การเตรียมถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว

น.ส.ซุ ฮุ่ย คอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM USED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE BOTTLES

Miss Suh Hui Koh

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
FACULTY OF SCIENCE
Chulalongkorn University
Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว
โดย	น.ส.ชุ ฮุ่ย คอ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ซุ ฮุ่ย คอ : การเตรียมถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว.
(PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM USED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE BOTTLES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

ขยะพลาสติกกลายเป็นปัญหาระดับโลก เทคโนโลยีในการรีไซเคิลและปรับคุณภาพขยะพลาสติกมีความต้องการที่เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีที่ใช้แล้วด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นทางเคมี คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ด้วยวิธีการทำให้อิ่มตัวด้วยอัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อคาร์บอน 2 ถึง 4 อุณหภูมิกระตุ้น 700 ถึง 900 องศาเซลเซียส และเวลากระตุ้น 1 ถึง 2.5 ชั่วโมง และใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้นในการกระตุ้นทางกายภาพ อุณหภูมิกระตุ้น 800 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส และเวลากระตุ้น 1 ถึง 4 ชั่วโมง พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสคือกระตุ้นด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้พื้นที่ผิว BET สูงสุด 1634.59 ตร.ม./กรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 1.0434 ลบ.ซม./กรัม และภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีคือกระตุ้นด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำเช่นกัน ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้พื้นที่ผิว BET สูงสุด 576.42 ตร.ม./กรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 0.3093 ลบ.ซม./กรัม พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่าน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และการพัฒนารูพรุนของถ่านกัมมันต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2563 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

6270131023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: ACTIVATED CARBON, Chemical activation, Physical activation, Polyethylene terephthalate bottles

Suh Hui Koh : PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM USED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE BOTTLES. Advisor: Prof. THARAPONG VITIDSANT

Plastic waste has become a global problem and the demand in technology to recycle and improve the quality of plastic waste is increasing. In this work, the preparation of activated carbon from used clear and colored polyethylene terephthalate (PET) bottles by chemical and physical activation was studied. The chemical activation agent is potassium hydroxide (KOH) using variable impregnation ratios of KOH to carbon 2 to 4 at temperature 700 to 900°C and time 1 to 2.5 hours and physical activation with steam at temperature 800 to 1000°C and time 1 to 4 h. The optimum conditions to produce activated carbon from clear polyethylene terephthalate bottles were activated by steam at 900 ℃ for 3 h exhibited highest BET surface area 1634.59 m^2/g and total pore volume 1.0434 cm^3/g, while activated carbon from colored polyethylene terephthalate bottles showed maximum BET surface area 576.42 m^2/g and total pore volume of 0.3093 cm^3/g which was prepared by physical activation using steam at 1,000 ℃ for 4 h. It was found that the chemical reagent to carbon mass ratio, activation temperature and time influence the yield of product and pore development of activated carbon.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Chemical Technology Student's Signature .....

Academic Year: 2020 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิฑิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญศรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตรจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย และรองศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความเห็น รวมถึงคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณสิริชัย รัตนวราหะ และนักวิทยาศาสตร์ผู้ดูแลและควบคุมห้องเครื่องมือของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรีทุกท่าน ที่คอยรับฟังคำปรึกษาให้คำแนะนำตลอดจนการช่วยเหลือทุก ๆ อย่างเกี่ยวกับการทำวิจัยด้วยความเต็มใจเสมอมา และภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นที่รักยิ่ง และเคารพยิ่ง ที่อบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ และสนับสนุน จนสำเร็จการศึกษา

ซุ ฮุ่ย คอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง
กิตติกรรมประกาศ ..... จ
สารบัญ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ฏ
สารบัญรูปภาพ ..... ฑ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ 3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 ถ่านกัมมันต์ 6
2.2 การจำแนกประเภทของถ่านกัมมันต์ 6
2.2.1 ลักษณะรูปร่าง 6
2.2.2 ขนาดรูพรุน 8
2.3 การผลิตถ่านกัมมันต์ 9
2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ 9
2.3.2 การคาร์บอไนซ์ (Carbonization) 9
2.3.3 การกระตุ้น 11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.3.1. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) 12
2.3.3.2. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) 12
2.4 การทดสอบสมบัติของถ่านกัมมันต์ 15
2.4.1 สมบัติทางกายภาพ 15
2.4.1.1 การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ 15
2.4.2 สมบัติทางเคมี 21
2.5 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) 22
2.6 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 23
2.7 การใช้งานพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 25
บทที่ 3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29
3.1 รูปแบบการศึกษา 29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 29
3.3 สารเคมีที่ใช้ 31
3.4 วัตถุดิบ 31
3.5 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ 32
3.6 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง 35
3.6.1 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี 35
3.6.2 คาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตให้เป็นถ่าน 35
3.6.3 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ 36
3.6.4 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี 37
3.6.5 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 37
3.6.5.1 การกระตุ้นถ่านด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี 37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.6.5.2 การกระตุ้นถ่านด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 39
3.6.6 หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ 40
3.6.7 วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากภาวะที่เหมาะสม 40
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลงานวิจัย 41
4.1 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี 41
4.1.1 วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis: TGA) 41
4.2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี .. 43
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณและองค์ประกอบแบบแยกธาตุ 43
4.2.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี 45
4.3 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 45
4.3.1 ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 46
4.3.1.1 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี 46
4.3.1.1.1 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี 46
4.3.1.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี 49
4.3.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี 52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.1.3 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 54

4.3.1.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 56

4.3.2 ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 58

4.3.2.1 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี 58

4.3.2.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี 58

4.3.2.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี 61

4.3.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี 63

4.3.2.3 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 65

4.3.2.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 66

4.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์ 68

4.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณและองค์ประกอบแบบแยกธาตุ 68

4.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) 71

4.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านและถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี ด้วยเทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy, FTIR)..... 73

4.4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วแบบใสและแบบมีสี และถ่านกัมมันต์ที่ภาวะเหมาะสมที่สุดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM)..... 75

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 77

5.1 สรุปผลงานวิจัย 77

5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระตุ้นในงานวิจัย 77

5.1.2 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ 78

5.1.3 ข้อเสนอแนะ..... 79

ภาคผนวก..... 80

ภาคผนวก ก. ข้อมูลดิบจากการทดลอง 81

ภาคผนวก ข. แผนผังการ์บอไนซ์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)..... 89

ภาคผนวก ค. ข้อมูลเบื้องต้นสารเคมี 90

บรรณานุกรม..... 93

ประวัติผู้เขียน..... 97

Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง 7

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด 7

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง 7

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี 43

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี 44

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี 45

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1 3:1 และ 4:1..... 52

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด 56

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 2:1 3:1 และ 4:1..... 63

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด 66

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ 68

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านกัมมันต์..... 69

ตารางที่ ก. 1 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1..... 81

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก. 2 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 3:1 82

ตารางที่ ก. 3 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 4:1 83

ตารางที่ ก. 4 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 84

ตารางที่ ก. 5 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1 85

ตารางที่ ก. 6 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 3:1 86

ตารางที่ ก. 7 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 4:1 87

ตารางที่ ก. 8 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ 2.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์ a) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง b) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด c) ถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง 8

ภาพที่ 2.2 ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์ 8

ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 13

ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นทางกายภาพโดยกำจัดฟีนอลและน้ำ 13

ภาพที่ 2.5 รูปแบบของไอโซเทิร์มตามการจำแนกประเภทของบรูนัวร์ 16

ภาพที่ 2.6 รูปแบบของไอโซเทอมตามการจำแนกแบบ IUPAC 17

ภาพที่ 2.7 โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 22

ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน 23

ภาพที่ 2.9 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน 24

ภาพที่ 3.1 เตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง 29

ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับทำการกระตุ้น 30

ภาพที่ 3.3 ชุดกระตุ้นประกอบด้วยเตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง เครื่องปฏิกรณ์สำหรับทำการกระตุ้น หม้อต้มไอน้ำ ก๊าซไนโตรเจน และเทอร์โมคัปเปิล 31

ภาพที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน 32

ภาพที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ 32

ภาพที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ 33

ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน 33

ภาพที่ 3.8 เครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด 34

ภาพที่ 3.9 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี 34

ภาพที่ 3.10 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ 35

ภาพที่ 3.11 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร 36

ภาพที่ 3.12 ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส ขนาด 2 – 2.8 มิลลิเมตร 36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 3.13 ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี ขนาด 2 – 2.8 มิลลิเมตร..... 37

ภาพที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ TGA ของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 41

ภาพที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ TGA ของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี..... 42

ภาพที่ 4.3 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1..... 46

ภาพที่ 4.4 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 3:1..... 47

ภาพที่ 4.5 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 4:1..... 47

ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 49

ภาพที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 50

ภาพที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 50

ภาพที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 55

ภาพที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 2:1..... 58

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 3:1 59

ภาพที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 4:1 59

ภาพที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 61

ภาพที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 62

ภาพที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 62

ภาพที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ 65

ภาพที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส (PETW) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางกายภาพ (PETW-H900(3)) และกระตุ้นทางเคมี (PETW-KOH4(900)(3)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด 71

ภาพที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี (PETC) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางกายภาพ (PETC-H1000(4)) และกระตุ้นทางเคมี (PETC-KOH3(900)(2)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด 71

ภาพที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส (PETW) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางเคมี (PETW-KOH4(900)(3)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETW-H900(3)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด 73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี (PETC) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางเคมี (PETC-KOH3(900)(2)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETC-H1000(4)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด 74

ภาพที่ 4.21 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 100 เท่า..... 75

ภาพที่ ข. 1 แผนผังแสดงขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET).....89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการนำพลาสติกมาใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอุปโภค บริโภค อย่างแพร่หลาย พลาสติกหลายชนิดมีการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องเป็นจำนวนมาก พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา แข็งแรง คงทนต่อความร้อนได้ดี มีความยืดหยุ่นและเปลี่ยนรูปได้หลากหลาย จำมีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย[1] พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เป็นพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้มากที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลายในการบรรจุอาหารและเครื่องดื่มบรรจุขวด พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีจุดเด่นอยู่ที่มีความแข็งแรง สีใส มีความเหนียวสูง ทำให้สามารถป้องกันไม่ให้ก๊าซ ไอน้ำ และไขมันซึมผ่านออกมาได้ และทนแรงกดกระแทกได้ดี[2] ในปี 2560 ประเทศไทยมีการผลิตขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มออกสู่ตลาดในประเทศมากกว่า 185,000 ตัน ในจำนวนนี้มีพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกนำกลับมาสู่กระบวนการรีไซเคิลอย่างเหมาะสมเพียงร้อยละ 50 ในขณะเดียวกันขวดพลาสติกที่เหลือมากกว่า 1 แสนตัน เป็นขยะที่ถูกนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ[3] ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และใช้เวลานานหลายร้อยปีกว่าที่ขวดพลาสติกเหล่านี้จะย่อยสลายตามธรรมชาติ จึงทำให้เกิดปัญหาการสะสมของขยะพลาสติกและก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมตามมา[4] ปัจจุบันขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสถูกนำมารีไซเคิลแปรสภาพไปเป็นใยสังเคราะห์สำหรับผลิตเสื้อผ้า แผ่นกรอง สายรัด บรรจุภัณฑ์ ผ้าบุแต่งเฟอร์นิเจอร์และพรม[3] ส่วนขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสียังไม่เป็นที่นิยมในการนำมารีไซเคิล เนื่องจากต้องใช้เทคโนโลยีในการแยกเม็ดสี รวมถึงต้องย้อมเพื่อให้เป็นสีดำหรือเทา ก่อนจะนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งยังไม่มีอุตสาหกรรมที่รองรับการรีไซเคิลเหล่านี้ในจำนวนมาก ๆ ได้ และอาจมีการปนเปื้อนสูง จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่มักไม่นิยมนำขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกลับมาใช้ซ้ำ โดยเฉพาะเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม[2] ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วกลับมาเพิ่มมูลค่าในรูปแบบอื่น โดยนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีคาร์บอนจำนวนมากกว่า 60% โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิในการสลายตัวต่ำกว่า 450 องศาเซลเซียส สามารถรีไซเคิลได้ง่ายและผลิตได้ในปริมาณมาก[4] ดังนั้นการพัฒนาถ่านกัมมันต์ที่ทำจากขยะขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจึงเป็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ในการนำขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าไปพร้อมกับแนวทางการลดขยะพลาสติกที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเกิดผลดีในด้านการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ เพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งสีดำ มีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนเป็นผลึกและมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวภายในสูง จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ ถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยปริมาณของธาตุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและกระบวนการผลิต[5] ถ่านกัมมันต์นั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ อุตสาหกรรมสารเคมีและเวชภัณฑ์ การบำบัดน้ำเสีย การกรองอากาศเสีย การกรองน้ำ และการกลั่นแยกก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น[6] โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ต้องมีการกระตุ้น เพื่อเพิ่มการก่อกัมมันต์ และเพิ่มความสามารถในการดูดซับ วิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์มี 2 วิธี คือการกระตุ้นทางเคมี เป็นการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวของคาร์บอน โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซิงค์คลอไรด์ และกรดฟอสฟอริก ในขณะที่วิธีการกระตุ้นทางกายภาพเป็นการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศร่วมกับความร้อน [7]

งานวิจัยนี้สนใจทำการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี ศึกษาการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ เช่น ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ผลของอุณหภูมิ และผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขยะขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี ซึ่งเป็นแนวทางในการนำขยะพลาสติกจำพวกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่เกิดมูลค่า รวมถึงเป็นแนวทางการจัดการขยะพลาสติกที่ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1. หาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว
2. หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

(1) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมจากการกระตุ้นทางเคมีของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว เช่น ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ผลของอุณหภูมิ และผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

(2) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมจากการกระตุ้นทางกายภาพของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว เช่น ผลของอุณหภูมิ และผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

(3) ศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

(1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(2) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้

- วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis : TGA)

(3) เตรียมวัตถุดิบ โดยนำขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วมาเผาให้เป็นถ่าน แล้วนำมาบดละเอียด

(4) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า

- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน

- วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน (Surface Area and Porosity Analyzer, BET)

- วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

- วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของถ่านด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

- วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

(5) ดำเนินการกระตุ้นทางเคมีของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี โดยใช้ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีตัวแปรที่ทำการศึกษา และภาวะดำเนินการ คือ

- อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่าน 2:1, 3:1 และ 4:1
- อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้กระตุ้น 1, 1.5, 2 และ 2.5 ชั่วโมง

(6) กระตุ้นทางกายภาพของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี มีตัวแปรที่ทำการศึกษา และภาวะดำเนินการ คือ

- อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 800, 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้กระตุ้น 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

(7) หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว โดยการวิเคราะห์จากพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย

(8) วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

- วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ
- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ
- วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
- วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
- วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(9) วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์ (Carbonization) และกระบวนการก่อกัมมันต์ เพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งสีดำ มีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนเป็นผลึกและมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนในระดับนาโนเมตรจำนวนมหาศาล ซึ่งพื้นที่ผิวภายในผนังรูพรุนจะทำให้เกิดพื้นที่ว่างขนาดใหญ่ที่อนุภาคสาร หรือโมเลกุลก๊าซจำนวนมากสามารถแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาอยู่ในถ่าน (ถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 1 กรัมจะมีพื้นที่ผิวภายในโดยรวมระหว่าง 500-1,500 ตารางเมตร จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยปริมาณของธาตุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและกระบวนการคาร์บอไนซ์และเทคนิควิธีการก่อกัมมันต์[5][8] โดยสามารถนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น เป็นวัสดุดูดซับก๊าซ วัสดุฟอกสีและกลิ่น รวมถึงใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

2.2 การจำแนกประเภทของถ่านกัมมันต์[9]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ถ่านกัมมันต์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปสามารถจำแนกได้ดังนี้

2.2.1 ลักษณะรูปร่าง

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powdered activated carbon) ถ่านกัมมันต์ในรูปแบบดั้งเดิมและนิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยทั่วไปขนาดของผงถ่านถ่านกัมมันต์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.15 ถึง 0.25 มิลลิเมตร ถ่านกัมมันต์แบบผงเหมาะกับการใช้งานแบบเติมลงในภาชนะของเหลวโดยตรงซึ่งลดการศูนย์เสียผงถ่านได้ดีกว่าวิธีการเติมผงถ่านบรรจุในท่อและปล่อยของเหลวไหลผ่านผงถ่าน คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง[10] แสดงในตารางที่ 2.1 และรูปถ่านกัมมันต์ชนิดผง แสดงในภาพที่ 2.1a)

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด (มอก. 900-2547)
ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อกรัม)	600
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20 - 0.75

2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (granular activated carbon) มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์แบบผงและพื้นที่ผิวภายนอกมีขนาดเล็กลง จึงเหมาะสำหรับการใช้งานเพื่อดูดซับก๊าซและไอระเหย เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายเร็วกว่า คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดแสดงในตารางที่ 2.2 และรูปถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดแสดงในภาพที่ 2.1b)

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด (มอก. 900-2547)
ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อกรัม)	600
ความชื้น (ร้อยละ)	ต้องไม่เกิน 8
ความหนาแน่นปรากฏ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.20
ความแข็ง (ร้อยละ)	ต้องไม่น้อยกว่า 70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่ง (extruded activated carbon) เป็นถ่านที่นำมาขึ้นรูปลักษณะรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.8 ถึง 45 มิลลิเมตร เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบกรอง ระบบดูดซับก๊าซ เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงกลสูงและมีปริมาณฝุ่นละอองต่ำ คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง แสดงในตารางที่ 2.3 และรูปถ่านกัมมันต์ชนิดแท่งแสดงในภาพที่ 2.1c)

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด (มอก. 900-2547)
ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า (มิลลิกรัมต่อกรัม)	600
ความชื้น (ร้อยละ)	ต้องไม่เกิน 8

ภาพที่ 2.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์ a) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง b) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด c) ถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง[11]

2.2.2 ขนาดรูพรุน[12]

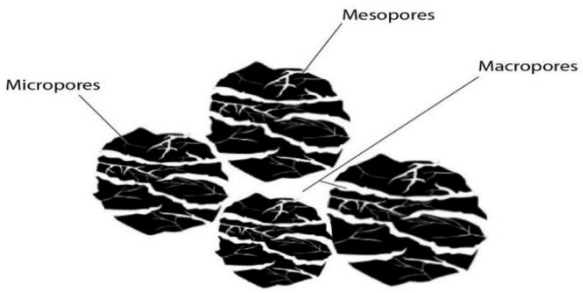
การจำแนกถ่านกัมมันต์ตามขนาดรูพรุนนั้น ตามนิยามของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) จะแบ่งขนาดรูพรุนถ่านกัมมันต์เป็น 3 ขนาดด้วยกันคือ

1. รูพรุนขนาดเล็ก (micropore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนต่ำกว่า 2 นาโนเมตร ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในการดูดซับก๊าซหรือสารระเหย

2. รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ช่วงจาก 2 - 50 นาโนเมตร โดยทั่วไปมักใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเป็นวัสดุรองรับในปฏิกิริยาเชิงตัวเร่ง (catalytic reaction) ใช้ในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี และการดูดซับอนุภาคของสีย้อมขนาดเล็ก

3. รูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น มักใช้ประโยชน์ในการฟอกสีและการผลิตยา

ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์แสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์[13]

Chulalongkorn University

2.3 การผลิตถ่านกัมมันต์[7]

