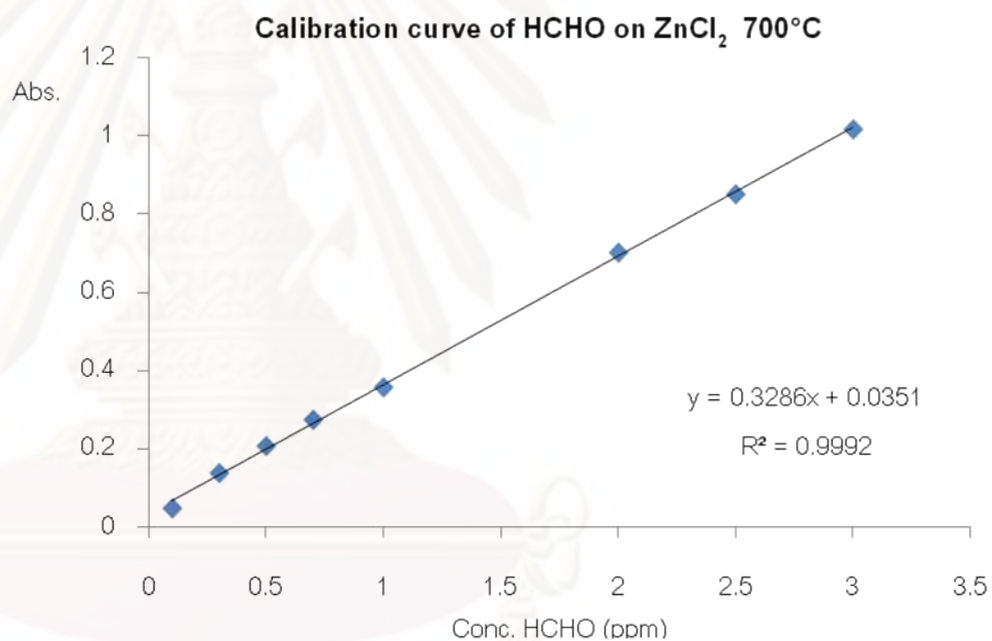
จากสมการ $y = 0.447x + 0.0239$: $y = 0.925$ จะได้ค่า $x = 2.0159\text{ ppm}$

ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $\text{ZnCl}_2\ 350\text{ }^\circ\text{C}$ ครั้งที่ 1 มีค่า 2.0159 mg x dilution factor x $500\text{ mL} = 201.59\text{ mg/g}$

$$\frac{2.0159\text{ mg}}{1000\text{ mL}} \times \frac{500\text{ mL}}{0.05\text{ g}}$$

ตารางที่ ง.6 การคำนวณหาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมิตัวบนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อุณหภูมิ $700\text{ }^{\circ}C$ จำนวน 0.05 g ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrometer ที่ความยาวคลื่น 580 nm

Sample	Abs	Conc.HCHO (ppm)
Std. solution 1	0.049	0.1
Std. solution 2	0.139	0.3
Std. solution 3	0.208	0.5
Std. solution 4	0.275	0.7
Std. solution 5	0.358	1.0
Std. solution 6	0.702	2.0
Std. solution 7	0.851	2.5
Std. solution 8	1.017	3.0
$ZnCl_2\ 350\text{ }^{\circ}C$ ครั้งที่ 1	0.842	2.4556
$ZnCl_2\ 350\text{ }^{\circ}C$ ครั้งที่ 2	0.843	2.4586
$ZnCl_2\ 350\text{ }^{\circ}C$ ครั้งที่ 3	0.799	2.3247

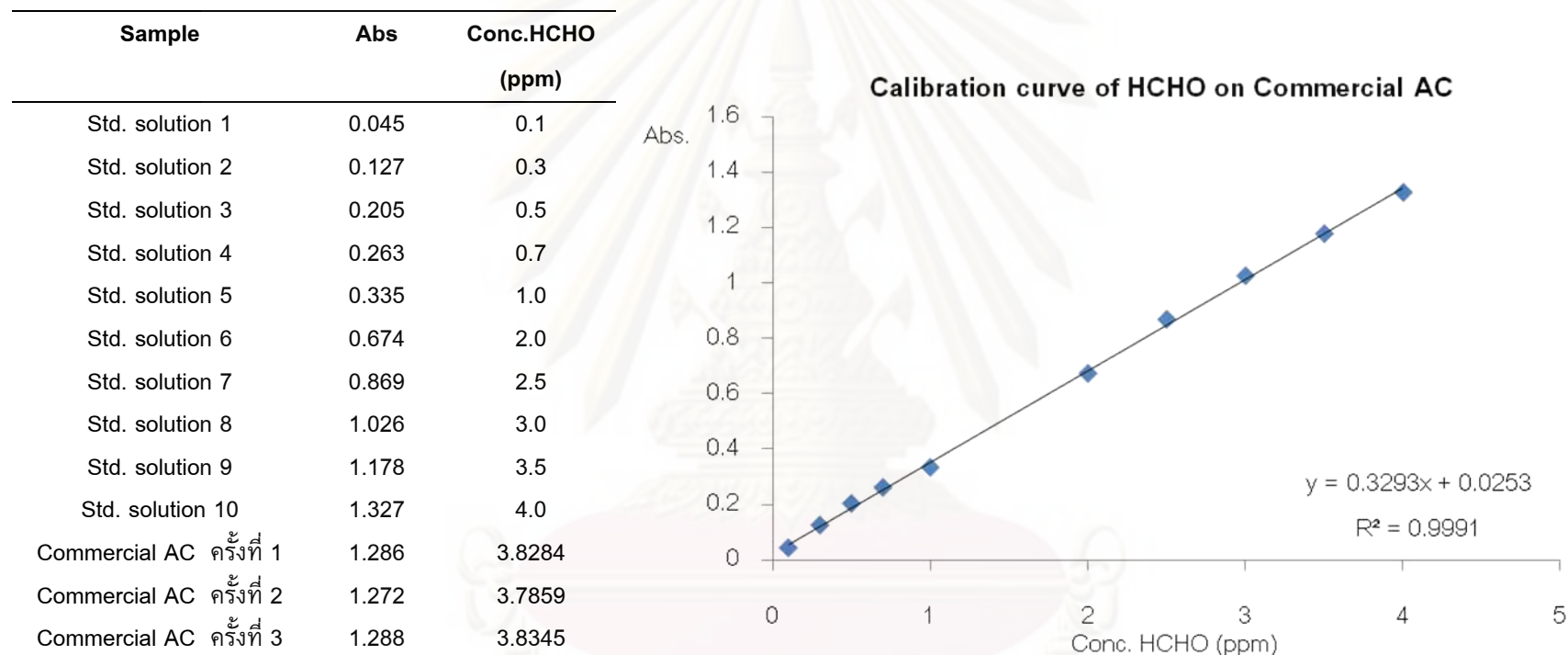


การคำนวณ

จากสมการ $y = 0.3286x + 0.0351$: $y = 0.842$ จะได้ค่า $x = 2.4556\text{ ppm}$

ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2\ 700\text{ }^{\circ}C$ ครั้งที่ 1 มีค่า $\frac{2.4556\text{ mg}}{1000\text{ mL}} \times \text{dilution factor} \times \frac{500\text{ mL}}{0.05\text{ g}} = 245.56\text{ mg/g}$

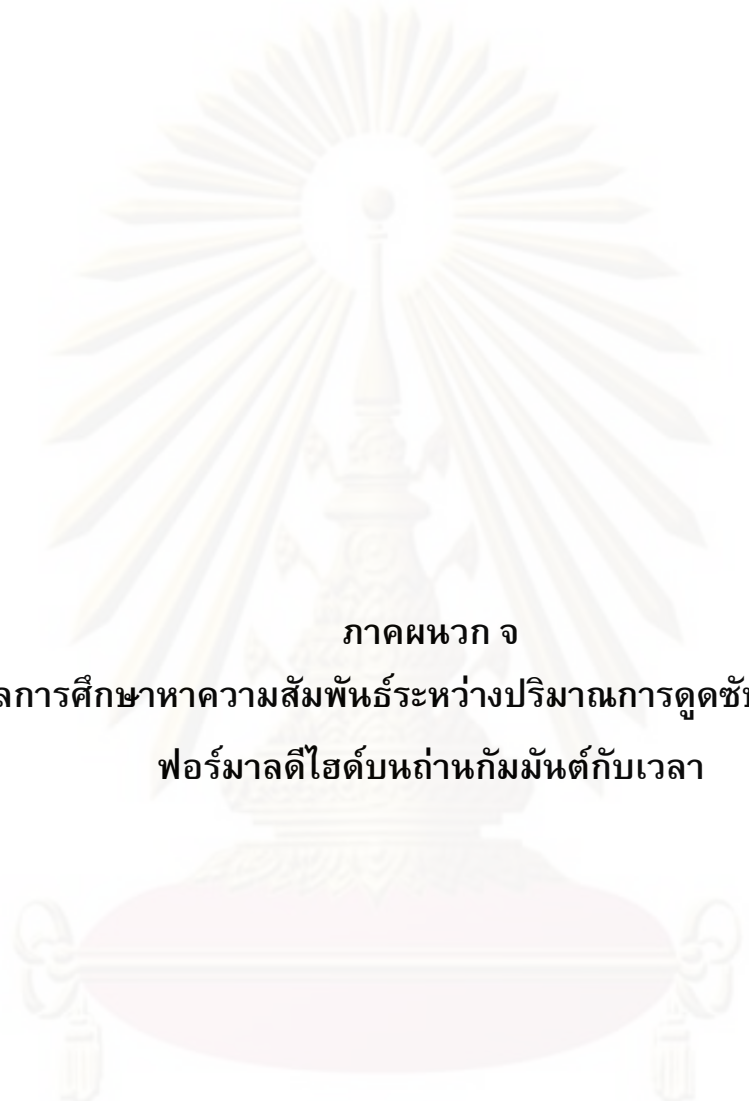
ตารางที่ ง.7 การคำนวณหาปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์อิมัตวบนถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าว จำนวน 0.05 g ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrometer ที่ความยาวคลื่น 580 nm