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน เริ่มต้นจากการเตรียมวัตถุดิบ การคาร์บอไนซ์ และการกระตุ้น โดยแต่ละขั้นตอนจะมีการควบคุมภาวะดำเนินการและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเป็นถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน เพื่อให้การผลิตถ่านกัมมันต์ออกมามีคุณภาพดี มีพื้นที่ผิวรูพรุนสูง และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อที่จะสามารถกำหนดคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามต้องการ โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ความชื้น ก่อนเข้าขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ควรควบคุมความชื้นของวัตถุดิบให้มีค่าต่ำสุด เพื่อเป็นการลดเวลาและลดการเกิดควัน อีกทั้งยังสามารถลดการสูญเสียพลังงานในขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ วิธีการลดความชื้นสามารถทำได้โดยการอบด้วยเตาอบโดยตรง หรือการตากแดด

2. การลดขนาด วัตถุดิบบางประเภทมีความจำเป็นที่จะต้องทำการลดขนาดก่อน เนื่องจากต้องการให้การถ่ายโอนความร้อนเข้าไปในอนุภาคและโครงสร้างวัตถุดิบเกิดปฏิกิริยาได้อย่างเหมาะสมและทั่วถึง การลดขนาดทำโดยนำวัตถุดิบผ่านเครื่องลดขนาด

3. การกักเก็บวัตถุดิบ วัตถุดิบที่พร้อมเข้าสู่ขั้นตอนการคาร์บอไนซ์จะต้องเก็บในที่มิดชิดเพื่อป้องกันความชื้น หรือเก็บในที่ที่มีอากาศถ่ายเทได้เพื่อป้องกันการติดไฟด้วยตัวเองในกรณีเก็บวัตถุดิบไว้นานในภาวะอากาศร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.2 การคาร์บอไนซ์ (Carbonization)

กระบวนการคาร์บอไนซ์เป็นกระบวนการสลายตัวเชิงความร้อนของสารป้อนที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบด้วยการให้ความร้อนอย่างช้า ในสภาวะอับอากาศหรือจำกัดปริมาณออกซิเจน เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนของสารอินทรีย์ ในขณะเดียวกันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อื่นในรูปของเหลวและก๊าซด้วยเช่นกัน โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวเชิงความร้อนของสารตั้งต้นไปเป็นอินทรีย์และสารระเหยได้ในวัตถุดิบโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่าจะเกิดการกลั่นสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และก๊าซต่าง ๆ

ขั้นตอนการคาร์บอไนซ์เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากการการคาร์บอไนซ์เป็นการสลายตัวของสารระเหยได้อย่างช้าๆ ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการสร้างรูพรุน ซึ่งในระหว่างการคาร์บอไนซ์จะมีธาตุและสารระเหยต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ ถูกกำจัดออกในรูปของก๊าซที่ไม่ควบแน่นและน้ำมันทาร์ ได้ถ่านชาร์ที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ จะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยทั่วไปการคาร์บอไนซ์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย

1. ขั้นตอนการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบจะเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 27 ถึง 197 องศาเซลเซียส

2. ขั้นตอนการไพโรไลซิส เป็นการให้ความร้อนแล้วทำให้สารระเหยได้เกิดการสลายตัวไปเป็นก๊าซคาร์บอนเบาและก๊าซที่ควบแน่นเป็นของเหลวในรูปของน้ำมันทาร์ มักเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้ที่อุณหภูมิระหว่าง 197 ถึง 497 องศาเซลเซียส

3. ขั้นตอนที่มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ เกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 497 ถึง 847 องศาเซลเซียส โดยในช่วงนี้การเปลี่ยนแปลงเชิงน้ำหนักจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

ตัวแปรที่สำคัญในการคาร์บอไนซ์เพื่อให้ได้ถ่านชาร์ที่มีสมบัติตามที่ต้องการสามารถทำได้โดยการปรับภาวะดำเนินการให้เหมาะสม ดังนี้

1. อุณหภูมิและเวลา โดยทั่วไปอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ถ่านมากที่สุด และเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนของสารระเหยได้ ไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่นจำนวนมาก และเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง (secondary reaction) ทำให้ได้ถ่านชาร์ลดลง ส่วนน้ำมันทาร์และก๊าซที่ได้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น สมบัติของน้ำมันทาร์มีกลุ่มของสารประกอบที่มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อสลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบ ในขณะที่เวลาในการคาร์บอไนซ์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากนัก

2. อัตราการให้ความร้อน อัตราการให้ความร้อนมีผลต่อสมบัติของถ่านชาร์ ปริมาณของน้ำมันทาร์และสารระเหย การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะส่งผลทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วทำให้ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่และมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนที่อัตราให้ความร้อนต่ำกว่า เนื่องจากถ่านที่ได้จากการ

คาร์บอไนซ์ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ทำให้คาร์บอนเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ และเมื่อถูกกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพหรือวิธีการทางเคมี ซึ่งทำให้สารกระตุ้นจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในรูพรุนของถ่านชาร์ได้ดี และเกิดเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีได้ง่าย

3. ตัวกลางของปฏิกิริยาการคาร์บอไนซ์ ตัวกลางที่เป็นก๊าซมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาการคาร์บอไนซ์ เนื่องจากก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการคาร์บอไนซ์จะถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยปกติก๊าซเฉื่อยต่อปฏิกิริยาการสลายตัวเชิงความร้อนของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวกลาง เช่น ไนโตรเจน และก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ หากใช้ตัวกลางที่เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้จะทำให้ได้ปริมาณถ่านน้อยกว่าใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง แต่จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นสูงกว่า

4. ธรรมชาติของวัตถุดิบ วัตถุดิบแต่ละชนิดมีภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการคาร์บอไนซ์ที่แตกต่างกัน เนื่องจากลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบที่แตกต่างกันทำให้ต้องใช้วิธีกระตุ้นที่ต่างกัน เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงสุด

2.3.3 การกระตุ้น

กระบวนการการกระตุ้นเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของคาร์บอน ทั้งการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นและการทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับสารอื่น ๆ ที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการกระตุ้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องจากวิธีการกระตุ้นนั้นมีหลายวิธีและประสิทธิภาพของการกระตุ้นยังขึ้นกับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ก่อนขั้นตอนการกระตุ้นด้วยการกระตุ้นก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง 3 ลักษณะ ดังนี้

1. เพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมี แล้วทำให้โมเลกุลบางกลุ่มนั้นหลุดออกไปและเกิดส่วนที่สามารถดูดซับได้ขึ้นมาแทน

2. เพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับพื้นที่ผิว ด้วยการทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการจัดเปลี่ยนของโครงสร้างทำให้มีความว่องไวในการดูดซับที่สูงขึ้น

3. มีการกำจัดสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนออกจากบริเวณผิวที่ทำหน้าที่ในการดูดซับ

โดยทั่วไปการผลิตถ่านกัมมันต์ ด้วยวิธีการกระตุ้นมี 2 วิธี

2.3.3.1. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวของคาร์บอน โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือการนำวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์แล้วมาผสมกับสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้น KOH, $ZnCl_2$, $CaCl_2$ และ H_3PO_4 เป็นต้น และนำมาให้ความร้อนในบรรยากาศก๊าซเฉื่อย เพื่อลดความชื้นและก่อให้เกิดรูพรุนที่อุณหภูมิสูง การกระตุ้นด้วยสารเคมีจะใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นที่ไม่สูงมากนัก ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส แต่วิธีนี้มีข้อจำกัด คือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ต้องมีการล้างเอาสารเคมีที่ตกค้างออก ใช้เวลามากขึ้นและมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ตัวอย่างการกระตุ้นทางเคมี ดังนี้

- การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

การกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นวิธีที่นิยมที่สุดวิธีหนึ่ง โดยจะใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ผสมกับวัตถุดิบ ที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส โดยการใช้อุณหภูมิที่ต่ำนี้มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นอย่างมาก หลังจากทำการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 – 850 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ดีในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมนั้น จะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำเอาซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากประสิทธิภาพในการนำเอาซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ที่ค่อนข้างจำกัดนั้น ประกอบกับปัญหาการกัดกร่อนต่อเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ความนิยมใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้นน้อยลงในปัจจุบัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

การกระตุ้นทางเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นสารกระตุ้นนั้น มักใช้ภาวะดำเนินการใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ค่อนข้างต่ำ 400 – 500 องศาเซลเซียส การใช้กรดฟอสฟอริกนี้สามารถผ่านกระบวนการและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และยังคงได้กรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูง

2.3.3.2. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นวิธีการเพิ่มปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน ด้วยก๊าซออกซิไดซ์ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 700 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งก๊าซที่ใช้ทั่วไปคือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือใช้ก๊าซผสมได้ วิธีการนี้เริ่มต้นจากขั้นตอนการคาร์บอไนซ์แล้วตามด้วยการกระตุ้นถ่านชาร์ที่อุณหภูมิสูงภายใต้ก๊าซออกซิไดซ์ ซึ่งไม่มี

สารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ จึงเป็นข้อได้เปรียบของวิธีการนี้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง ปฏิกิริยาระหว่างก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์กับถ่านชาร์แสดงในสมการที่ 2.1 - 2.4

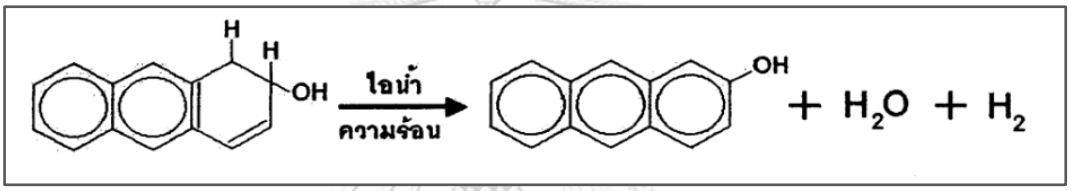
$H_2O + C_x <-> H_2 + CO + C_{x-1}$ (800-900°C) (2.1)

$CO_2 + C_x <-> 2CO + C_{x-1}$ (800-900°C) (2.2)

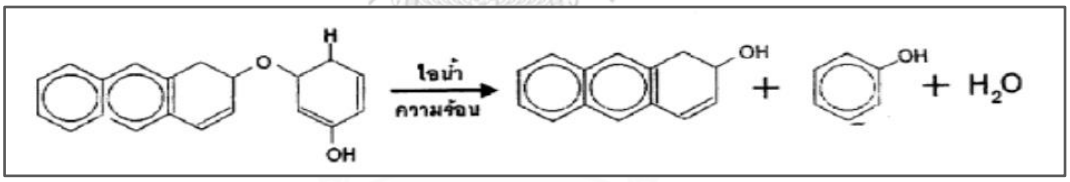
$O_2 + C_x <-> 2CO + C_{x-2}$ (800-900°C) (2.3)

$O_2 + C_x <-> CO_2 + C_{x-1}$ (ต่ำกว่า 600°C) (2.4)

ที่บริเวณผิวของคาร์บอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แสดงในภาพที่ 2.3 และ 2.4 โดยมีการจัดเรียงตัวใหม่ภายในโครงสร้าง และช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำ



ภาพที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการกระตุ้นทางกายภาพโดยกำจัดฟีนอลและน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้น

1. โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น

ถ่านชาร์ที่ได้จากวัตถุดิบที่มีเนื้อแน่น เมื่อถูกกระตุ้นจะทำให้ได้พื้นที่ผิวที่สูงกว่า และมีสัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่ถ่านชาร์ที่ได้จากวัตถุดิบที่มีเนื้อไม่แน่น จะให้พื้นที่ผิวที่ต่ำ เนื่องจากรูพรุนที่พัฒนาขึ้นส่วนใหญ่นั้นเป็นรูพรุนขนาดกลาง

2. ชนิดของก๊าซออกซิไดซ์หรือตัวกระตุ้น

การผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอน้ำ หรือของผสมของก๊าซทั้งสองชนิด โดยมีค่าใช้จ่ายดำเนินการต่ำ

3. อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา

การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้โครงสร้างของถ่านมีความพรุนมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการสลายตัวเชิงความร้อน ทำให้สารระเหยได้สลายตัวแล้วทำให้สารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างถ่านได้ง่ายขึ้นจึงเกิดการสร้างรูพรุนเพิ่ม

4. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

การเพิ่มเวลาในการกระตุ้น ทำให้สารระเหยมีเวลาในการถูกกำจัดนานขึ้น ส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวหรือรูพรุนมากขึ้น

5. ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

ขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินไปจะทำให้ก๊าซที่กระตุ้นไหลและแพร่ผ่านช่องว่างในเบดของถ่านไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ก๊าซหรือสารกระตุ้นสัมผัสกับผิวถ่านได้น้อยลง ส่งผลให้โครงสร้างของถ่านมีการพัฒนาไปเป็นรูพรุนได้น้อย

ตัวอย่างการกระตุ้นทางกายภาพ ดังนี้

- <u>การกระตุ้นด้วยไอน้ำ</u>

วิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นวิธีการที่นิยมอย่างแพร่หลายในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้โมเลกุลของน้ำที่มีขนาดเล็กสามารถเข้าไปในรูพรุนที่มีขนาดเล็กและแพร่เข้ารูพรุนและเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว โดยให้อัตราเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าก๊าซคาร์บอนไดร์ออกไซด์ถึงสามเท่าในภาวะความดัน 10 กิโลปาสคัล และอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปฏิกิริยาในการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำคือ

$C_x + H_2O \rightarrow CO + H_2 \quad \Delta H = +117$ กิโลจูลต่อโมล

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อน แต่โดยทั่วไปนั้นจะสมมติให้เป็นปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน อาจเขียนอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี แบบ Langmuir – Hinshelwood ได้ดังนี้

$$r = \frac{k_1 P_{H2O}}{1 + k_2 P_{H2O} + k_3 P_{H2}}$$

ซึ่ง P_{H2O} คือ ความดันย่อยของไอน้ำ

P_{H2} คือ ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน

k_1, k_2, k_3 คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

- การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกิริยาในการกระตุ้นโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ คือ

$C + CO_2 \rightarrow 2CO \qquad \Delta H = +159.0$ กิโลจูลต่อโมล

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เช่นเดียวกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนี้

$$r = \frac{k_1 P_{CO2}}{1+k_2 P_{CO} + k_3 P_{CO2}}$$

โดย P_{CO2} คือ ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดร์ออกไซด์

P_{CO} คือ ความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

k_1, k_2 และ k_3 คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

2.4 การทดสอบสมบัติของถ่านกัมมันต์

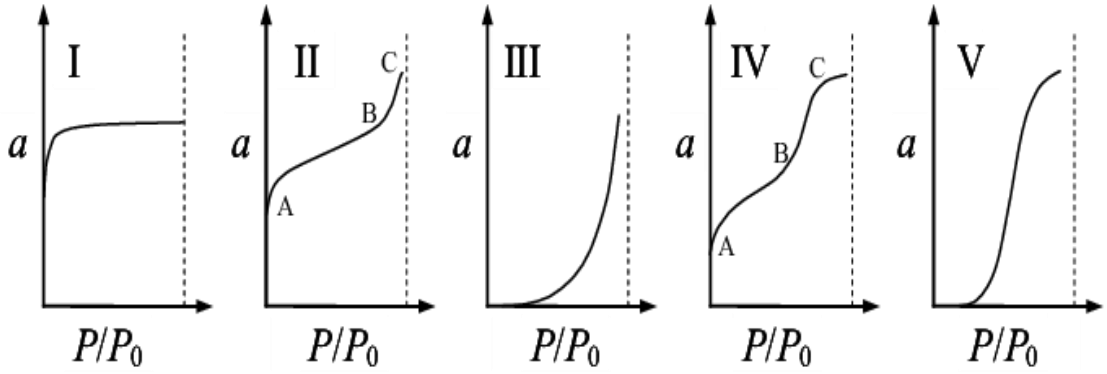
2.4.1 สมบัติทางกายภาพ

การทดสอบสมบัติทางกายภาพที่สำคัญและเป็นประโยชน์ต่อการซื้อขาย คือ การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ความหนาแน่นปรากฏ ค่าความแข็งหรือค่าการขัดถู และค่าการกระจายตัวของอนุภาค โดยมีรายละเอียดในการหาค่าต่างๆ ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.1.1 การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จำเป็นต้องทราบไอโซเทิร์มของการดูดซับก๊าซ โดยไอโซเทิร์มของการดูดซับนั้นจะมีรูปแบบตามธรรมชาติของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ทำการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ที่ความดันย่อยต่างๆ เพื่อสร้างไอโซเทิร์มของการดูดซับของปริมาณสารที่ถูกดูดซับเป็นฟังก์ชันกับความดันย่อยของสารที่ดูดซับ จากไอโซเทิร์มของการดูดซับจะได้ข้อมูล คือ ค่าของพื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าของปริมาณรูพรุน ลักษณะเคมีพื้นผิวของตัวดูดซับ ข้อมูลพื้นฐานของตัวดูดซับและประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบการแยกหรือการทำให้บริสุทธิ์



ภาพที่ 2.5 รูปแบบของไอโซเทิร์มตามการจำแนกประเภทของบรูนัวร์[14]

รูปแบบไอโซเทิร์มของการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แบบ แสดงในภาพที่ 2.5 ตามการจัดประเภทของบรูนัวร์ (Brunauer classification) โดยไอโซเทิร์มที่นิยมใช้ในการอธิบายมากที่สุด คือ ไอโซเทิร์มแบบ I ซึ่งใช้ในการจัดรูปสมการเพื่ออธิบายพฤติกรรมการดูดซับ นอกจากนี้ไอโซเทิร์มแบบ II และ IV ยังพบมากเช่นกัน โดยแต่ละแบบแสดงถึงลักษณะการดูดซับ ดังนี้

ไอโซเทิร์มแบบ I เป็นไอโซเทิร์มที่เกิดการดูดซับตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ มักพบในการดูดซับก๊าซบนตัวดูดซับของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่มากนัก

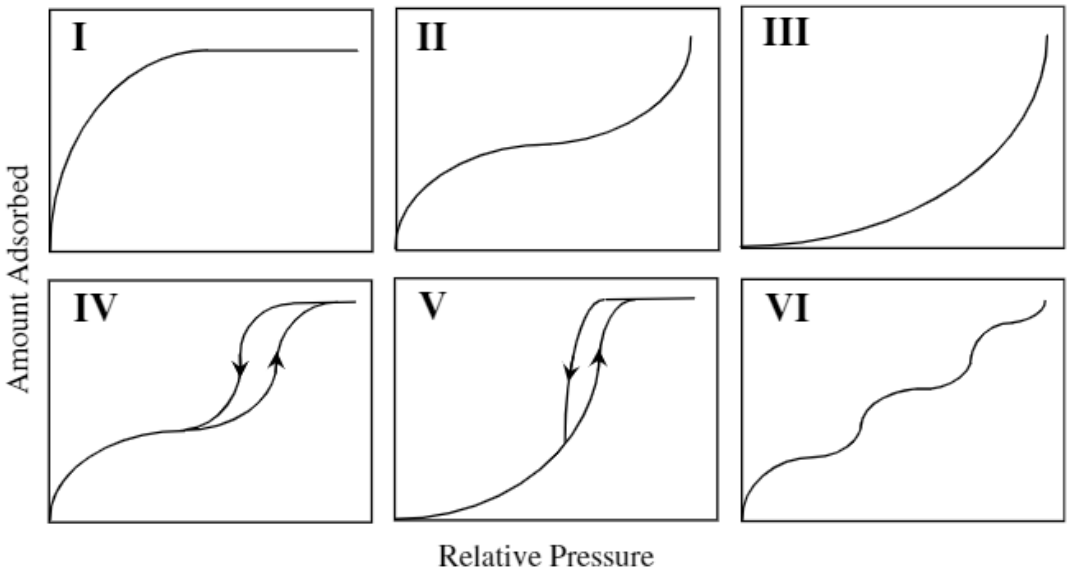
ไอโซเทิร์มแบบ II เป็นไอโซเทิร์มที่ไม่แสดงจุดอิ่มตัวของการดูดซับ โดยมีจุดโค้งของการดูดซับที่เกิดขึ้นภายหลังเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการดูดซับที่เกิดขึ้นในชั้นที่ถัดจากการดูดซับชั้นแรกบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่มีไอโซเทิร์มการดูดซับแบบนี้มักมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนกว้าง เกิดการควบแน่นไอของตัวถูกดูดซับเกิดขึ้นขึ้นภายในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า ตัวดูดซับจึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ดีเมื่อความดันเข้าใกล้ความดันอิ่มตัวของตัวถูกดูดซับ