การคำนวณ

จากสมการ $y = 0.3293x + 0.0253$: $y = 1.286$ จะได้ค่า $x = 3.8284$ ppm

ปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย Commercial AC ครั้งที่ 1 มีค่า $3.8284 \text{ mg} \times \frac{\text{dilution factor}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{500 \text{ mL}}{0.05 \text{ g}} = 382.84 \text{ mg/g}$



ภาคผนวก จ
ผลการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูซ้ำไอระเหย
ฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์กับเวลา

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าวกับเวลา ที่อัตราการไหล 100 mL/min/ถ่านกัมมันต์ 1 g

	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ค่าเฉลี่ยของปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	SD.
คอลัมน์	67.8676				72.6392				74.9439					
รวม	68.9335				73.6985				76.0095					
ถ่าน	1.0659				1.0593				1.0656					
ที่ 15 นาที		68.9643	1.0967	28.8958		73.7316	1.0924	31.2470		76.0409	1.0970	29.4670	29.8699	1.23
ที่ 30 นาที		68.9922	1.1246	55.0708		73.7605	1.1213	58.5292		76.0655	1.1216	52.5526	55.3842	3.00
ที่ 60 นาที		69.0362	1.1686	96.3505		73.8045	1.1653	100.0661		76.1075	1.1636	91.9670	96.1279	4.05
ที่ 90 นาที		69.0725	1.2049	130.4062		73.8434	1.2042	136.7884		76.1384	1.1945	120.9647	129.3864	7.96
ที่ 120 นาที		69.0979	1.2303	154.2359		73.8727	1.2335	164.4482		76.1651	1.2212	146.0210	154.9017	9.23
ที่ 150 นาที		69.1221	1.2545	176.9397		73.8942	1.2550	184.1446		76.1883	1.2444	167.7928	176.2924	8.19
ที่ 180 นาที		69.1396	1.2720	193.3577		73.9107	1.2715	200.3209		76.2063	1.2624	184.6847	192.7878	7.83
ที่ 240 นาที		69.1613	1.2937	213.7161		73.9327	1.2935	221.0894		76.2328	1.2889	209.5533	214.7863	5.84
ที่ 300 นาที		69.1862	1.3186	237.0766		73.9554	1.3162	242.5186		76.2580	1.3141	233.2019	237.5990	4.68
ที่ 360 นาที		69.2007	1.3331	250.6801		73.9689	1.3297	255.2629		76.2715	1.3276	245.8709	250.6046	4.70
ที่ 420 นาที		69.2073	1.3397	256.8721		73.9756	1.3364	261.5878		76.2786	1.3347	252.5338	256.9979	4.53
ที่ 480 นาที		69.4360	1.3433	260.2496		74.2770	1.3403	265.2695		76.5524	1.3397	257.2260	260.9150	4.06

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C กับเวลาที่อัตราการไหล 100 mL/min/ถ่านกัมมันต์ 1 g

	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ค่าเฉลี่ยของปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	SD.
คอลัมน์	59.6213				59.1231				59.2754					
รวม	60.6877				60.1883				60.3410					
ถ่าน	1.0664				1.0652				1.0656					
ที่ 15 นาที		60.7406	1.1193	49.6062		60.2376	1.1145	46.2824		60.3888	1.1134	44.8574	46.9153	2.44
ที่ 30 นาที		60.7738	1.1525	80.7389		60.2710	1.1479	77.6380		60.4252	1.1498	79.0165	79.1311	1.55
ที่ 60 นาที		60.8198	1.1985	123.8747		60.3159	1.1928	119.7897		60.4674	1.1920	118.6186	120.7610	2.76
ที่ 90 นาที		60.8507	1.2294	152.8507		60.3511	1.2280	152.8351		60.5035	1.2281	152.4962	152.7273	0.20
ที่ 120 นาที		60.8783	1.2570	178.7322		60.3774	1.2543	177.5253		60.5286	1.2532	176.0510	177.4362	1.34
ที่ 150 นาที		60.8935	1.2722	192.9857		60.3910	1.2679	190.2929		60.5448	1.2694	191.2538	191.5108	1.36
ที่ 180 นาที		60.9028	1.2815	201.7067		60.4001	1.2770	198.8359		60.5548	1.2794	200.6381	200.3936	1.45
ที่ 240 นาที		60.9115	1.2902	209.8650		60.4082	1.2851	206.4401		60.5644	1.2890	209.6471	208.6507	1.92
ที่ 300 นาที		60.9186	1.2973	216.5229		60.4154	1.2923	213.1994		60.5720	1.2966	216.7793	215.5005	2.00
ที่ 360 นาที		60.9260	1.3047	223.4621		60.4224	1.2993	219.7709		60.5781	1.3027	222.5038	221.9123	1.92
ที่ 420 นาที		60.9299	1.3086	227.1193		60.4278	1.3047	224.8404		60.5818	1.3064	225.9760	225.9786	1.14
ที่ 480 นาที		60.9336	1.3123	230.5889		60.4324	1.3093	229.1588		60.5865	1.3111	230.3866	230.0448	0.77

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์คุณภาพดีที่ผลิตจากกะลามะพร้าวกับเวลา ที่อัตราการไหล 500 mL/min/ถ่านกัมมันต์ 1 g

	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ค่าเฉลี่ยของปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	SD.
คอลัมน์	59.9610				59.4691				59.6662					
รวม	61.0261				60.5347				60.7319					
ถ่าน	1.0651				1.0656				1.0657					
ที่ 15 นาที		61.0868	1.1258	56.9899		60.5983	1.1292	59.6847		60.7833	1.1171	48.2312	54.9686	5.99
ที่ 30 นาที		61.1217	1.1607	89.7568		60.6339	1.1648	93.0931		60.8264	1.1602	88.6741	90.5071	2.30
ที่ 60 นาที		61.1746	1.2136	139.4235		60.6808	1.2117	137.1058		60.8720	1.2058	131.7444	136.0912	3.94
ที่ 90 นาที		61.2091	1.2481	171.8149		60.7141	1.2450	168.3558		60.9056	1.2394	162.9915	167.7207	4.45
ที่ 120 นาที		61.2315	1.2705	192.8457		60.7365	1.2674	189.3769		60.9280	1.2618	184.0105	188.7444	4.45
ที่ 150 นาที		61.2542	1.2932	214.1583		60.7592	1.2901	210.6794		60.9509	1.2847	205.4987	210.1121	4.35
ที่ 180 นาที		61.2620	1.3010	221.4816		60.7673	1.2982	218.2808		60.9583	1.2921	212.4425	217.4016	4.58
ที่ 240 นาที		61.2881	1.3271	245.9863		60.7940	1.3249	243.3371		60.9845	1.3183	237.0273	242.1169	4.60
ที่ 300 นาที		61.3010	1.3400	258.0978		60.8068	1.3377	255.3491		60.9975	1.3313	249.2259	254.2243	4.54
ที่ 360 นาที		61.3081	1.3471	264.7639		60.8141	1.3450	262.1997		61.0044	1.3382	255.7005	260.8880	4.67
ที่ 420 นาที		61.3091	1.3481	265.7028		60.8150	1.3459	263.0443		61.0055	1.3393	256.7327	261.8206	4.61
ที่ 480 นาที		61.3096	1.3486	266.1722		60.8155	1.3464	263.5135		61.0061	1.3399	257.2957	262.3271	4.56

ตารางที่ จ.4 ผลการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านแกลบที่ถูกกระตุ้นด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 700 °C กับเวลาที่อัตราการไหล 500 mL/min/ถ่านกัมมันต์ 1 g