ไอโซเทิร์มแบบ III เป็นไอโซเทิร์มที่มีลักษณะโค้งออก (Convex) ตามความดันย่อย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความดันย่อย

ไอโซเทิร์ม IV คล้ายคลึงกับไอโซเทิร์มแบบ II แต่มีค่าความดันสัมพัทธ์มีค่าเข้าใกล้ 1

ไอโซเทิร์มแบบ V คล้ายคลึงกับไอโซเทิร์มแบบ III เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าต่ำ จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัวของการดูดซับเมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าสูง

นอกจากนี้ยังมีการแบ่งประเภทของไอโซเทิร์มตามการจำแนก International Union of Pure and Applied Chemist (IUPAC) เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับมีค่าต่ำกว่าจุดวิกฤตของสาร ปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับในรูพรุนเพิ่มขึ้นตามความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 รูปแบบของไอโซเทอมตามการจำแนกแบบ IUPAC[15]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ไอโซเทิร์มแบบ I แสดงลักษณะของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micro-porous substances) ซึ่งมีความดันต่ำ ไอโซเทิร์มจะมีลักษณะชันมาก หลังจากนั้นปริมาตรการดูดซับจะคงที่ เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมจนเต็มด้วยตัวถูกดูดซับ เรียกว่า การดูดซับแบบชั้นเดียวหรือการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir type)

ไอโซเทิร์มแบบ II แสดงลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้นภายหลังภายหลังจากการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (จุด B) และจะก่อให้เกิดการควบแน่นเมื่อความดันสัมพัทธ์ P/P0 = 1

ไอโซเทิร์มแบบ III และ V แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาตรการดูดซับเมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่าสูง แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาอย่างอ่อน (Weak Interaction) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

ไอโซเทิร์มแบบ VI แสดงให้เห็นถึงการเกิดการดูดซับเป็นหลาย ๆ ชั้น ที่แยกออกจากกัน พบในตัวถูกดูดซับที่มีการกระจายขนาดรูพรุนหลายขนาด (Multimodal Pore Distribution)

ไอโซเทิร์มแบบ IV และ V แสดงให้เห็นถึงการเกิดวงฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ของรูพรุนขนาดกลาง ส่วนไอโซเทิร์มแบบ I II และ IV มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่ผิวโดยรวม (Total Surface Area) ไอโซเทิร์มแบบ I และ III มักพบในตัวดูดซับที่มีรูพรุนซึ่งต่างจากไอโซเทิร์มแบบ II ที่มักพบในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (Non-Porous Structure) ส่วนไอโซเทิร์มแบบ III และ V มักไม่ค่อยพบโดยทั่วไป แต่จะพบในระบบที่มีการสร้างพันธะของการดูดซับไม่แข็งแรง ไอโซเทิร์มเหล่านี้ไม่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเนื่องจากชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับถัดจากชั้นแรกซึ่งเป็นชั้นระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับอาจเกิดก่อนที่การดูดซับในชั้นแรกจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์[16]

การคำนวณพื้นที่ผิว

1. การคำนวณพื้นที่ผิวโดยสมการแลงเมียร์ (Langmuir Equation)

สมการแลงเมียร์มีสมมติฐาน คือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น เป็นการดูดซับที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับและแต่ละตำแหน่งของผิวการดูดซับมีลักษณะเหมือนกัน โดยการหาพื้นที่ผิวใช้สมการของแลงเมียร์ ซึ่งมีรูปแบบจากไอโซเทอมชนิดที่สมการมีรูปแบบ คือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\frac{P}{V} = \frac{P}{V_m} + \frac{1}{BV_m} \qquad (2.5)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรการดูดซับของก๊าซที่ถูกดูดซับ (มิลลิโมล/กรัม) ต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับที่ความดันย่อย (P/P_0) ต่าง ๆ

V_m คือ ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียวต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ(มิลลิโมล/กรัม)

B คือ ค่าคงที่

P คือ ความดัน

ค่าพื้นที่ผิวจะได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$A = V_m N_A \sigma \qquad (2.6)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)

N_A คือ เลขอโวกาโดร (Avogadro's number, 6.02×10^{23})

σ คือ ค่าคงตัวของโมเลกุลดูดซับ (ตารางเมตร/โมเลกุล)

สมการดังกล่าวมีประโยชน์อย่างมากที่ใช้ในการหาพื้นที่ผิว อย่างไรก็ตามสมการแลงเมียร์ซึ่งมีสมมติฐานดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมกับตัวดูดซับบางชนิด

2. การคำนวณพื้นที่ผิวโดยวิธีบีอีที (BET)

เนื่องจากแรงในการเกิดการดูดซับทางกายภาพคล้ายกับการเกิดแรงจากการควบแน่นที่เกิดจากแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพ ที่เกิดขึ้นทั้งบนพื้นผิวแบนราบและพื้นผิวโค้ง จึงไม่จำกัดเฉพาะการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monomolecular layer) แต่สามารถเกิดต่อไปจนเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multimolecular layer) ของของไหลปกคลุมพื้นผิวได้

ทฤษฎีของบีอีที (Branauer Emmett and Teller, BET) เป็นการปรับปรุงจากทฤษฎีของแลงเมียร์นี้ โดยสามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุนได้โดยสมการบีอีที ซึ่งมีสมมติฐานว่าชั้นการดูดซับชั้นบนสุดจะอยู่ในสภาพสมดุลกับไอของก๊าซที่เป็นตัวดูดซับ ทำให้ได้อัตราการระเหยของชั้นโมเลกุลต่างๆ เท่ากับอัตราการควบแน่น และกำหนดสมมติฐานอย่างง่าย คือการดูดซับชั้นแรกมีค่าความร้อนการดูดซับ (Heat of adsorption, ΔH_a) ส่วนชั้นการดูดซับชั้นที่สองขึ้นไปจะใช้ค่าความร้อนการควบแน่น (Heat of liquefaction, ΔH_L) โดยสมการทั่วไปของบีอีที (BET) คือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \qquad (2.7)$$

ซึ่ง P_0 คือ ความดันไออิ่มตัว

V_m คือ ปริมาตรการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer capacity)

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

เมื่อสร้างไอโซเทอมระหว่างค่า $\{P / [V(P_0 - P)]\}$ กับ P/P_0 จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $[(C-1) / V_m C]$ และค่าตัดแกน $\{P / [V(P_0 - P)]\}$ และตัดแกนที่จุด $1/(V_m C)$ ซึ่งจะหา V_m ได้

สมการบีอีที ใช้อธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 2 นอกจากนี้ยังลดรูปลงเป็นสมการแลงเมียร์ได้ที่ความดันต่ำ ๆ และสามารถอธิบายไอโซเทอมชนิดที่ 3 ได้ในกรณีที่การดูดซับชั้นแรก (Monolayer adsorption) คายความร้อนน้อยกว่าการควบแน่น (C<1) โดยสามารถใช้คำนวณหาพื้นที่ผิวจากข้อมูลไอโซเทอมได้แม้ว่าการดูดซับชั้นแรกจะเกิดได้ไม่สมบูรณ์

สมการบีอีที สามารถใช้กับสารที่มีรูพรุนได้ ถ้าการดูดซับเกิดขึ้น n ชั้น เมื่อ n สัมพันธ์กับขนาดรูพรุนแสดงในสมการ (2.8)

$$V = \frac{V_m CX - (n+1)X_n + nX^{n+1}}{(1-X) + (C-1)X - CX^{n+1}} \qquad (2.8)$$

เมื่อ $X = P/P_0$

สมการนี้เป็นรูปแบบทั่วไป ซึ่งจะลดรูปเป็นสมการแลงเมียร์ เมื่อ n=1 และเป็นสมการบีอีทีเมื่อ $n = \infty$

วิธีบีอีทีเป็นวิธีที่นิยมใช้คำนวณพื้นที่ผิว โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับวิธีแลงเมียร์ แต่การคำนวณ V_m จะต่างกันโดยกราฟบีอีทีจะเป็นการพล็อตระหว่าง $\{P / [V(P_0 - P)]\}$ กับ P/P_0 ซึ่งจะได้เส้นตรงในช่วงความดันสัมพัทธ์ P/P_0 ระหว่าง 0.05 ถึง 0.35

เมื่อ ความชัน คือ $[(C-1) / V_m C]$

จุดตัด คือ $[1/V_m C]$

จากสมการจะได้ความสัมพันธ์ของ V_m กับจุดตัดและความชัน ซึ่งสามารถหาค่า V_m ได้

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

และจากค่า V_m สามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างได้เช่นเดียวกับวิธีของแลงเมียร์

อย่างไรก็ดีการดูดซับทางกายภาพจะไม่มีการดูดซับเต็มพื้นที่อย่างสมบูรณ์ในชั้นแรก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับผิวของแข็งไม่เท่ากับการดูดซับทางเคมี แต่สมการบีอีทีก็สามารถคำนวณโมเลกุลที่ใช้ในการปกคลุมพื้นที่ผิวของแข็งให้เต็ม 1 ชั้นได้ แม้ว่าการดูดซับชั้นแรกอย่างเต็มพื้นผิวจะเกิดเฉพาะในการดูดซับทางเคมีเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.1.2 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Apparent Density)

ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูงกว่ามักบ่งว่าเป็นถ่านที่มีคุณภาพดีกว่า เนื่องจากสามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมากกว่า

2.4.1.3 ค่าความแข็งและค่าการขัดถู (Hardness and Abrasion Number)

เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสีและความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ต่อกระบวนการล้างวัสดุกรอง (Backwashing) โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและระดับที่ถ่านชาร์ที่ถูกนำมากระตุ้น

2.4.1.4 ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่าน (Particle Size Distribution)

เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับขนาดในช่วงต่างๆ ของผงถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีความละเอียดมากก็จะส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านมากขึ้นด้วยเช่นกัน และทำให้โมเลกุลของก๊าซสามารถดูดซับเข้าไปในโครงสร้างของถ่านได้เร็วขึ้น และทำให้ความดันของก๊าซในระบบไม่ลดลงมาก[7]

2.4.2 สมบัติทางเคมี

1. การดูดซับเมทิลีนบลู สามารถบอกค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้ เหมาะสำหรับโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่มีขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลของเมทิลีนบลู ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงของรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) ที่มีรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

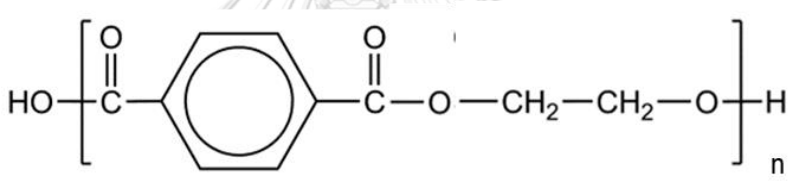
2. การดูดซับไอโอดีน เป็นค่าสำคัญที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับไอโอดีนได้ดี ดังนั้น ค่าการดูดซับจึงเป็นการบ่งชี้ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัม (ของไอโอดีน) /น้ำหนักถ่าน 1 กรัม ค่าการดูดซับของไอโอดีนเป็นการวัดรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ที่มีรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร

3. โมลาสนัมเบอร์ (molar number) เป็นค่าที่บอกปริมาณของรูขนาดใหญ่ (macropore) รูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร โดยถ่านที่มีรูขนาดใหญ่จำนวนมาก จะแสดงค่าโมลาสนัมเบอร์สูง ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่อย่างโมเลกุลสีได้ดีกว่าถ่านที่มีรูพรุนเล็กที่มีค่าโมลาสนัมเบอร์ต่ำ

4. การดูดซับแทนนิน แทนนินเป็นสารผสมประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดใหญ่และสารโมเลกุลขนาดกลาง เช่นเดียวกันผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีทั้งรูขนาดใหญ่ และรูขนาดกลาง ดังนั้นค่าแทนนิน จึงใช้บอกความสามารถในการดูดซับสารแทนนินหรือสารโมเลกุลขนาดกลางและใหญ่ของถ่าน และระบุในหน่วยส่วนในล้านล้าน (ppm, part per million) ซึ่งถ่านกัมมันต์ควรมีค่านี้อยู่ในช่วง 200-362 ppm

5. การดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride Activity) เป็นการหาความพรุนของถ่านกัมมันต์โดยดูจากค่าการดูดซับไออิ่มตัวของสารคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ใช้บอกถึงความสามารถในการดูดซับสารที่เป็นไอระเหย[8]

2.5 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต[17]

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นเทอร์โมพลาสติกโพลีเอสเตอร์ที่ใช้งานทั่วไป เรซินโพลีเอสเตอร์มีคุณสมบัติที่ดีในสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน สมบัติทางเคมี รวมถึงความคงตัวที่ดี ในสภาพปกติ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง ไม่มีผลึก ไม่มีสี มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า มีความแข็งแรงสูง และน้ำหนักเบามาก จึงง่ายต่อการขนส่ง พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแสดงอุณหภูมิการใช้งานที่แตกต่างกันตั้งแต่ −60 องศาเซลเซียส ถึง 130 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีความต้านทานการแตกหักได้ดีเนื่องจากไม่แตกหักจากรอยร้าว มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีความต้านทานต่อแรงกระทบความชื้น แอลกอฮอล์ และตัวทำละลาย[17] โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต แสดงในภาพที่ 2.7

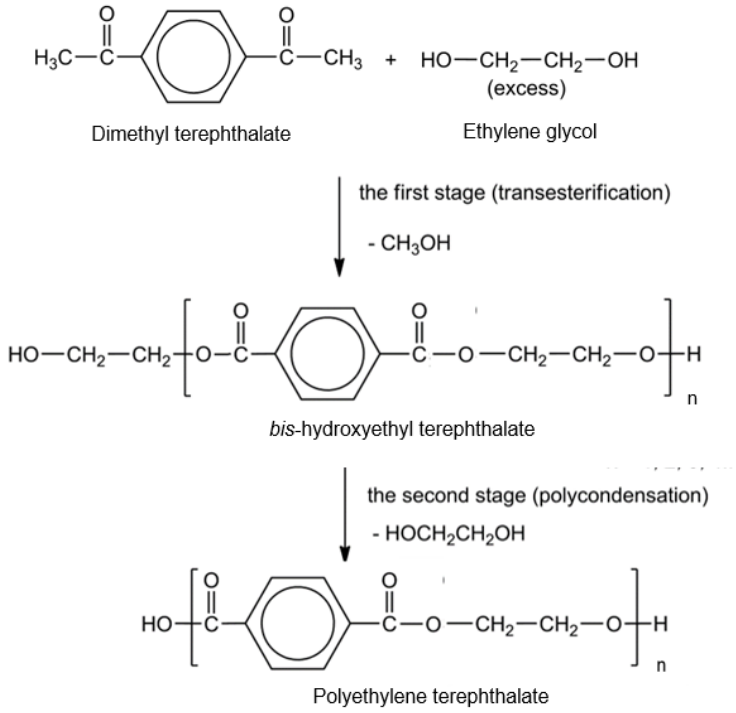
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีการนำมารีไซเคิลมากที่สุดชนิดหนึ่ง โดยมีหมายเลข "1" เป็นสัญลักษณ์ของการรีไซเคิล พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตได้รับการรับรองว่าปลอดภัยสำหรับการสัมผัสกับอาหารและเครื่องดื่มโดย FDA, Health Canada, EFSA และหน่วยงานด้านสุขภาพอื่นๆ[18]

2.6 กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

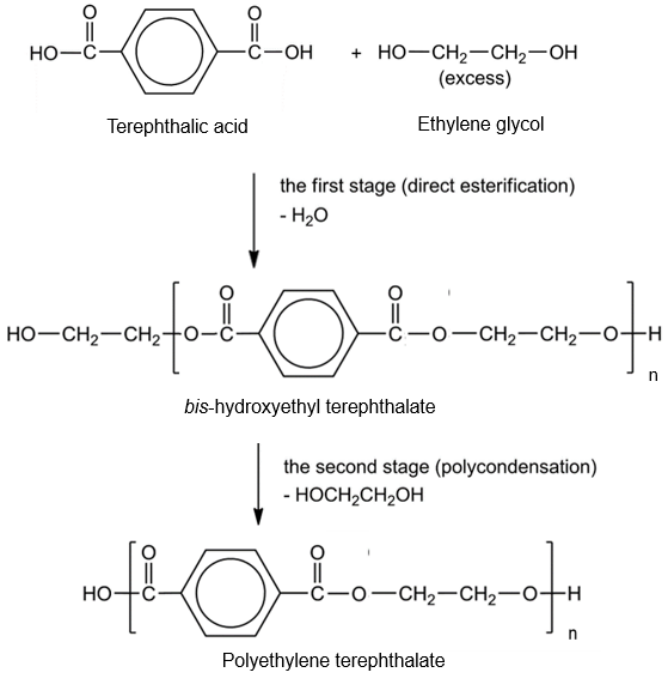
สามารถเตรียมได้ 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 เตรียมจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ระหว่างเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) และไดเมทิลเทเรฟทาเลต (Dimethyl terephthalate, DMT) จะได้ *bis*-hydroxyethyl terephthalate (*bis*-HET) ซึ่งต่อมาเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง เกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่นและมีการกำจัดเอทีลีนไกลคอล แล้วเกิดเป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) แสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน

วิธีที่ 2 เตรียมได้จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) ระหว่างเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และ กรดเทเรฟทาริก (terephthalic acid, TPA) จะได้ *bis*-hydroxyethyl terephthalate (*bis*-HET) และเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง เกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่นและมีการกำจัดเอทีลีนไกลคอล แล้วเกิดเป็นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) แสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7 การใช้งานพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

ปัจจุบันพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีความนิยมใช้งานในรูปของการเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเป็นวัสดุป้องกันน้ำและความชื้นที่ดีเยี่ยม ขวดพลาสติกที่ทำจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจึงถูกนำมาใช้บรรจุน้ำแร่และน้ำอัดลม และมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ในขณะเดียวกันพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตเหมาะสำหรับใช้ในงานพวกสายเทป แผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตสามารถขึ้นรูปด้วยความร้อนเพื่อทำถาดบรรจุภัณฑ์และแผ่นใสครอบบรรจุภัณฑ์ ความเฉื่อยทางเคมีร่วมกับคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ทำให้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานบรรจุภัณฑ์อาหาร การใช้งานบรรจุภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ได้แก่ ขวดเครื่องสำอางที่แข็ง ภาชนะที่ใช้ในไมโครเวฟได้ ฟิล์มใส เป็นต้น[17]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yuan และคณะ [4] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่บรรจุน้ำแร่ที่ใช้แล้วโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในเตาเผาแบบท่อแนวนอน ภาวะการดำเนินการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง และศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่าน 1:1, 2:1 และ 3:1 และผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น 600 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อมวลคาร์บอนที่ 3:1 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยให้สมบัติของพื้นผิวที่ดีที่สุด มีพื้นที่ผิว 2,560 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรไมโครพอร์ 0.994 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 1.130 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ร้อยละ 16