	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	นน. ถ่าน (g)	ปริมาณการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	ค่าเฉลี่ยของปริมาณการดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ (mg/g)	SD.
คอลัมน์	68.2389				73.0346				75.0203					
รวม	69.3054				74.1006				76.0846					
ถ่าน	1.0665				1.0660				1.0643					
ที่ 15 นาที		69.3908	1.1519	80.0750		74.1875	1.1529	81.5197		76.1727	1.1524	81.7774	81.1240	0.92
ที่ 30 นาที		69.4402	1.2013	126.3947		74.2389	1.2043	129.7373		76.2238	1.2035	130.7902	128.9740	2.29
ที่ 60 นาที		69.4784	1.2395	162.2128		74.2761	1.2415	164.6341		76.2597	1.2374	164.5213	163.7894	1.37
ที่ 90 นาที		69.5166	1.2777	198.0309		74.3137	1.2791	199.9062		76.2999	1.2796	202.2926	200.0766	2.13
ที่ 120 นาที		69.5361	1.2972	216.3150		74.3316	1.2970	216.6979		76.3168	1.2965	218.1716	217.0615	0.98
ที่ 150 นาที		69.5477	1.3088	227.1917		74.3416	1.3070	226.0788		76.3269	1.3066	227.6614	226.9773	0.81
ที่ 180 นาที		69.5540	1.3151	233.0989		74.3479	1.3133	231.9887		76.3345	1.3142	234.8022	233.2966	1.42
ที่ 240 นาที		69.5605	1.3216	239.1936		74.3559	1.3213	239.4934		76.3399	1.3196	239.8760	239.5210	0.34
ที่ 300 นาที		69.5625	1.3236	241.0689		74.3582	1.3236	241.6510		76.3434	1.3231	243.1645	241.9615	1.08
ที่ 360 นาที		69.5678	1.3289	246.0384		74.3634	1.3288	246.5291		76.3483	1.3280	247.7685	246.7787	0.89
ที่ 420 นาที		69.5690	1.3301	247.1636		74.3652	1.3306	248.2176		76.3501	1.3298	249.4597	248.2803	1.15
ที่ 480 นาที		69.5714	1.3325	249.4140		74.3675	1.3329	250.3753		76.3519	1.3316	251.1510	250.3134	0.87



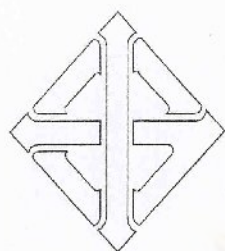
ภาคผนวก จ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 900 – 2547

ถ่านกัมมันต์

ACTIVATED CARBON

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

THAI INDUSTRIAL STANDARD

มอก. 900 – 2547

ถ่านกัมมันต์

ACTIVATED CARBON

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม

ICS 71.100.80

IBN 974-687-219-2

ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ถ่านกัมมันต์

มอก. 900 - 2547

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
กระทรวงอุตสาหกรรม ถนนพระรามที่ 6 กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0 2202 3300

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 121 ตอนที่ 79ง
วันที่ 30 กันยายน พุทธศักราช 2547

คณะกรรมการวิชาการคณะที่ 581

มาตรฐานคาร์บอนกัมมันต์

ประธานกรรมการ	
นายประสม สถาปิตานนท์	ผู้แทนสมาคมมาตรฐานไทย
กรรมการ	
นางสาวนงลักษณ์ บรรยงวิรัช	ผู้แทนกรมวิทยาศาสตร์บริการ
นายจ่ายอก แซ่เฮียบ	ผู้แทนคณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นางสาวรุ่งทิพย์ ชัยวัฒนานนท์	ผู้แทนสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
นายพร เดชคณากร	ผู้แทนบริษัท ไทยน้ำทิพย์ จำกัด
นายวัฒนา โสตรแก้ว	ผู้แทนบริษัท อายิโนะโมะไตะ (ประเทศไทย) จำกัด
นางสาวศุทธิยา บุรณวัฒน์	ผู้แทนบริษัท ลำสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
นายประกิจ อิศวรพันธ์	ผู้แทนบริษัท ปรามณภัณฑ์ จำกัด
นายธนัญชัย กาญจนบัตร	ผู้แทนบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด
นายเบญจะ กาญจนไตร	
นายสุนธระ ธวัชวิบูลย์	ผู้แทนบริษัท เอ็มซี อินดัสเทรียลเคมีคอล จำกัด
นางบุษบา นันทสุขเกษม	ผู้แทนบริษัท วัท์กรุป จำกัด (มหาชน)
นายไพรัช วิวัฒน์กุลกิจ	ผู้แทนบริษัท อีสต์เอเชียติก (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
กรรมการและเลขานุการ	
นายกิตติศักดิ์ เน้คะนันท์	ผู้แทนสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
นางอารัมภรัตน์ รัชตานุรักษ์	

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ถ่านกัมมันต์

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ หลายประเภท เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและเภสัชกรรม ใช้ฟอกสีในอุตสาหกรรมอาหาร น้ำตาล น้ำมันพืช น้ำอัดลม โมโนโซเดียม แกลูตาเมต (Monosodium L-Glutamate) ใช้ดูดก๊าซในกั้นกรองบุหรี่ เครื่องทำให้อากาศบริสุทธิ์ในโรงงาน และใช้ในการกรองน้ำ

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

- 2.1 ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านที่มีคุณสมบัติดูดซับสี กลิ่น รส บางชนิดได้เป็นอย่างดี ถ่านชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ผลิตได้จากถ่านหิน ถ่านไม้ ถ่านกะลามะพร้าว หรือถ่านกระดูก ด้วยกรรมวิธีก่อกัมมันต์
- 2.2 ค่าไอโอดีน (Iodine number) หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังจากถูกดูดซับเป็น 0.01 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

3. ชนิด และชั้นคุณภาพ

- 3.1 ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ
- 3.1.1 ชนิดผง (powdered activated carbon)
- 3.1.2 ชนิดเม็ด (granular activated carbon) แบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ
- 3.1.2.1 ชั้นคุณภาพพิเศษ (premium grade)
- 3.1.2.2 ชั้นคุณภาพที่ 1 (first grade)
- 3.1.3 ชนิดอัดเม็ด (pelletised activated carbon)
- 3.1.4 ชนิดแท่ง (block activated carbon)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ขนาด

- 4.1 ชนิดผง
ให้เป็นไปตามข้อกำหนดระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก
การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.2.1
- 4.2 ชนิดเม็ด และชนิดอัดเม็ด
ให้เป็นไปตามข้อกำหนดระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.2.2
- 4.3 ชนิดแท่ง
ให้เป็นไปตามข้อกำหนดระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย

5. คุณลักษณะที่ต้องการ

- 5.1 ลักษณะทั่วไป
- 5.1.1 ชนิดผง
ต้องเป็นผงสีขาว ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้
- 5.1.2 ชนิดเม็ดและชนิดอัดเม็ด
ต้องเป็นเม็ดสีขาว ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้
- 5.1.3 ชนิดแท่ง
ต้องเป็นแท่ง ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้
การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ
- 5.2 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมี
- 5.2.1 ชนิดผง
ให้เป็นไปตามตารางที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของชนิดผง
(ข้อ 5.2.1)

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B600
2	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	0.20 ถึง 0.75	

5.2.2 ชนิดเม็ด
ให้เป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของชนิดเม็ด
(ข้อ 5.2.2)

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีทดสอบตาม
		ชั้นคุณภาพพิเศษ	ชั้นคุณภาพที่ 1	
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	1 000	600	AWWA B604
2	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8		
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า	0.20		AWWA B 604 Ro-Tap abrasion test
4	ความแข็ง (abrasion resistance) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70		

- 5.2.3 ชนิดอัดเม็ด
ให้เป็นไปตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของชนิดอัดเม็ด
(ข้อ 5.2.3)

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
2	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8	
3	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า	0.20	
4	ความแข็ง (abrasion resistance) ร้อยละ ไม่น้อยกว่า	70	AWWA B 604 Ro-Tap abrasion test

- 5.2.4 ชนิดแท่ง
ให้เป็นไปตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของชนิดแท่ง
(ข้อ 5.2.4)

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีน ไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
2	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	8	

6. การบรรจุ

- 6.1 ให้นำบรรจุภัณฑ์กัมมันต์ในภาชนะบรรจุที่สะอาดแห้ง และปิดได้สนิท
6.2 น้ำหนักสุทธิของกัมมันต์ในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก
การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.3

ศูนย์วิทยาศาสตร์การ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. เครื่องหมายและฉลาก

- 7.1 ที่กษณะบรรจุภัณฑ์ถ้ามั่นต์ทุกหน่วยอย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน
- (1) ชื่อผลิตภัณฑ์ตามชื่อมาตรฐาน
 - (2) ชนิด และชั้นคุณภาพ
 - (3) น้ำหนักสุทธิ เป็นกิโลกรัม
 - (4) เดือน ปีที่ทำ หรือรหัสรุ่นที่ทำ
 - (5) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
- ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

8. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

- 8.1 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน ให้เป็นไปตามภาคผนวก ก.