Kaur และคณะ [19] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่บรรจุน้ำแร่และน้ำอัดลมที่ใช้แล้ว โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ภาวะดำเนินการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่าน 1:1, 2:1, 3:1 และ 4:1 และผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 60 มิลลิลิตรต่อนาที และมีอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อมวลคาร์บอนที่ 3:1 ให้สมบัติของพื้นผิวที่ดีที่สุด โดยมีพื้นที่ผิว 1,690 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรไมโครพอร์ 0.78 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

Yuan และคณะ [20] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วโดยการกระตุ้นทางเคมี ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในเตาเผาแบบท่อแนวนอน ภาวะดำเนินการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น 700 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส และผลของชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยมวลสารกระตุ้นต่อคาร์บอนเท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของไนโตรเจน

200 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงสมบัติของพื้นผิวที่ดีที่สุด โดยมีพื้นที่ผิว 2,006 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรไมโครพอร์ 0.73 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 0.84 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีอัตราส่วนโดยมวลสารกระตุ้นต่อคาร์บอนเท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงสมบัติของพื้นผิวที่ดีที่สุด โดยมีพื้นที่ผิว 2,060 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรไมโครพอร์ 0.80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 0.99 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

Esfandiari และคณะ [21] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ ทดลองหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว จากผลการทดลองพบว่าภาวะดำเนินการที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิคาร์บอไนเซชัน 800 องศาเซลเซียส เวลาคาร์บอไนเซชัน 60 นาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเคลวินต่อนาที และอัตราการไหลของไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิกระตุ้น 975 องศาเซลเซียส เวลาในการกระตุ้น 240 นาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเคลวินต่อนาที และอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100 มิลลิลิตรต่อนาที สมบัติของถ่านกัมมันต์จากภาวะดำเนินการที่เหมาะสมมีพื้นที่ผิว 790.31 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าไอโอดีน 630.58 และค่าความหนาแน่นปรากฏ 0.50 กรัมต่อมิลลิลิตร

Carrasco และ คณะ [22] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่บรรจุน้ำแร่ที่ใช้แล้วโดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ และการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของไอน้ำ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ให้สมบัติของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ดีที่สุด โดยมีพื้นที่ผิว 1,002 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรไมโครพอร์ 0.50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 0.59 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอัตราการไหลของไอน้ำ 8.33 มิลลิลิตรต่อนาที ให้สมบัติของพื้นผิวที่ดีที่สุด โดยมีพื้นที่ผิว 1,235 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตร

ไมโครพอร์ 0.59 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 0.74 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

Laszlo และคณะ [23] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดยการกระตุ้นทางกายภาพ ด้วยไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ ภาวะดำเนินการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิว 1,170 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวม 0.625 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ปริมาตรไมโครพอร์ 0.425 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ร้อยละ 9-12

Yuliusman และคณะ [24] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วโดยการกระตุ้นทางกายภาพ ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ ศึกษาผลของอัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ทำการคาร์บอไนซ์ที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 240 นาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 975 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 240 นาที และอัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ให้พื้นที่ผิวสูงสุดที่ 1,591.72 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์หลังจากการกระตุ้นร้อยละ 62 โดยเมื่ออัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ทำให้ได้พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นด้วย

Parra และ คณะ [25] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่บรรจุน้ำอัดลมที่ใช้แล้วด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ เผาด้วยเตาเผาแบบท่อแนวตั้ง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่หายไปหลังจากการเผาไหม้ ที่ภาวะดำเนินการ 12, 35, 58 และ 76% ทำการคาร์บอไนซ์ที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการกระตุ้นถ่านที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตรต่อนาที จากผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีร้อยละผลิตภัณฑ์ที่หายไปหลังจากการเผาไหม้ 76% มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ 2,468 ตารางเมตรต่อกรัม โดยเมื่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่หายไปหลังจากการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กทั้งหมดเกิดการเพิ่มขึ้นทีละน้อย และทำให้ได้พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นด้วย

Lian และ คณะ [26] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่บรรจุน้ำดื่มด้วยวิธีกระตุ้นทางเคมี ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทำการกระตุ้นถ่านที่อัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อมวลคาร์บอนที่ 2:1 อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.30 ชั่วโมง ผลการทดลองให้ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิว 2,831 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวม 1.68 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงสุดเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากพอลิไวนิลคลอไรด์ ยางรถยนต์ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

Bota และคณะ [27] ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากเม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและแผ่นเซลลูโลสด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์ คาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไนโตรเจน 50 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไอน้ำ 18 กรัมต่อชั่วโมง ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อหมุน เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์จากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยเวลาในการกระตุ้น 90 นาที และถ่านกัมมันต์จากแผ่นเซลลูโลสด้วยเวลาในการกระตุ้น 45 นาที พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีพื้นที่ผิว 1,190 ตารางเมตรต่อกรัม และถ่านกัมมันต์จากแผ่นเซลลูโลสมีพื้นที่ผิว 760 ตารางเมตรต่อกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 รูปแบบการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้ว ด้วยการกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นทางกายภาพ และปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

(1) เตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง (Vertical furnace) สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงถึง 1200 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1 เตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง

(2) เครื่องปฏิกรณ์สำหรับทำการก่อกัมมันต์ แสดงในภาพที่ 3.2

ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับทำการกระตุ้น

(3) หม้อต้มไอน้ำ

(4) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ (Flow meter)

(5) ครกสำหรับตำสาร

(6) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

(7) ตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร

(8) ตะแกรงร่อนขนาด 2 และ 2.8 มิลลิเมตร

(9) เครื่องชั่งความละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettle Toledo

(10) เครื่องกรองสุญญากาศ ยี่ห้อ Vacuubrand รุ่น ME 1 C

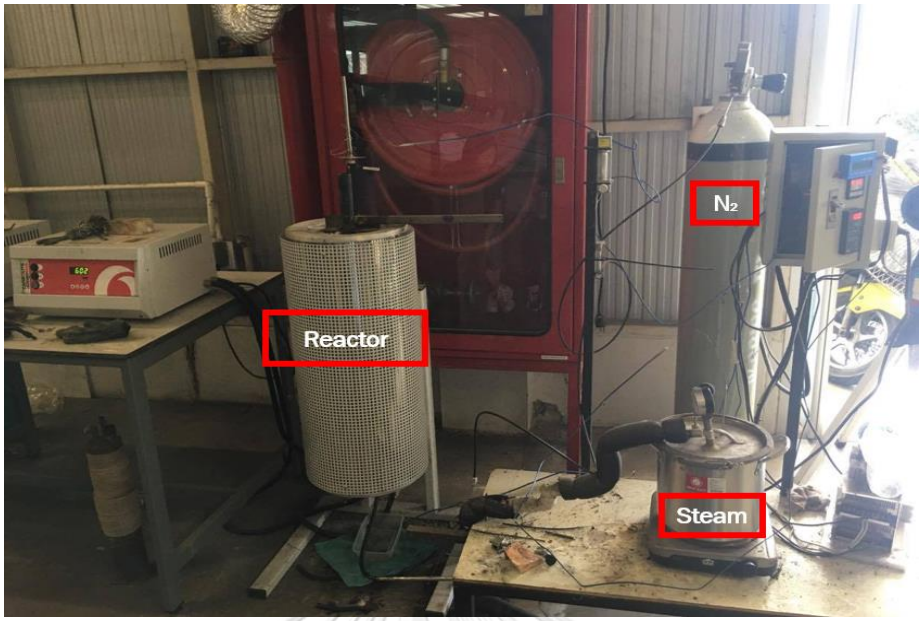
(11) กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 40 ขนาด 110 มิลลิเมตร

(12) ตู้อบ ยี่ห้อ Binder

(13) ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)

(14) เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3.3 ชุดกระตุ้นประกอบด้วยเตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง เครื่องปฏิกรณ์สำหรับทำการกระตุ้น หม้อต้มไอน้ำ ก๊าซไนโตรเจน และเทอร์โมคัปเปิล

3.3 สารเคมีที่ใช้

(1) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

(2) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 37%

(3) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) 99.99%

(4) น้ำกลั่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4 วัตถุดิบ

ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี

3.5 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

(1) เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (Thermogravimetric analysis : TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TG/DTA Pyris Diamond ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน แสดงในภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

(2) เครื่องสำหรับวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ด้วย Thermogravimetric Analysis (TGA) ยี่ห้อ Leco รุ่น TGA701 ใช้วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงที่ ความชื้น และสารระเหย แสดงในภาพที่ 3.5

ภาพที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

(3) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN628 ใช้วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน แสดงในภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ

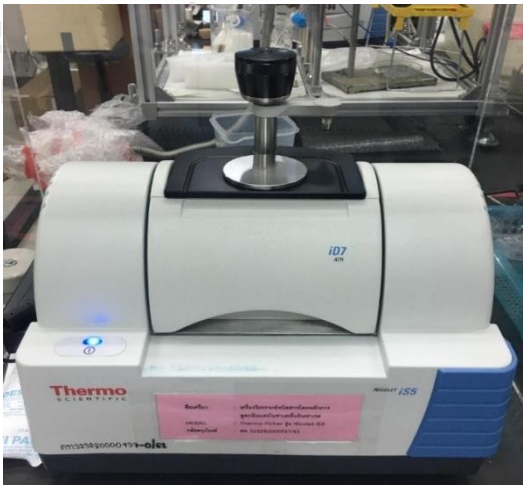
(4) เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer: BET) ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน ยี่ห้อ Micromeritic รุ่น ASAP2020 แสดงในภาพที่ 3.7

ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน

(5) เครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา แสดงในภาพที่ 3.8

ภาพที่ 3.8 เครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

(6) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared spectroscopy, FTIR) ยี่ห้อ Thermo Ficher รุ่น Nicolet iS5 ใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ช่วงความยาวคลื่นที่แสกน 500 – 4000 ซม$^{-1}$ แสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

(7) เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Discover ใช้ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ชนิด Cu Kα (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5406 อังสตรอม) ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงในภาพที่ 3.10

ภาพที่ 3.10 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์

3.6 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.6.1 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี

วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis: TGA)

3.6.2 คาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตให้เป็นถ่าน

นำขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี แยกฝาขวดและฉลากออก อัดให้ขวดมีปริมาตรเล็กที่สุดแล้วนำไปบรรจุในเตาเผาถ่าน ที่ทำจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร แสดงในภาพที่ 3.11 ทำการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการคาร์บอไนซ์เป็นถ่านชาร์ โดยควบคุมอุณหภูมิระหว่างการคาร์บอไนซ์ ให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้จนเย็น จากนั้นนำถ่านชาร์ออกจากเตาเผาก่อนนำไปผ่านกระบวนการปรับสภาพ

ภาพที่ 3.11 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร

3.6.3 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

นำถ่านที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ มาบดและคัดขนาดให้มีขนาด 2 ถึง 2.8 มิลลิเมตร ด้วยตะแกรงร่อนขนาด 2 และ 2.8 มิลลิเมตร จะได้ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส และถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี ขนาด 2 – 2.8 มิลลิเมตร แสดงในภาพที่ 3.12 และ 3.13

ภาพที่ 3.12 ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส ขนาด 2 – 2.8 มิลลิเมตร

ภาพที่ 3.13 ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี ขนาด 2 – 2.8 มิลลิเมตร

3.6.4 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี

(1) วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณตามวิธีการ ASTM D7582

(2) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุตามวิธีการ ASTM 3176

(3) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย

(4) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

(5) วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของถ่านด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

(6) วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.6.5 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

3.6.5.1 การกระตุ้นถ่านด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

สารกระตุ้นที่ใช้ คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อัตราส่วนโดยมวลของสารกระตุ้นต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 2:1 ถึง 4:1 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 700 ถึง 900 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 1 ถึง 2.5 ชั่วโมง โดยมีตัวแปรที่ศึกษา 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต อุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้น และมีขั้นตอนการกระตุ้นดังต่อไปนี้

(1) ชั่งถ่านชาร์ที่ผลิตจากการคาร์บอไนซ์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ขนาด 2 ถึง 2.8 มิลลิเมตร จำนวน 20 กรัม ใส่ในบีกเกอร์

(2) ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จำนวน 40 60 และ 80 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นจำนวน 100 มิลลิลิตร และใช้แท่งแก้วคนจนสารละลายหมด

(3) เทสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงในบีกเกอร์ที่บรรจุถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต กวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต 2:1 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ

(4) ระเหยน้ำออกด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(5) บรรจุสารที่ได้ลงในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วนำไปกระตุ้นในเตาเผาให้ความร้อนแนวตั้ง ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหลคงที่ของก๊าซไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที

(6) ตั้งอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น คือ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

(7) ใช้เวลากระตุ้น 1, 1.5, 2 และ 2.5 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิเตาเผาจนถึงอุณหภูมิห้อง

(8) นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ล้างด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเบอร์ 40 ล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 100 มิลลิลิตร 3 ครั้ง แล้วล้างตามด้วยน้ำกลั่น เพื่อปรับสภาพโดยสังเกตจากน้ำที่ล้างถ่านกัมมันต์ จนถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่า pH เป็นกลาง

(9) อบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.6.5.2 การกระตุ้นถ่านด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการทางกายภาพโดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวด ที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น 1 ถึง 4 ชั่วโมง โดยมีตัวแปรที่ศึกษา 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้น และมีขั้นตอนการกระตุ้นดังต่อไปนี้

(1) ชั่งถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ขนาด 2 ถึง 2.8 มิลลิเมตร จำนวน 20 กรัม บรรจุใส่ในเครื่องปฏิกรณ์

(2) ไปกระตุ้นในเตาเผาให้ความร้อนแบบแนวตั้ง ป้อนไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์หลังจากที่เตาเผามีอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ด้วยอัตราการไหลคงที่ของก๊าซไนโตรเจน 200 มิลลิลิตรต่อนาที

(3) ตั้งอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น คือ 800 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

(4) ใช้เวลาในการกระตุ้น 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิเตาเผาจนถึงอุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

หมายเหตุ ให้สัญลักษณ์แทนตัวอย่างถ่านและถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตดังนี้

PETW แทน ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส

PETC แทน ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี

PETW-KOHx(y)(z) แทน ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี

เมื่อ x แทน อัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

y แทน อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น

z แทน เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

PETW-H(a)(b) แทน ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ

เมื่อ a แทน อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น

b แทน เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

3.6.6 หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์

หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย

3.6.7 วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากภาวะที่เหมาะสม

(1) วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณตามวิธีการ ASTM D7582

(2) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุตามวิธีการ ASTM 3176

(3) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

(4) วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

(5) วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

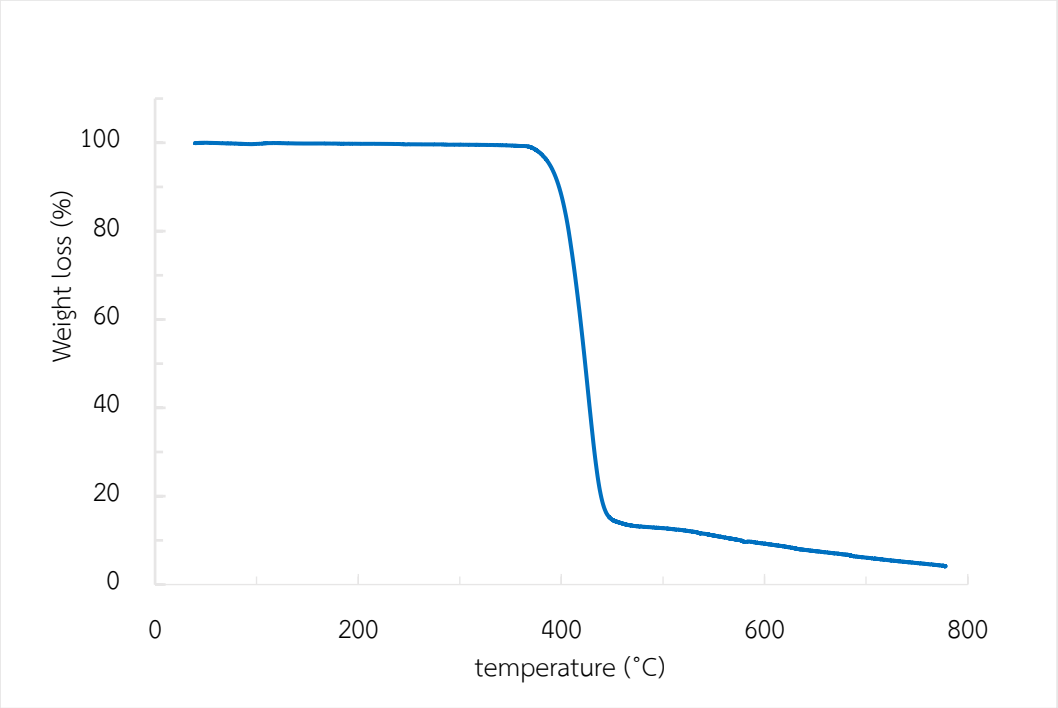
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลและอภิปรายผลงานวิจัย

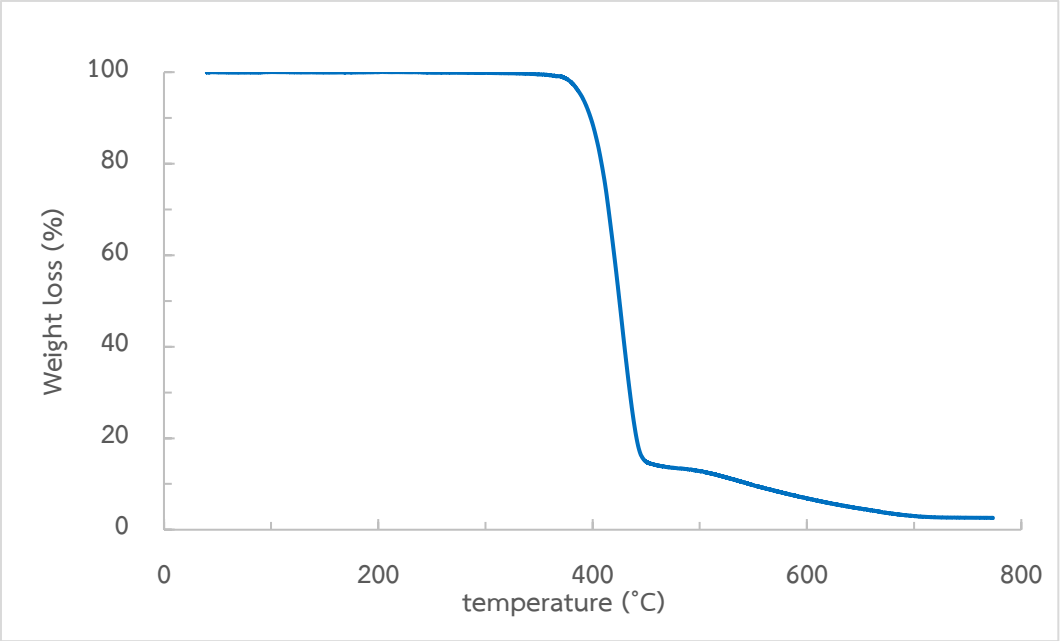
จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติงานตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทดลองได้นำเสนอในรูปแบบของตารางและกราฟ ตามลำดับดังนี้

4.1 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี

4.1.1 วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis: TGA)



ภาพที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ TGA ของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส



ภาพที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ TGA ของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี

การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนเป็นเทคนิคที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงเชิงน้ำหนักของสารที่ต้องการวิเคราะห์ พบว่าเมื่อทดสอบการสลายตัวเชิงความร้อนและการเปลี่ยนแปลงโดยน้ำหนักของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจนแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าเมื่อให้ความร้อนเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงเชิงน้ำหนักร้อยละ 90 โดยประมาณ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปเป็น 500 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 800 องศาเซลเซียส พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเชิงน้ำหนักเพียงเล็กน้อย แสดงว่าอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เหมาะสมสำหรับกระบวนการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไปเป็นถ่านชาร์ เนื่องจากสารระเหยและก๊าซต่างๆ เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนจนเหลือเพียงคาร์บอนคงตัวในช่วงอุณหภูมินี้ และช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส เหมาะสมสำหรับกระบวนการกระตุ้นเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงเชิงน้ำหนักเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง[4] ดังนั้นจึงได้อุณหภูมิในการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณและองค์ประกอบแบบแยกธาตุ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี

วัตถุดิบ	การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	คาร์บอนคงตัว (FC, %)	สารระเหย (VM, %)	เถ้า (Ash, %)
ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส	70.51	28.87	0.63
ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี	67.71	31.80	0.49

หมายเหตุ * ร้อยละโดยน้ำหนักมาตรฐานแห้ง (%dry basis)

จากผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ของขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีที่อุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าถ่านชาร์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสมีค่าคาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า ร้อยละ 70.51 28.87 และ 0.63 ตามลำดับ ส่วนถ่านชาร์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีมีค่าคาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า ร้อยละ 67.71 31.80 และ 0.49 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการคาร์บอไนซ์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้ถ่านชาร์ที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 70.51 และ 67.71 เมื่อใช้ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีตามลำดับ และพบว่ามีปริมาณเถ้าต่ำซึ่งเป็นถ่านชาร์ที่มีองค์ประกอบเหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบเพื่อกระตุ้นไปเป็นถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ปริมาณสารระเหยได้ยังมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 28.87-31.80 เนื่องจากระหว่างกระบวนการการคาร์บอไนซ์นั้น จะมีธาตุและสารระเหยต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ ถูกกำจัดออกในรูปของก๊าซที่ไม่ควบแน่นและก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ควบแน่นได้ ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบและมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึกเกิดขึ้น โดยสารระเหยหรือไฮโดรคาร์บอนเบาที่เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนอาจไปอุดบริเวณช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก[4][23]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี

วัตถุดิบ	**การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)**			
	คาร์บอน (C, %)	**ไฮโดรเจน (H, %)**	**ไนโตรเจน (N, %)**	**ออกซิเจน (O, %)**
ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส	84.32	4.03	0.06	11.59
ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี	83.75	4.09	0.03	12.13

หมายเหตุ * ออกซิเจน = 100 – ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นธาตุออกซิเจน

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีแสดงในตารางที่ 4.2 โดยถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสมีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนร้อยละ 84.32, 4.03, 0.06 และ 11.59 ตามลำดับ ในขณะที่ถ่านชาร์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีมีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนร้อยละ 83.75, 4.09, 0.03 และ 12.13 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงว่าถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทั้งสองชนิดมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมากที่สุด รองลงมา คือ ธาตุออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ตามลำดับ จากโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจะเห็นได้ว่ามีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นองค์ประกอบและมีธาตุคาร์บอนในองค์ประกอบมากที่สุด[4][22][23]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี

วัตถุดิบ	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส	1.8954	0.000848	2.0742
ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี	5.9318	0.002266	1.5279

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีมีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดต่ำ เนื่องจากการคาร์บอไนซ์เป็นขั้นแรกของการสร้างรูพรุนและในระหว่างการคาร์บอไนซ์จะเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบรวมถึงสารระเหยได้ไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่นและไฮโดรคาร์บอนเบาทำให้ถ่านชาร์มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบและมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึกเกิดขึ้นและสารระเหยหรือไฮโดรคาร์บอนเบาที่สลายตัวเชิงความร้อนไปอุดบริเวณช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึกทำให้มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

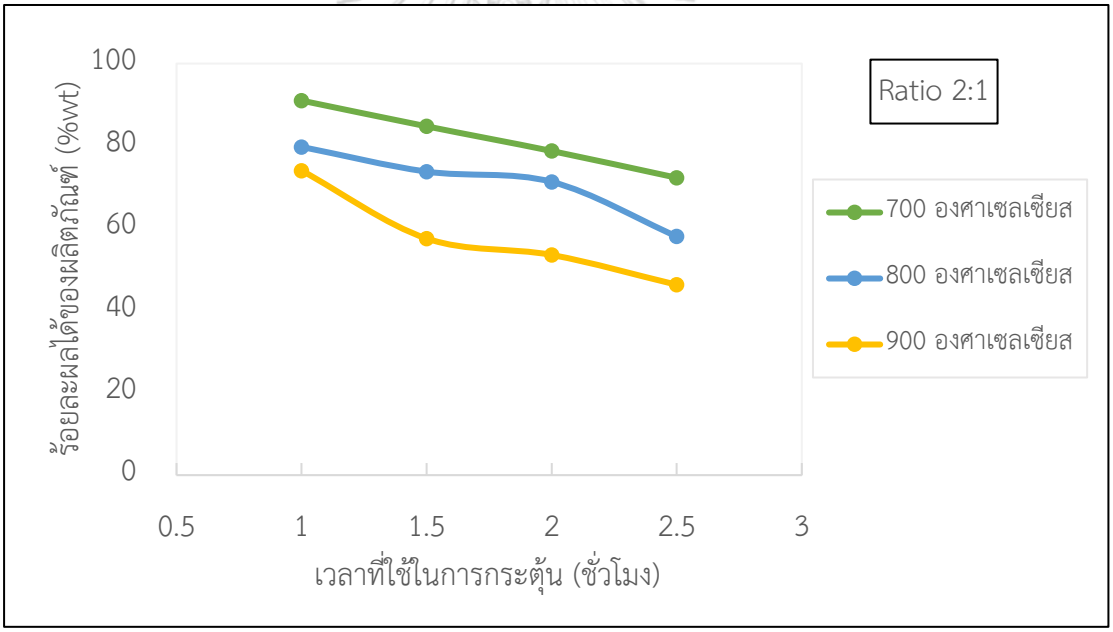
การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านชาร์จากการคาร์บอไนซ์ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี พบว่ามีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดน้อยมาก จึงนำถ่านชาร์มากระตุ้นหรือทำปฏิกิริยาก่อกัมมันต์ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดให้มีค่าสูงขึ้นและเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี จึงได้ทำการกระตุ้นถ่านทั้งหมดสองวิธี คือ กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี และกระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

4.3.1 ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส

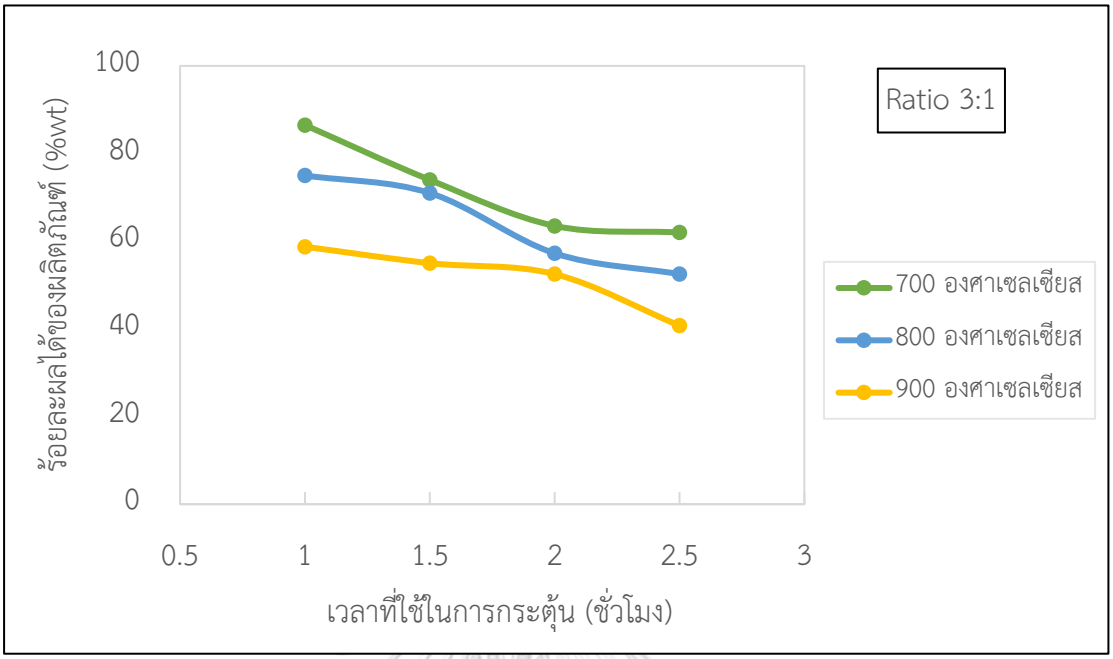
4.3.1.1 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีนี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีจะทำการศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

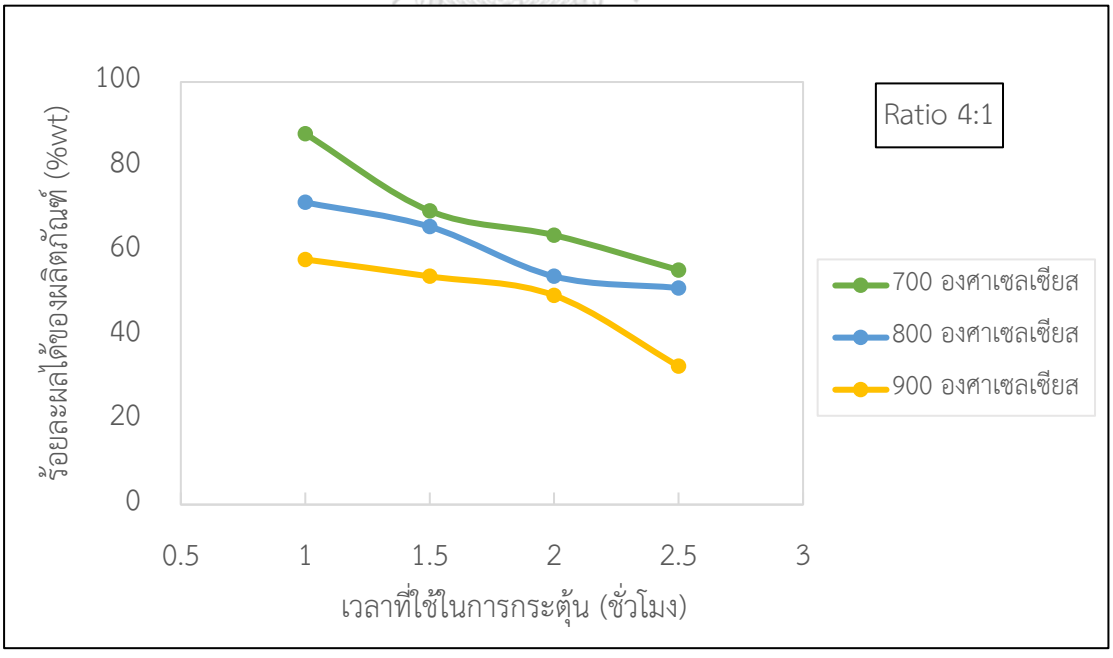
4.3.1.1.1 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี



ภาพที่ 4.3 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1



ภาพที่ 4.4 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 3:1

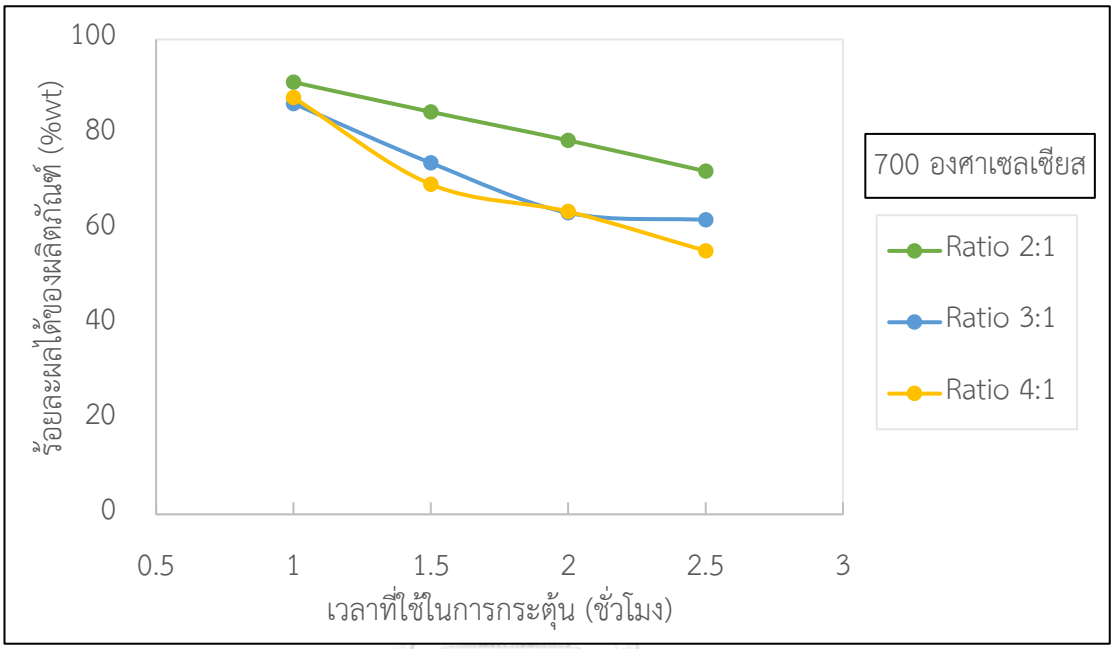


ภาพที่ 4.5 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 4:1

ภาพที่ 4.3 4.4 และ 4.5 แสดงผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นสูงขึ้น ทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง[22] เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยาก่อกัมมันต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง ทำให้ก๊าซที่ไม่ควบแน่นและไฮโดรคาร์บอนเบาที่เกิดจากการสลายตัวเชิงความร้อนที่อุณหภูมิต่ำเกิดการสลายตัวในขั้นที่สอง ทำให้สารกระตุ้นแพร่เข้าไปในถ่านชาร์ได้มากขึ้น จึงมีการสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเวลาในการกระตุ้นมากขึ้นถ่านชาร์ก็จะได้รับความร้อนที่ต่อเนื่องจนเกิดการสลายตัวของสารระเหยได้ออกไปจนเหลือแต่องค์ประกอบหลักของคาร์บอนคงตัว ทำให้สารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านหลุดออกไปมากขึ้น ปริมาณสารระเหยที่เกิดปฏิกิริยาแตกสลายไปเป็นก๊าซเป็นสาเหตุที่ทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลงโดยน้ำหนัก

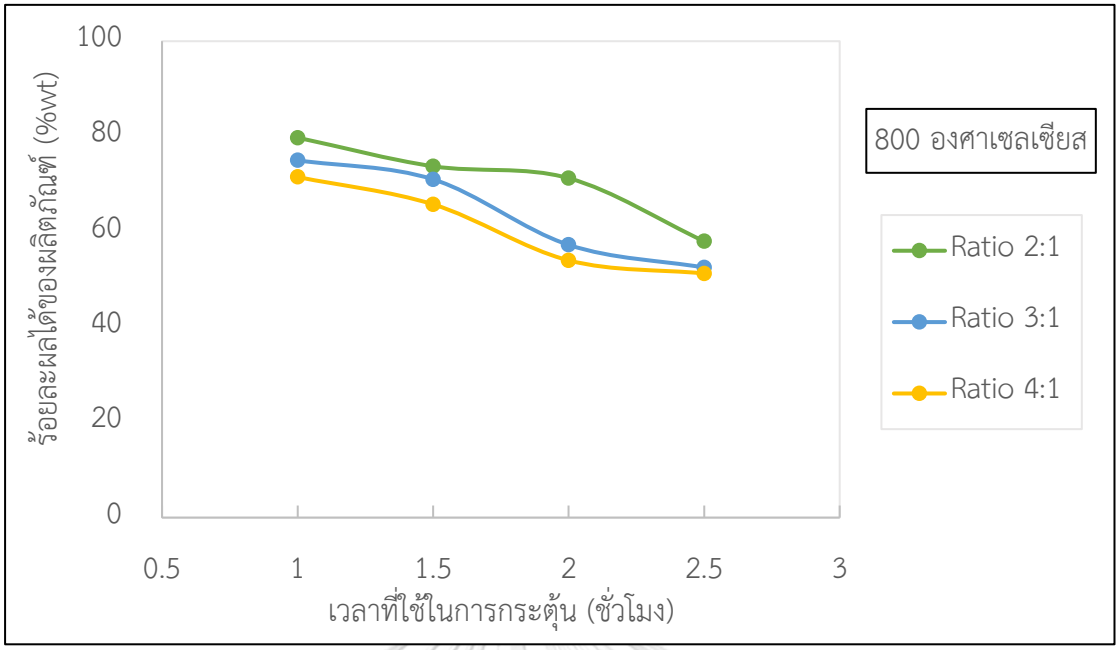
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.1.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

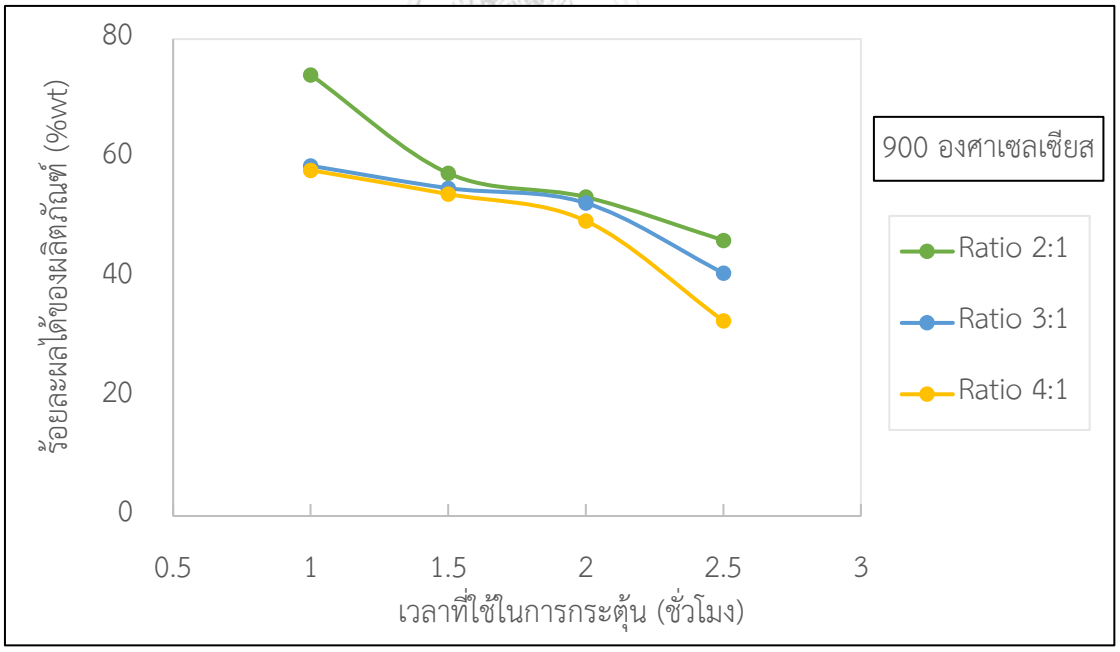


ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.6 4.7 และ 4.8 แสดงผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง [4] เนื่องจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างรูพรุนของถ่าน และเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับคาร์บอนอะตอมที่ผิวถ่าน และมีการสลายตัวจากปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนออกไซด์ขึ้นระหว่างการก่อกัมมันต์ทางเคมี พฤติกรรมนี้อาจเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชัน ดังสมการ (4.1) - (4.3)

$$4KOH + C \leftrightarrow 4K + CO_2 + 2H_2O \quad (4.1)$$

$$6KOH + 2C \leftrightarrow 2K + 3H_2 + 2K_2CO_3 \quad (4.2)$$

$$K_2CO_3 \leftrightarrow K_2O + CO_2 \quad (4.3)$$

นอกจากนี้ตัวกลาง เช่น K_2CO_3 และ K_2O ทำปฏิกิริยาที่ไซต์ไดนามิกที่มีคาร์บอน แสดงในสมการ (4.4) และ (4.5)

$$K_2CO_3 + 2C \leftrightarrow 2K + 3CO \quad (4.4)$$

$$K_2O + C \leftrightarrow 2K + CO \quad (4.5)$$

ซึ่งการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนออกไซด์นั้นนำไปสู่การสร้างรูพรุนในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์[19]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1 3:1 และ 4:1