9. การทดสอบ

- 9.1 ชักกำหนดทั่วไป
- 9.1.1 ให้ใช้วิธีทดสอบที่กำหนดในมาตรฐานนี้ หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มิข้อยกเว้นให้ใช้วิธีที่กำหนดในมาตรฐานนี้
 - 9.1.2 หากมิได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น น้ำกลั่นและสารเคมีที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์เหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์
- 9.2 การทดสอบขนาด
- 9.2.1 ถ่านกัมมันต์ผง
 - 9.2.1.1 เครื่องมือ
 - (1) แรง 150 ไมโครเมตร
 - (2) กุชครูซีเบิล
 - 9.2.1.2 วิธีทดสอบ

นำตัวอย่างประมาณ 25 กรัม ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมงจนได้มวลคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ จากนั้นให้รับซั่งให้ทราบมวลที่แน่นอนถึง 0.001 กรัม (m_0) เทตัวอย่างใส่ในบีกเกอร์ เต็มน้ำ 600 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถึง 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนให้เข้ากัน ทำแรงให้เปียกก่อนแล้วเทตัวอย่างช้า ๆ ผ่านแรง ในขณะที่เทให้คนตัวอย่างเป็นครั้งคราว ล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ออกให้หมด เมื่อเทตัวอย่างทั้งหมดลงบนแรงแล้วใช้น้ำล้างตัวอย่างอีกจนกระทั่งไม่มีตัวอย่างผ่านแรงอีก ถ่ายตัวอย่างที่ค้างบนแรง โดยใช้น้ำช่วยใส่ลงในบีกเกอร์แล้วกรองผ่านกุชครูซีเบิลซึ่งทราบมวลแน่นอนแล้ว นำกุชครูซีเบิลนั้นไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมงจนได้มวลคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ แล้วรับซั่งน้ำหนักทันที (m_1)

9.2.1.3 วิธีคำนวณ

คำนวณหาปริมาณที่ผ่านแรง จากสูตร

$$\text{ปริมาณที่ผ่านแรง ร้อยละโดยน้ำหนัก} = \left[1 - \frac{m_1}{m_0} \right] \times 100$$

เมื่อ m_0 คือ มวลของตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งแรก เป็นกรัม

เมื่อ m_1 คือ มวลของตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งที่ 2 เป็นกรัม

9.2.2 ถ่านกัมมันต์เม็ดและถ่านกัมมันต์อัดเม็ด

9.2.2.1 เครื่องมือ

- (1) แรง 150 ไมโครเมตร
- (2) เครื่องเขย่า ที่มีอัตราการเขย่า 285 รอบต่อนาที \pm 5 รอบต่อนาที มีลักษณะการเขย่าเป็นแบบขึ้นลงและหมุนวนพร้อมกัน

9.2.2.2 วิธีทดสอบ

ซึ่งตัวอย่างประมาณ 100 กรัม ให้ทราบมวลที่แน่นอนถึง 0.1 กรัม ใส่ในแรง เขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 3 นาที ถ่ายส่วนที่ค้างบนแรงทั้งหมดลงในภาชนะที่ทราบมวลแน่นอนแล้ว ชั่งและคำนวณส่วนที่ค้างบนแรงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

9.3 น้ำหนักสุทธิ

ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดพร้อมภาชนะบรรจุ แล้วเทตัวอย่างออก ซึ่งภาชนะเปล่า แล้วเฉลี่ยผลต่างของมวลที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักสุทธิต่อภาชนะบรรจุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

(ข้อ 8.1)

- ก.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง ผ่านกัมมันต์ชนิดและชั้นคุณภาพเดียวกัน ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน บรรจุในภาชนะบรรจุชนิดและขนาดเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน
- ก.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้
- ก.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบการบรรจุ
- ก.2.1.1 ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันตามจำนวนที่กำหนดในตารางที่ ก.1
- ก.2.1.2 ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 6. จึงจะถือว่าผ่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

ตารางที่ ก.1 แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบการบรรจุ

(ข้อ ก.2.1.1)

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ก.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบเครื่องหมายและฉลาก
- ก.2.2.1 ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันตามจำนวนที่กำหนดในตารางที่ ก.2
- ก.2.2.2 จำนวนตัวอย่างที่ไม่เป็นไปตามข้อ 7. ในแต่ละรายการ ต้องไม่เกินเลขจำนวนที่ยอมรับที่กำหนดในตารางที่ ก.2 จึงจะถือว่าด่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

ตารางที่ ก.2 แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบเครื่องหมายและฉลาก
(ชัก ก.2.2)