KOH : Char ratio	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
2:1	700	1.00	206.86	0.1151	2.23
		1.50	265.33	0.1488	2.24
		2.00	289.60	0.1563	2.16
		2.50	645.46	0.3573	2.21
	800	1.00	685.83	0.3820	2.23
		1.50	795.47	0.4385	2.21
		2.00	1062.21	0.5791	2.18
		2.50	845.98	0.4718	2.23
	900	1.00	772.70	0.4251	2.20
		1.50	928.27	0.5113	2.20
		2.00	1067.36	0.5925	2.22
		2.50	1043.04	0.5826	2.23
3:1	700	1.00	422.03	0.2300	2.18
		1.50	436.79	0.2430	2.23
		2.00	666.72	0.3701	2.22
		2.50	391.44	0.2216	2.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

KOH : Char ratio	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
3:1	800	1.00	493.71	0.2843	2.30
		1.50	877.57	0.4915	2.24
		2.00	1210.73	0.6690	2.21
		2.50	418.26	0.2260	2.16
	900	1.00	750.35	0.4154	2.21
		1.50	906.04	0.5245	2.32
		2.00	1216.41	0.6986	2.30
		2.50	1056.97	0.5791	2.19
4:1	700	1.00	236.06	0.1270	2.15
		1.50	674.95	0.3916	2.32
		2.00	532.23	0.3195	2.40
		2.50	209.91	0.1190	2.27
	800	1.00	564.58	0.3170	2.25
		1.50	828.37	0.4639	2.24
		2.00	708.97	0.3955	2.23
		2.50	413.03	0.2276	2.20
	900	1.00	449.57	0.2457	2.19
		1.50	899.91	0.4882	2.17
		2.00	1450.35	0.8346	2.30
		2.50	990.55	0.5411	2.19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

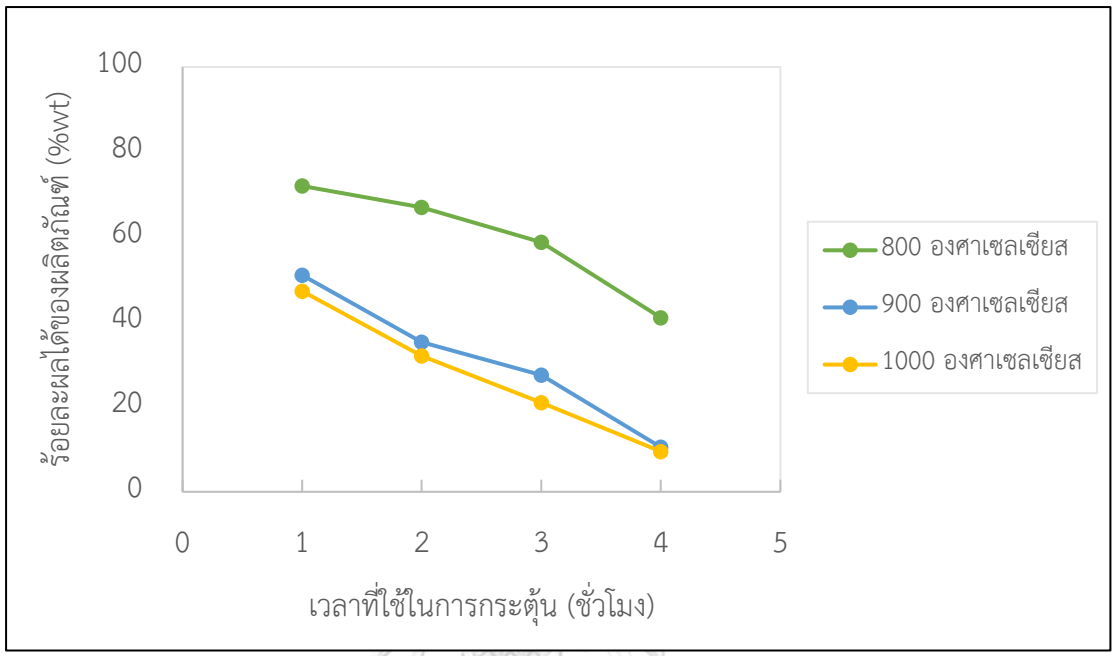
จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นมากขึ้นจะทำให้ได้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มขึ้น[20] เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนของสารระเหยได้ที่ยังมีอยู่ในองค์ประกอบของถ่าน เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวในขั้นที่สองไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่นและในขณะเดียวกันนั้นเองโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างถ่านและเกิดปฏิกิริยากับผิวถ่านของถ่านชาร์ได้มากขึ้น ทำให้เกิดการก่อกัมมันต์ไปเป็นถ่านที่มีโครงสร้างของคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนมากขึ้น[4] และเมื่อเวลากระตุ้นดำเนินการต่อไป ทำให้สารระเหยเกิดการสลายตัวไปจนหมด ทำให้สารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างภายในถ่านชาร์ได้มากขึ้น และทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอะตอม จัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส คือ ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 4:1 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 900 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 2 ชั่วโมง ให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 1450.35 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.8346 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

4.3.1.3 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพนี้ ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเป็นสารออกซิไดซ์ การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพจะทำการศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

4.2.1.3.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ



ภาพที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

ภาพที่ 4.9 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด เมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิกระตุ้น 800 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และที่เวลากระตุ้น 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นสูงขึ้น ทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง[22] โดยการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ส่งผลให้เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนของสารระเหยได้ที่ยังยึดเกาะพันธะกับคาร์บอนอะตอมเกิดการสลายตัวไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่น จนเหลือแต่อะตอมคาร์บอน จึงพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและให้เวลาดำเนินการต่อไป จึงเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวไปเป็นก๊าซจำนวนมาก ทำให้มีผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านกัมมันต์มีน้ำหนักลดลง นอกจากนี้เมื่อเหลือเพียงอะตอมของคาร์บอน จึงทำให้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เป็นสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างรูพรุนของถ่านและเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนอะตอมที่จัดเรียงตัวกันได้สมบูรณ์มากขึ้น

4.3.1.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด

อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
800	1	592.70	0.3151	2.13
	2	855.91	0.4707	2.20
	3	1138.18	0.6309	2.22
	4	864.67	0.4804	2.22
900	1	1229.45	0.7581	2.47
	2	1280.98	0.7739	2.42
	3	1634.59	1.0434	2.55
	4	1379.06	0.8507	2.47
1000	1	877.61	0.5232	2.39
	2	584.81	0.3295	2.25
	3	569.62	0.3038	2.13
	4	354.97	0.1820	2.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นมากขึ้นจะทำให้ได้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย[21][22] เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการสลายตัวเชิงความร้อนจนคาร์บอนอะตอมที่ยังประกอบด้วยสารระเหยได้ เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวเชิงความร้อนในขั้นที่สองจนเหลือแต่โครงสร้างที่ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมยึดเกาะกัน จากนั้นเมื่อให้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เป็นสารกระตุ้น

สามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างถ่านและเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนอะตอมที่ผิวและโครงสร้างได้ง่ายขึ้น ทำให้มีการสร้างรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเป็นการเพิ่มเวลาให้สารระเหยเกิดการสลายตัวไปทั้งหมด จนเหลือแต่พันธะคาร์บอน-คาร์บอน ที่จัดเรียงตัวกันและมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้เมื่อให้สารกระตุ้นจึงสามารถแพร่เข้าสู่เนื้อถ่านได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยากับผิวถ่านเกิดการขยายรูพรุนที่มีอยู่แล้ว และสร้างรูพรุนขึ้นใหม่ซึ่งจะช่วยให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น ปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับคาร์บอนที่ผิวถ่าน แสดงดังสมการที่ (4.6)

$$H_2O + C <-> H_2 + CO + C \quad (4.6)$$

พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส คือ อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 900 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 3 ชั่วโมง แสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 1634.59 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.0434 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส และเวลาในการกระตุ้นมากกว่า 3 ชั่วโมงส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดลดลง เนื่องจากการใช้อุณหภูมิกระตุ้นที่สูงเกินไปและเวลาในการกระตุ้นนานเกินไป จะทำให้รูพรุนเกิดการยุบตัวและขยายตัวไปเป็นรูพรุนที่มีขยายใหญ่[21] ผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ใกล้เคียงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

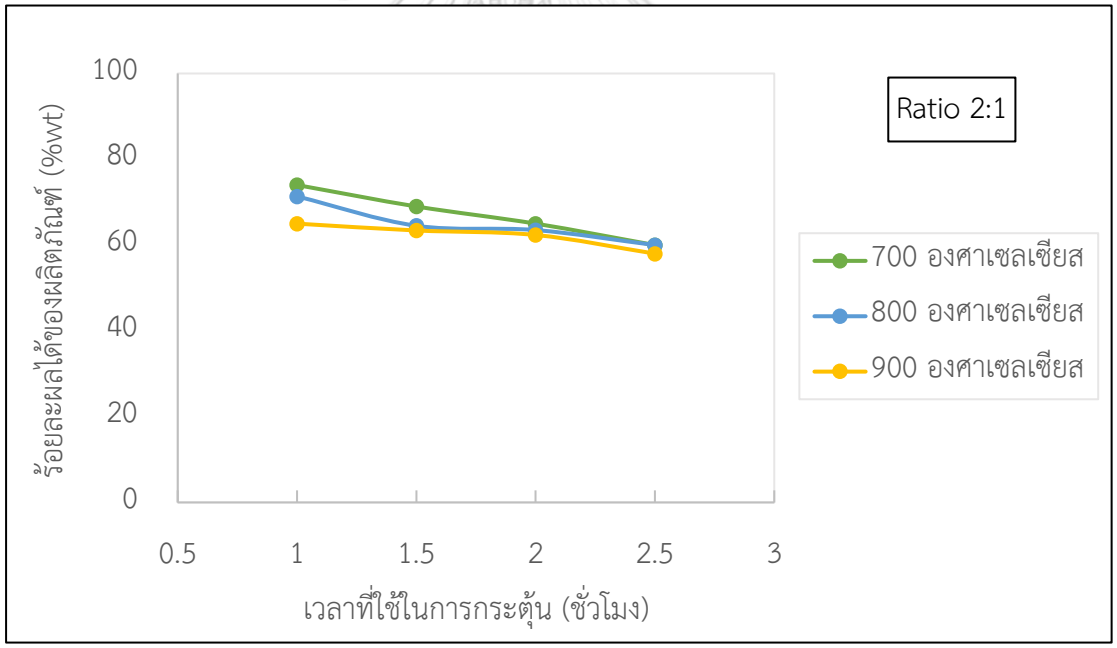
จากผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นทางกายภาพ พบว่าภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด ที่ภาวะการกระตุ้นที่อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 3 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวสูงสุด 1634.59 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 1.0434 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.55 นาโนเมตร

4.3.2 ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี

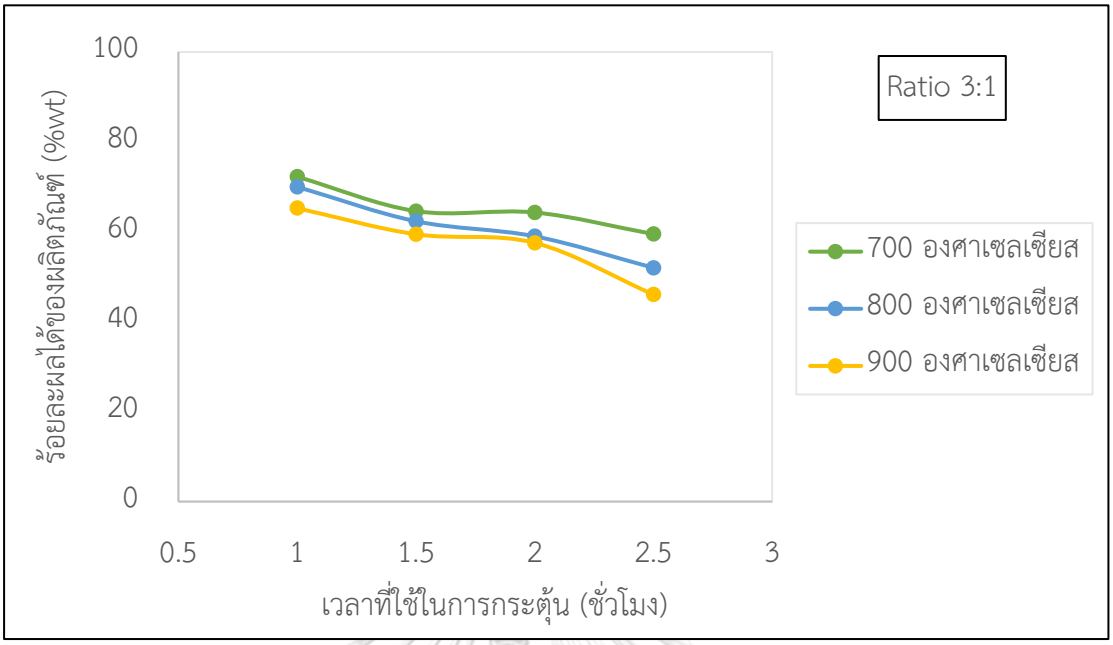
4.3.2.1 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีนี้จะใช้สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีจะทำการศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

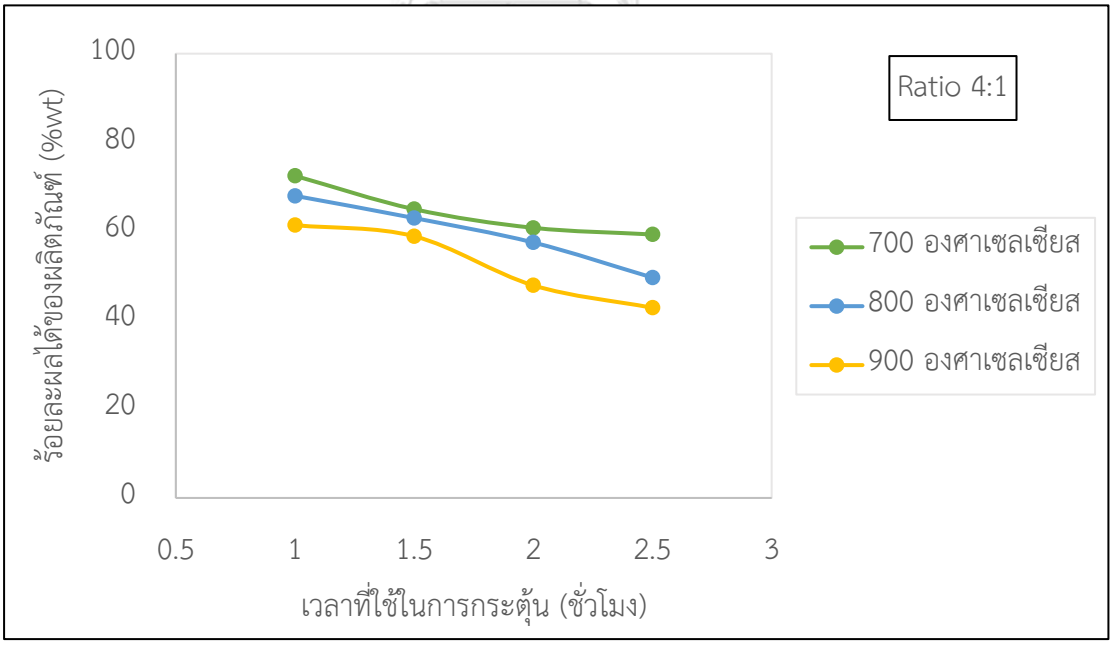
4.3.2.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี



ภาพที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 2:1



ภาพที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 3:1

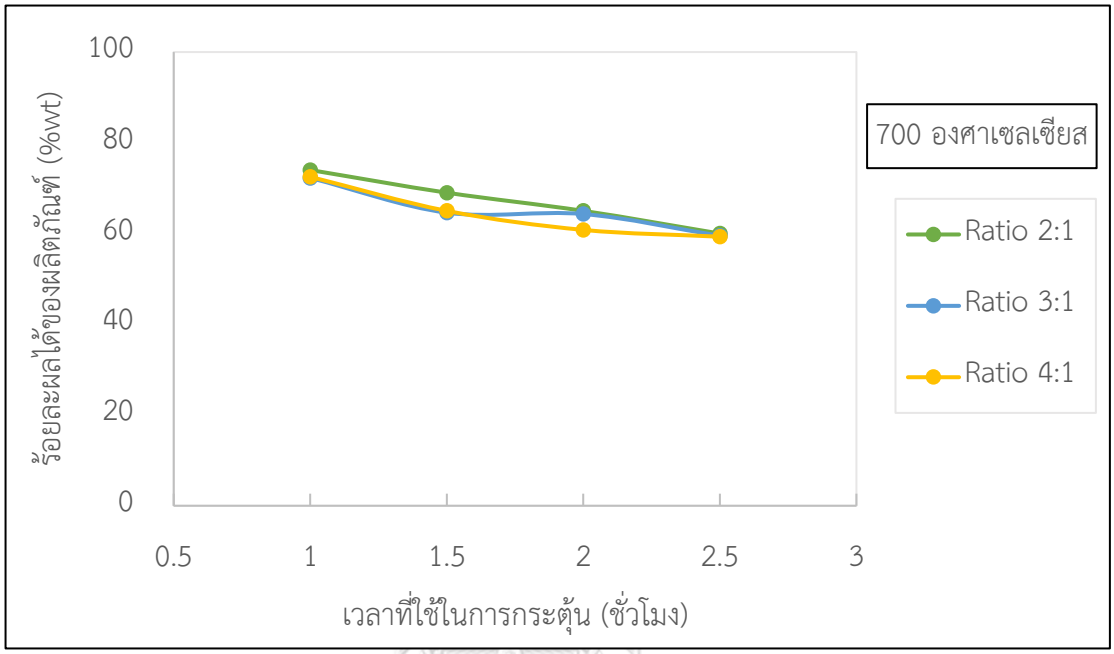


ภาพที่ 4.12 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 4:1

ภาพที่ 4.10 4.11 และ 4.12 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 2:1 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นสูงขึ้น ทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง[22] สารระเหยได้ที่ยังเกาะกับคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์ เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนและเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่น ทำให้ถ่านชาร์เกิดการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมที่เป็นระเบียบมากขึ้น เมื่อทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนอะตอมกับไอออนของสารกระตุ้น ร่วมกับการเกิดก๊าซที่ไม่ควบแน่น จึงมีการสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเวลาในการกระตุ้นมากขึ้นถ่านก็จะได้รับความร้อนนานขึ้น ทำให้สารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านหลุดออกไปมากขึ้น ปริมาณสารระเหยที่ลดลงเป็นสาเหตุที่ทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง

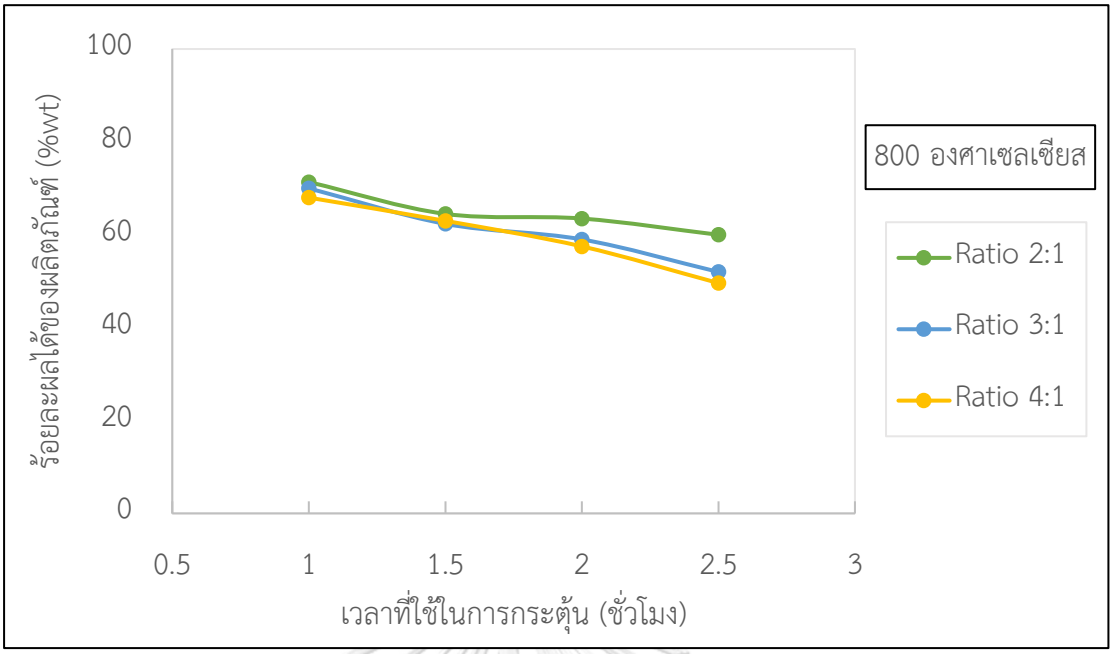
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.2.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

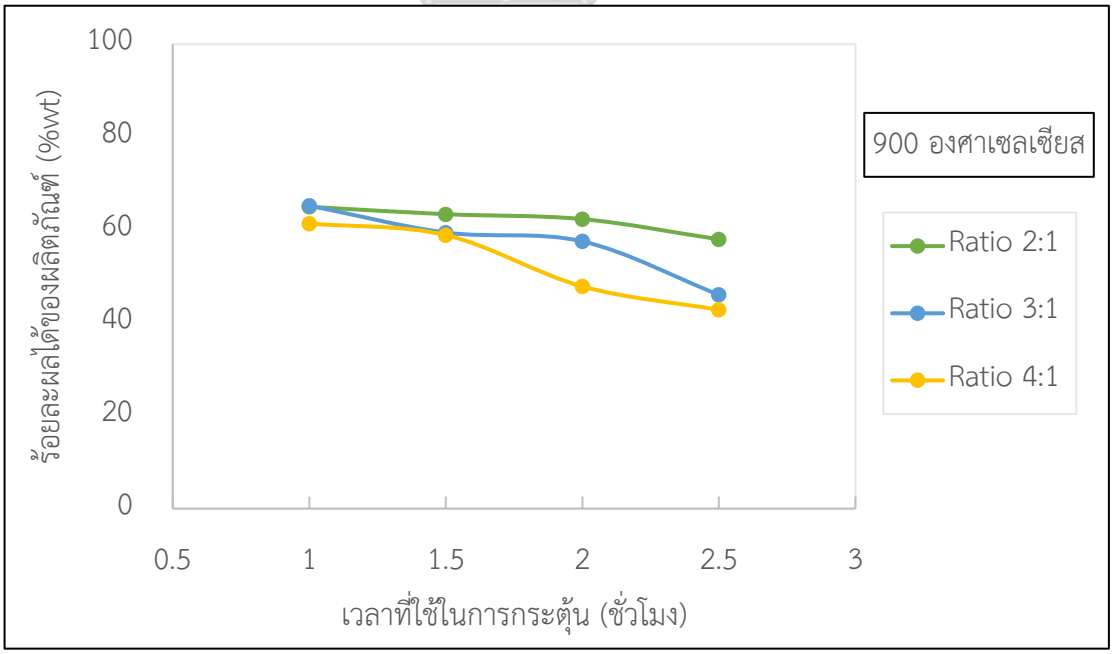


ภาพที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.13 4.14 และ 4.15 แสดงผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงเกิดการสลายตัวของสารระเหยได้ไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่น ในขณะเดียวกันคาร์บอนอะตอมจะจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น โดยเมื่อให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาก่อกัมมันต์กับถ่านชาร์ที่มีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมที่เป็นระเบียบ จึงเกิดปฏิกิริยาการแพร่ของสารกระตุ้นไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนแล้วเกิดเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนมากขึ้น แต่มีร้อยละผลได้ลดลง เนื่องจากคาร์บอนอะตอมกับสารกระตุ้นทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่น

4.3.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 2:1 3:1 และ 4:1

KOH : Char ratio	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
2:1	700	1.00	132.86	0.1838	2.25
		1.50	326.99	0.1425	2.24
		2.00	254.48	0.0748	2.25
		2.50	210.32	0.1140	2.17
	800	1.00	91.04	0.0474	2.09
		1.50	221.67	0.1200	2.17
		2.00	279.99	0.1559	2.23
		2.50	139.76	0.0789	2.26
	900	1.00	289.06	0.2399	2.21
		1.50	434.24	0.1545	2.14
		2.00	386.41	0.1174	2.05
		2.50	228.86	0.2092	2.17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

KOH : Char ratio	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
3:1	700	1.00	77.67	0.2300	2.18
		1.50	91.26	0.0522	2.29
		2.00	139.19	0.1386	2.22
		2.50	250.14	0.0765	2.20
	800	1.00	169.03	0.0916	2.17
		1.50	230.24	0.1308	2.27
		2.00	223.65	0.1225	2.19
		2.50	151.37	0.0853	2.26
	900	1.00	218.42	0.2834	2.20
		1.50	259.38	0.1478	2.28
		2.00	514.95	0.1736	2.14
		2.50	324.69	0.1241	2.27
4:1	700	1.00	142.18	0.1270	2.15
		1.50	174.91	0.1000	2.29
		2.00	90.51	0.0490	2.17
		2.50	90.35	0.1322	2.19
	800	1.00	75.1	0.0376	2.24
		1.50	150.8	0.0835	2.22
		2.00	241.33	0.0404	1.79
		2.50	140.73	0.0746	2.12
	900	1.00	186.49	0.0990	2.12
		1.50	330.11	0.1866	2.26
		2.00	228.03	0.1272	2.23
		2.50	241.64	0.1345	2.23

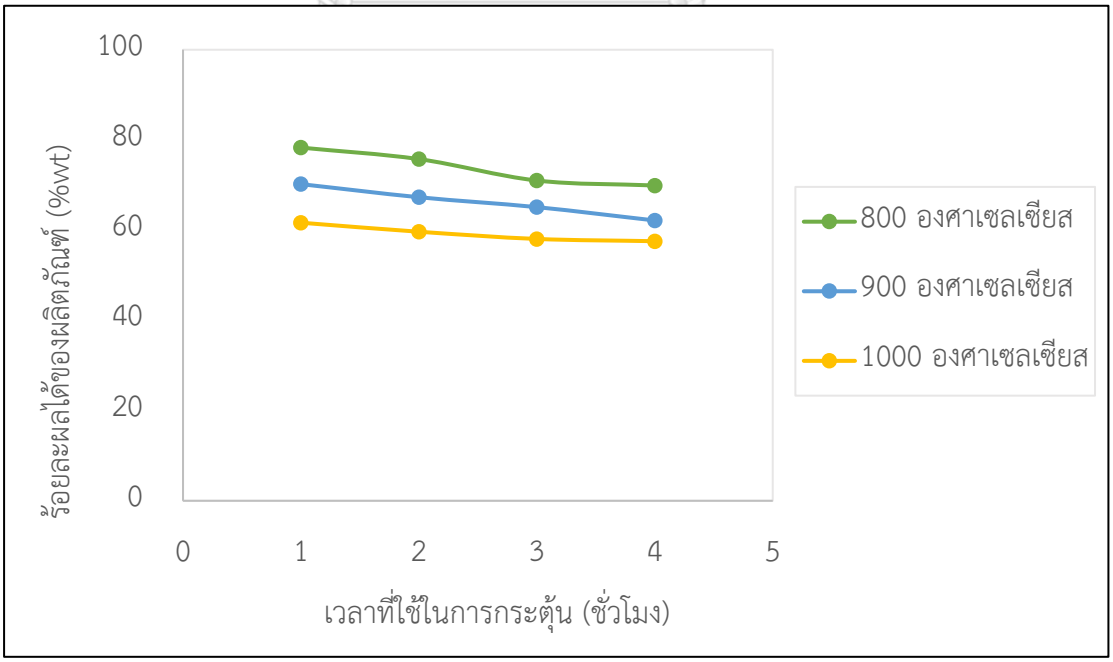
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี คือ ที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 3:1 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 900 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 2 ชั่วโมง แสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 514.95 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.1736 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

4.3.2.3 การกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

การกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพนี้จะใช้ก๊าซออกซิไดซ์ คือ ไอน้ำร้อนยิ่งยวด การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพจะทำการศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

4.2.2.3.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ



ภาพที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

ภาพที่ 4.16 แสดงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นต่อปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด โดยทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิกระตุ้น 800 900 และ 1,000 องศาเซลเซียส และที่เวลากระตุ้น 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นสูงขึ้น ทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง[22] เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ทำให้เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนและปฏิกิริยาขั้นที่สองของสารระเหยได้ไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่น ทำให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงขึ้น และจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมที่เป็นระเบียบ มีช่องว่างให้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาก่อกัมมันต์ ทำให้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เป็นสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างรูพรุนของถ่านและเกิดปฏิกิริยากับผิวถ่านได้มากขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง

4.3.2.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Textural properties) ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด

อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr)	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (cm^3/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
800	1	10.46	0.0057	2.18
	2	10.49	0.0057	2.16
	3	4.94	0.0015	1.24
	4	2.20	0.0007	2.07
900	1	79.08	0.0417	2.11
	2	229.63	0.1236	2.15
	3	320.07	0.1734	2.17
	4	483.17	0.2607	2.16
1000	1	322.90	0.1763	2.19
	2	359.23	0.1918	2.14
	3	381.32	0.2011	2.11
	4	576.42	0.3093	2.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้กระตุ้นมากขึ้นจะทำให้ได้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย[21][22] เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวเชิงความร้อนในขั้นที่สองทำให้สารระเหยได้ถูกความร้อนแตกตัวต่อไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่น โดยคาร์บอนคงตัวที่เหลืออยู่บนถ่านชาร์จะมีการจัดเรียงตัวจนมีรูพรุนที่เหมาะสมเพียงพอให้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่เป็นสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างถ่านและเกิดปฏิกิริยาก่อกัมมันต์กับคาร์บอนอะตอมที่ผิวถ่านได้ง่ายขึ้น ทำให้มีการสร้างรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเป็นการเพิ่มเวลาให้สารระเหยถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้น และสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าสู่เนื้อถ่านได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยากับผิวถ่านเกิดการขยายรูพรุนที่มีอยู่แล้ว และสร้างรูพรุนขึ้นใหม่ซึ่งจะช่วยให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น[4] พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี คือ อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 1,000 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 4 ชั่วโมง แสดงพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 576.42 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.3093 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และพบว่าผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ใกล้เคียงกัน

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นทางกายภาพ พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวด ที่ภาวะการกระตุ้นที่ อุณหภูมิที่ใช้ในกระตุ้น 1,000 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 4 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวสูงสุด 576.42 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 0.3093 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.15 นาโนเมตร

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทั้งทางเคมีและทางกายภาพ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสเมื่อกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 4:1 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 900 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 2 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด

1450.35 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.8346 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น PETW-KOH4(900)(3) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส เมื่อกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 900 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 3 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 1634.59 ตารางเมตรต่อกรัม และ 1.0434 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น PETW-H900(3)

2) ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีเมื่อกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วน โดยมวลระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี 3:1 อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 900 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 2 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 514.95 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.1736 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น PETC-KOH3(900)(2) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีเมื่อกระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 1,000 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้กระตุ้น 4 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด 576.42 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.3093 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น PETC-H1000(4)

4.4 สมบัติของถ่านกัมมันต์

4.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณและองค์ประกอบแบบแยกธาตุ

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์	การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	คาร์บอนคงตัว (FC, %)	สารระเหย (VM, %)	เถ้า (Ash, %)
PETW-KOH4(900)(3)	76.15	13.58	10.28
PETW-H900(3)	91.87	6.25	1.89
PETC-KOH3(900)(2)	67.94	20.25	11.81
PETC-H1000(4)	91.52	7.12	1.36

หมายเหตุ * ร้อยละโดยน้ำหนักมาตรฐานแห้ง (%dry basis)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์	การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	คาร์บอน (C, %)	ไฮโดรเจน (H, %)	ไนโตรเจน (N, %)	ออกซิเจน (O, %)
PETW-KOH4(900)(3)	78.41	1.88	0.44	19.27
PETW-H900(3)	82.05	1.81	0.29	15.85
PETC-KOH3(900)(2)	66.45	2.73	0.25	30.57
PETC-H1000(4)	74.73	2.38	0.23	22.66

หมายเหตุ * ออกซิเจน = 100 - ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นธาตุออกซิเจน

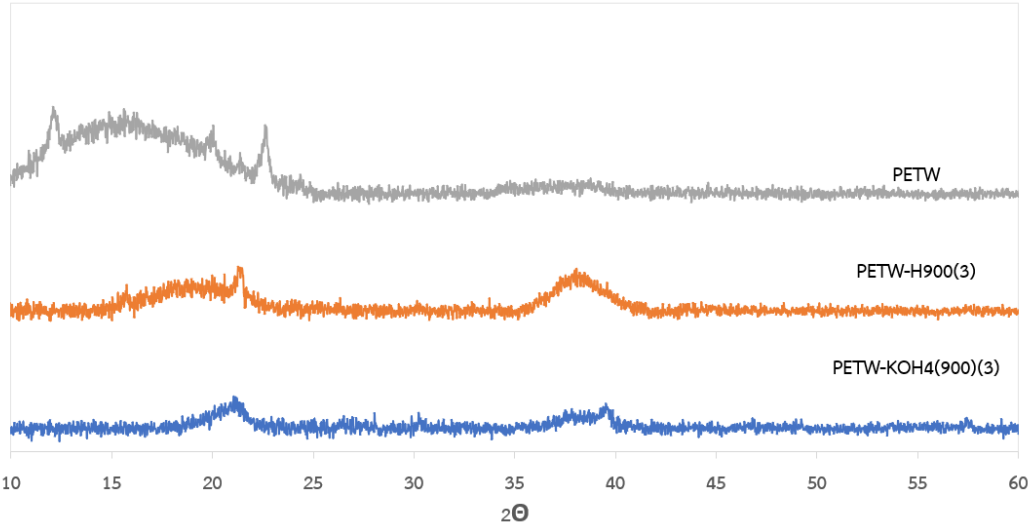
การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางเคมี (PETW-KOH4(900)(3)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETW-H900(3)) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นทางเคมี (PETC-KOH3(900)(2)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETC-H1000(4)) ที่ภาวะดำเนินการที่เหมาะสม แสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.8 พบว่าถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่เตรียมจากการกระตุ้นทางเคมี มีค่าคาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า ร้อยละ 76.15 13.58 และ 10.28 ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางกายภาพมีค่าคาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า ร้อยละ 91.87 6.25 และ 1.89 ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่เตรียมจากการกระตุ้นทางเคมี มีค่าคาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า ร้อยละ 67.94 20.25 และ 11.81 ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นทางกายภาพมีค่าคาร์บอนคงตัว สารระเหย และเถ้า ร้อยละ 91.52 7.12 และ 1.36 ตามลำดับ โดยพบว่าถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทั้งแบบใสและแบบมีสีนั้นมีค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผ่านปฏิกิริยาการก่อกัมมันต์ด้วยวิธีการทางเคมีและวิธีการทางกายภาพ เมื่อเทียบกับถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์ เนื่องจากกระบวนการกระตุ้นนั้นสารกระตุ้น (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และไอน้ำ) และอิทธิพลความร้อนทำให้ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวเชิงความร้อนของสารระเหยได้และเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองทำให้มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงและก๊าซที่ไม่ควบแน่น ในขณะเดียวกันคาร์บอนคงตัวจะจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมไปเป็นโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กและมีความเป็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

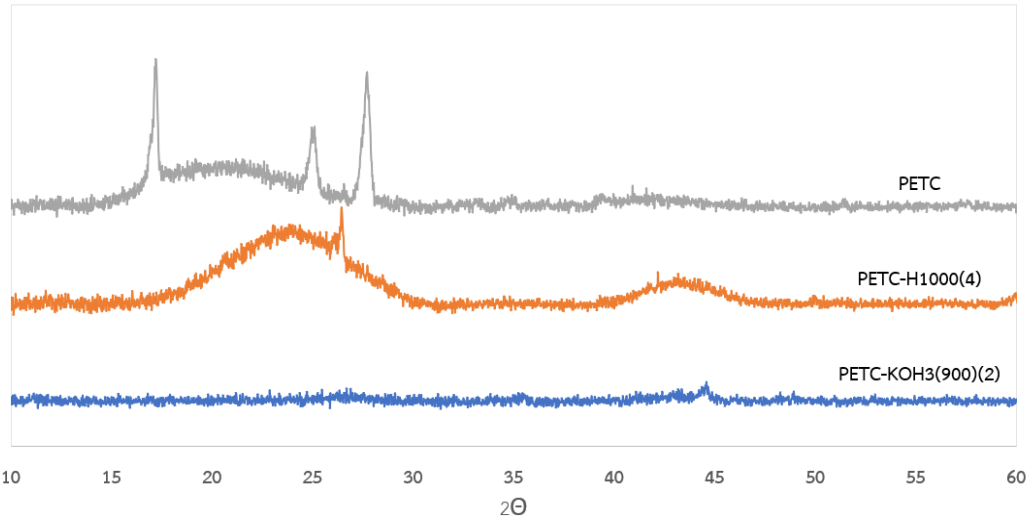
ระเบียบมากขึ้น จากนั้นสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างรูพรุนของถ่าน และเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนอะตอมที่ผิวถ่าน

การผลวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางเคมี (PETW-KOH4(900)(3)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETW-H900(3)) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นทางเคมี (PETC-KOH3(900)(2)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETC-H1000(4)) ที่ภาวะดำเนินการที่เหมาะสม แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางเคมี มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ร้อยละ 78.41 1.88 0.441 และ 19.27 ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางกายภาพ มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ร้อยละ 82.05 1.81 0.29 และ 15.85 ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นทางเคมี มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ร้อยละ 66.45 2.73 0.25 และ 30.57 ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นทางกายภาพ มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ร้อยละ 74.73 2.38 0.23 และ 22.66 ตามลำดับ โดยพบว่าถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทั้งแบบใสและแบบมีสีนั้นมีค่ามีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนลดลงเมื่อเทียบกับถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์ นอกจากจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวเชิงความร้อนในขั้นที่สองแล้ว ปฏิกิริยาการก่อกัมมันต์ยังส่งเสริมการสลายตัวของพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ไปเป็นพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน และเกิดการสลายตัวไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนออกไซด์ตามปฏิกิริยาการเกิดแก๊สซิฟิเคชัน[19] แสดงในสมการ (4.1) - (4.5) ในขณะเดียวกันพบว่ามีองค์ประกอบของออกซิเจนเพิ่มขึ้น จากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของวอเตอร์แก๊สชิฟต์ (Water-gas shift) ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาก่อกัมมันต์

4.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)



ภาพที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส (PETW) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางกายภาพ (PETW-H900(3)) และกระตุ้นทางเคมี (PETW-KOH4(900)(3)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด

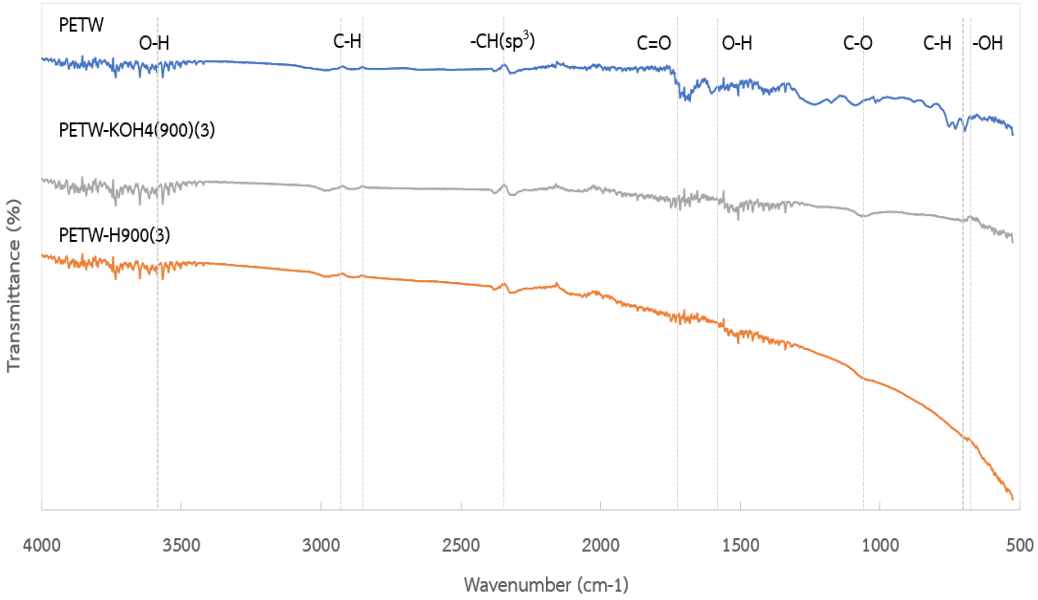


ภาพที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี (PETC) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางกายภาพ (PETC-H1000(4)) และกระตุ้นทางเคมี (PETC-KOH3(900)(2)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด

ภาพที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส (PETW) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางกายภาพ (PETW-H900(3)) และกระตุ้นทางเคมี (PETW-KOH4(900)(3)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด พบว่ากราฟของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสมีพีคที่กว้างที่ 2θ เท่ากับ 15° ถึง 30° แสดงว่าผลึกมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบหรือมีลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐาน(Amorphous carbon) เมื่อพิจารณากราฟของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางกายภาพและกระตุ้นทางเคมีที่ภาวะเหมาะสมที่สุด พบว่าปรากฏพีคที่ 2θ ในตำแหน่งช่วงระหว่าง 22-23° (ระนาบ 002) และ 43-45° แสดงว่าการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกแกรไฟต์ (graphite) เป็นแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral) แต่พีคในตำแหน่งดังกล่าวจะต่ำและกว้างอยู่ในช่วง 20-30° และ 40-50° แสดงว่ายังมีลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐานปนอยู่[19][20] สามารถอธิบายได้ว่าระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเกิดการจัดเรียงตัวของคาร์บอนเป็นชั้นระนาบของแกรไฟต์ และในระหว่างการคาร์บอไนซ์จะมีการกระจายตัวของโครงสร้างแกรไฟต์ แบบสุ่มเกิดขึ้นระหว่างการก่อกัมมันต์ในตำแหน่งคาร์บอนอะตอมต่างๆ ทำให้ไม่มีความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกคาร์บอน[28]

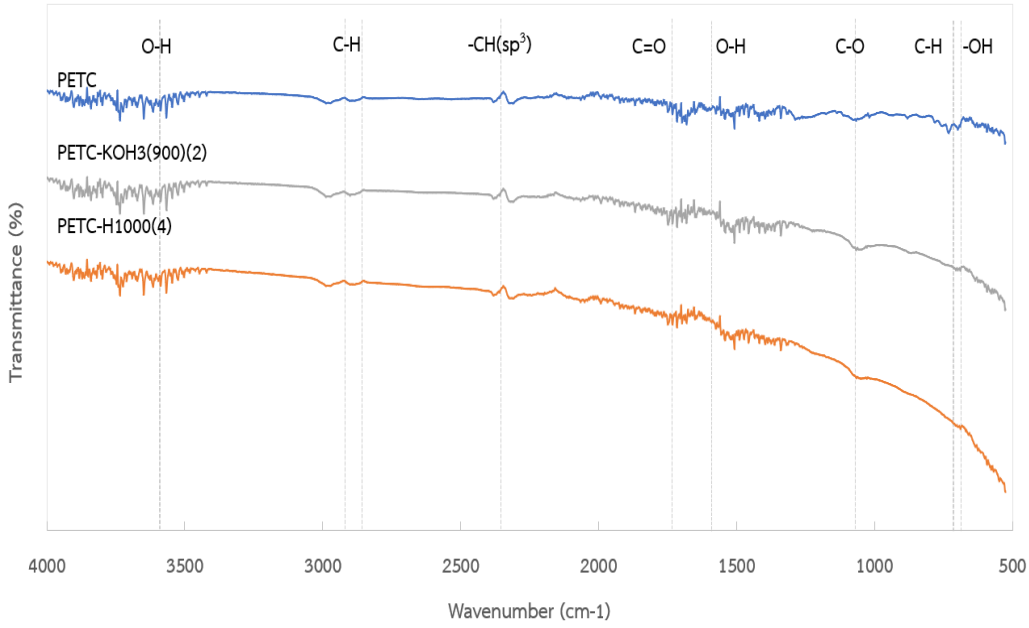
ภาพที่ 4.18 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี (PETC) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางกายภาพ (PETC-H1000(4)) และกระตุ้นทางเคมี (PETC-KOH3(900)(2)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด พบว่ากราฟของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีมีพีคที่กว้างที่ 2θ เท่ากับ 15° ถึง 30° แสดงว่าผลึกมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบหรือมีลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐานเช่นเดียวกับถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส และเมื่อพิจารณากราฟของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นทางกายภาพ พบว่าปรากฏพีคที่ 2θ ในตำแหน่งช่วงระหว่าง 22-23° (ระนาบ 002) และ 43-45° แสดงว่าการจัดเรียงตัวผลึกของคาร์บอน-คาร์บอนอะตอมในรูปของผลึกแกรไฟต์ (graphite) ที่มีการจัดเรียงตัวเป็นแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral)แต่พีคในตำแหน่งดังกล่าวจะต่ำและกว้างอยู่ในช่วง 20-30° และ 40-50° แสดงว่ายังมีลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐานปนอยู่[19][20] และเมื่อพิจารณากราฟของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่กระตุ้นทางเคมีพบว่ากราฟนั้นไม่ปรากฏพีคที่ชัดเจน

4.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านและถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี ด้วยเทคนิควิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy, FTIR)



ภาพที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส (PETW) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางเคมี (PETW-KOH4(900)(3)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETW-H900(3)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

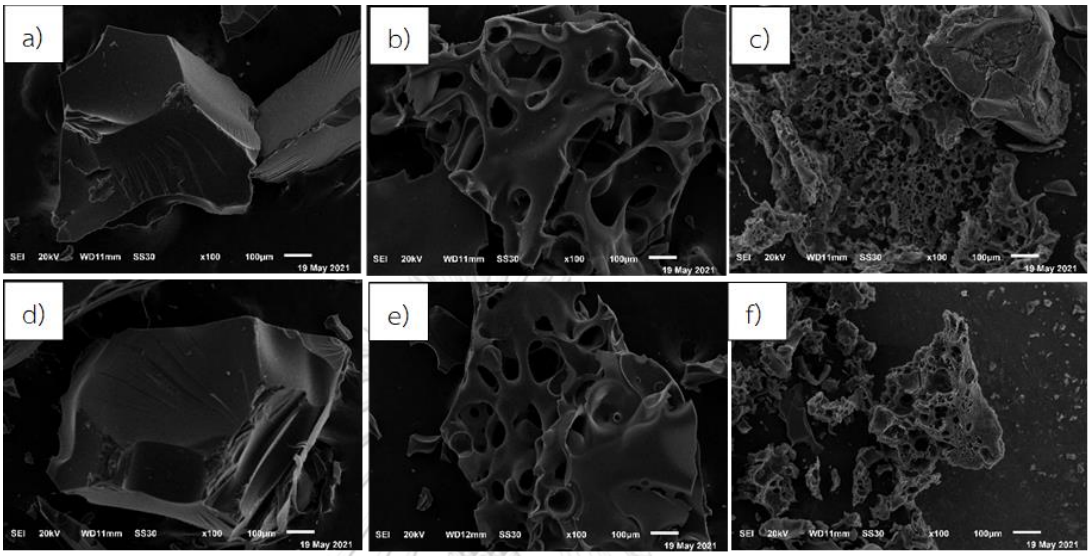


ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี (PETC) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางเคมี (PETC-KOH3(900)(2)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETC-H1000(4)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด

จากภาพที่ 4.19 และ 4.20 แสดงผลการวิเคราะห์ FTIR ของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส (PETW) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางเคมี (PETW-KOH4(900)(3)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETW-H900(3)) และถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี (PETC) และถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่กระตุ้นทางเคมี (PETC-KOH3(900)(2)) และกระตุ้นทางกายภาพ (PETC-H1000(4)) ที่ภาวะเหมาะสมที่สุด พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีกราฟที่ใกล้เคียงกัน และพบพีคที่สำคัญที่ 3566 1640 และ 1065 cm^{-1} ในตัวอย่างทั้งหมด การพบสเปกตรัมเลขคลื่นที่ 3566 cm^{-1} แสดงถึงแถบการยืดของหมู่ไฮดรอกซิลจากน้ำที่อาจเกิดความชื้นขึ้นในถ่าน หรือหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล การพบสเปกตรัมเลขคลื่นที่ 1640 cm^{-1} เกิดจากการยืดตัวของคาร์บอกซีเลตไอออน และกลุ่มเอสเทอร์คาร์บอนิล และการพบสเปกตรัมเลขคลื่นที่ 1065 cm^{-1} เป็นผลมาจากการยืดระหว่างพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน ปรากฏในโครงสร้างที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นอีเทอร์อะโรมาติก ทำให้สามารถยืนยันการมีอยู่ของออกซิเจนได้ นอกจากนี้ยังมีพีคเล็กๆที่เกิดขึ้นที่สเปกตรัมเลขคลื่น 2920 2380 1440 และ 780 cm^{-1} ที่สอดคล้องกับการยืดอะลิฟาติกคาร์บอน-ไฮโดรเจน และการยืดของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนแบบ sp^3 ไฮบริดไดเซชัน[19][20]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วแบบใสและแบบมีสี และถ่านกัมมันต์ที่ภาวะเหมาะสมที่สุดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM)



ภาพที่ 4.21 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 100 เท่า

ภาพที่ 4.21 (a)ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส (PETW) (b)ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสมด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ (PETW-H900(3)) (c)ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสมด้วยการกระตุ้นทางกายเคมี (PETW-KOH3(900)(2)) (d)ถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี (PETC) (e)ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสมด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ (PETC-H1000(4)) (f)ถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสมด้วยการกระตุ้นทางกายเคมี (PETC-KOH3(900)(2)) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านและถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสมด้วยการกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางกายเคมีกำลังขยาย 100 เท่า และถ่านและถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีที่ภาวะกระตุ้นเหมาะสมด้วยการกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางกายเคมีกำลังขยาย 100 เท่า พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทั้งแบบใสและแบบมีสีก่อนการกระตุ้นในภาพ 4.21a และ 4.21d มีพื้นผิวที่เรียบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ไม่พบรูพรุน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสี ตารางที่ 4.3 พบว่าถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสและแบบมีสีมีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดต่ำ แต่เมื่อพิจารณาถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทั้งแบบใสและแบบมีสีที่กระตุ้นทางกายภาพและกระตุ้นทางเคมีจากภาพที่ 4.21b 4.21c 4.21e และ 4.21f พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้หลังจากการกระตุ้นนั้น มีการเปิดผิวของถ่านกัมมันต์ และมีการพัฒนารูพรุนเกิดขึ้น ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตทั้งแบบใสและแบบมีสีที่กระตุ้นทางกายภาพและกระตุ้นทางเคมี ที่พบว่ามีค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นทางกายภาพ พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ผลของอัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ผลของอุณหภูมิ และผลของเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี โดยสามารถสรุปเป็นข้อ ได้ดังนี้

5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระตุ้นในงานวิจัย

อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น

อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด และมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์มากที่สุด เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยสารระเหยได้เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนในปฏิกิริยาขั้นที่สองไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่น ในขณะเดียวกันคาร์บอนคงตัวมีการจัดเรียงตัวไปเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนเล็กลงและเป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้สารกระตุ้น (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และไอน้ำ) สามารถแพร่เข้าไปในถ่านได้มากขึ้น และเมื่อถ่านถูกเผาไหม้ ถ่านบางส่วนกลายจะเป็นเถ้า และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ถ่านมีความพรุนมากขึ้น และมีการสร้างรูพรุนที่เพิ่มขึ้นจากการที่สารกระตุ้นนั้นสามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ผิวของถ่านได้มากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้น และพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงเกินไปนั้นจะทำให้ผิวของรูพรุนแตก รูพรุนเกิดการยุบตัวและรวมตัวกันกลายเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์ลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เวลาที่ใช้กระตุ้น

เวลาที่ใช้ในการกระตุ้นก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระตุ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากเมื่อเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มสูงขึ้นทำให้ถ่านได้รับความร้อนที่มากขึ้น สารระเหยที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวในปฏิกิริยาขั้นที่สองต่อไป ในขณะเดียวกันอุณหภูมิยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงน้ำหนักของถ่านชาร์ไปเป็นเถ้าที่อุณหภูมิสูง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง และเมื่อเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น จะทำให้มีเวลาที่สารระเหยจะถูกกำจัดออกไปได้มากและสารกระตุ้น (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และไอน้ำ) สามารถแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ผิวของถ่านทำให้มีการขยายของรูพรุนที่มีอยู่แล้วและสร้างรูพรุนมีการสร้างใหม่ ทำให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น

อัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่าน

อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อกระบวนการการกระตุ้นทางเคมี เมื่ออัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ทำให้ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารกระตุ้นสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างรูพรุนของถ่าน และเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับคาร์บอนอะตอมที่ผิวถ่าน เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบเพิ่มพื้นที่ผิวรูพรุน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.2 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์

การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ใช้แล้วทั้งแบบใสและแบบมีสี ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นทางกายภาพ พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส ต้องกระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเป็นสารกระตุ้น คือ ภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส และเวลากระตุ้น 3 ชั่วโมง มีปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ร้อยละ 27.50 มีพื้นที่ผิว1634.59 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวมทั้งหมด 1.0434 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสี ต้องกระตุ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเป็นสารกระตุ้น คือ ที่อุณหภูมิกระตุ้น

1,000 องศาเซลเซียส และเวลากระตุ้น 4 ชั่วโมง มีปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ร้อยละ 57.55 มีพื้นที่ผิว 576.42 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนรวมทั้งหมด 0.3093 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

จากงานวิจัยนี้ พบว่าถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส ให้ค่าพื้นที่ผิวที่สูง และอยู่ในเกรดที่เหมาะสมสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงการค้า ส่วนถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีนั้นให้ค่าพื้นที่ผิวที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ในเชิงการค้า จึงยังไม่เหมาะในการนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสสามารถนำไปเป็นตัวเลือกในการผลิตถ่านกัมมันต์ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไปได้

5.1.3 ข้อเสนอแนะ

(1) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้สารเคมีที่เป็นสารกระตุ้นชนิดอื่น

(2) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ก๊าซชนิดอื่นในการกระตุ้น

(3) ศึกษาผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนที่มีต่อการผลิตถ่านกัมมันต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลดิบจากการทดลอง

ตารางที่ ก. 1 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1

KOH : Char	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
2:1	700	1	18.20	91.00
		2	16.95	84.75
		3	15.75	78.75
		4	14.45	72.25
	800	1	15.95	79.75
		2	14.75	73.75
		3	14.25	71.25
		4	11.60	58.00
	900	1	14.80	74.00
		2	11.50	57.50
		3	10.70	53.50
		4	9.25	46.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก. 2 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 3:1

KOH : Char	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
3:1	700	1	17.30	86.50
		2	14.80	74.00
		3	12.70	63.50
		4	12.40	62.00
	800	1	15.00	75.00
		2	14.20	71.00
		3	11.45	57.25
		4	10.50	52.50
	900	1	11.75	58.75
		2	11.00	55.00
		3	10.50	52.50
		4	8.15	40.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก. 3 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 4:1

KOH : Char	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
4:1	700	1	17.55	87.75
		2	13.90	69.50
		3	12.75	63.75
		4	11.10	55.50
	800	1	14.30	71.50
		2	13.15	65.75
		3	10.80	54.00
		4	10.25	51.25
	900	1	11.60	58.00
		2	10.80	54.00
		3	9.90	49.50
		4	6.55	32.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก. 4 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใสด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	**เวลากระตุ้น (hr.)**	**น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (g)**	**ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)**
800	1	14.40	72.00
	2	13.40	67.00
	3	11.75	58.75
	4	8.20	41.00
900	1	10.20	51.00
	2	7.05	35.25
	3	5.50	27.50
	4	2.10	10.50
1000	1	9.45	47.25
	2	6.40	32.00
	3	4.20	21.00
	4	1.90	9.50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก. 5 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 2:1

KOH : Char	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
2:1	700	1	14.80	74.00
		2	13.80	69.00
		3	13.00	65.00
		4	12.00	60.00
	800	1	14.27	71.35
		2	12.90	64.50
		3	12.70	63.50
		4	12.00	60.00
	900	1	13.00	65.00
		2	12.68	63.40
		3	12.47	62.35
		4	11.60	58.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก. 6 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 3:1

KOH : Char	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
3:1	700	1	14.45	72.25
		2	12.92	64.60
		3	12.86	64.30
		4	11.90	59.50
	800	1	14.00	70.00
		2	12.47	62.35
		3	11.80	59.00
		4	10.40	52.00
	900	1	13.05	65.25
		2	11.89	59.45
		3	11.51	57.55
		4	9.21	46.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก. 7 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีที่อัตราส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบใส 4:1

KOH : Char	อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	เวลากระตุ้น (hr.)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)
4:1	700	1	14.50	72.50
		2	13.00	65.00
		3	12.16	60.80
		4	11.86	59.30
	800	1	13.60	68.00
		2	12.60	63.00
		3	11.50	57.50
		4	9.92	49.60
	900	1	12.28	61.40
		2	11.78	58.90
		3	9.57	47.85
		4	8.56	42.80

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