ขนาดรุ่น หน่วยภาชนะบรรจุ	ขนาดตัวอย่าง หน่วยภาชนะบรรจุ	เลขจำนวนที่ยอมรับ
ไม่เกิน 280	2	0
281 ถึง 500	8	1
เกิน 500	13	2

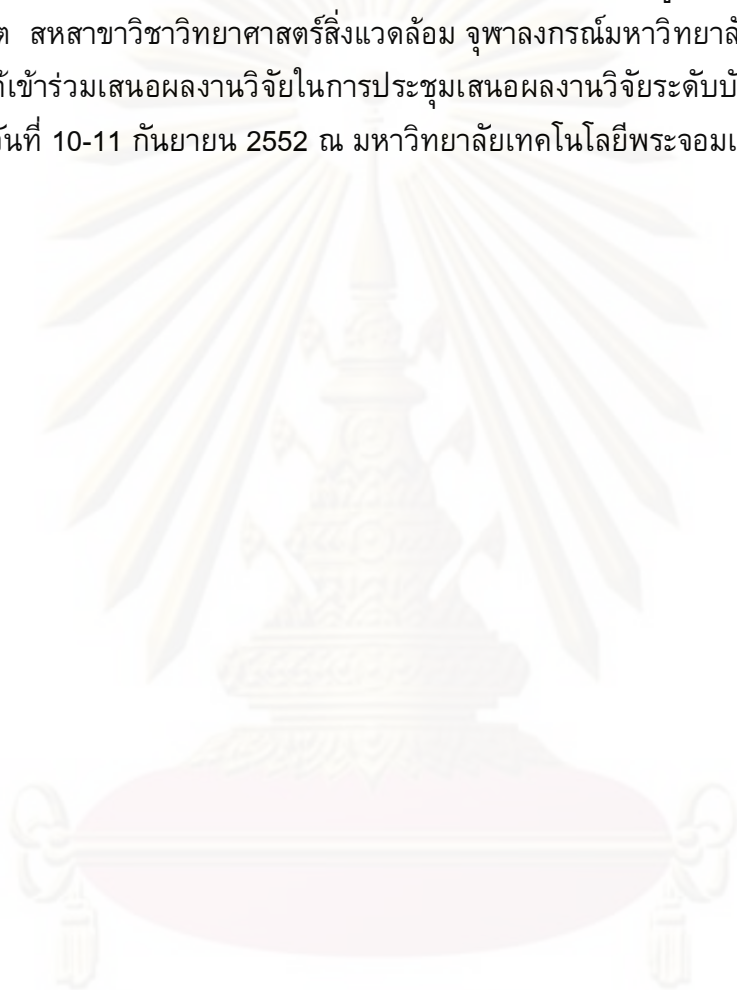
- ก.2.3 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบขนาด และคุณลักษณะที่ต้องการ
- ก.2.3.1 ให้ชักตัวอย่าง จากตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบเครื่องหมายและฉลากแล้วมาภาชนะบรรจุละเท่า ๆ กัน ให้ได้ตัวอย่าง รวมกันไม่น้อยกว่า 1 500 กรัม ผสมตัวอย่างทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วแบ่งออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน บรรจุแต่ละส่วนลงในภาชนะที่สะอาดแห้ง และปิดได้สนิท พร้อมทั้งบันทึกรายละเอียดที่จำเป็นไว้ ตัวอย่างส่วนหนึ่งนำไปใช้ในการวิเคราะห์ อีก 2 ส่วนที่เหลือให้ผู้ที่เกี่ยวข้องเก็บไว้เป็นหลักฐาน
- ก.2.3.2 ตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4. และข้อ 5. ทุกรายการ จึงจะถือว่าด่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด
- ก.3 เกณฑ์ตัดสิน
- ตัวอย่างด่านกัมมันต์ต้องเป็นไปตามข้อ ก.2.1.2 ชัก ก.2.2.2.2 และข้อ ก.2.3.2 ทุกข้อ จึงจะถือว่าด่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิตตรี พละกุล เกิดวันที่ 13 ธันวาคม 2526 ที่จังหวัดเพชรบุรี จบการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนพรหมานุสรณ์จังหวัดเพชรบุรี ในปี 2543 จากนั้นเข้าศึกษา หลักสูตรปริญญาการศึกษาบัณฑิต คณะศึกษาศาสตร์ เอกเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2544 หลังจากนั้นในปี 2549 ได้ศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2549 และในปี 2552 ได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัยในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 วันที่ 10-11 กันยายน 2552 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย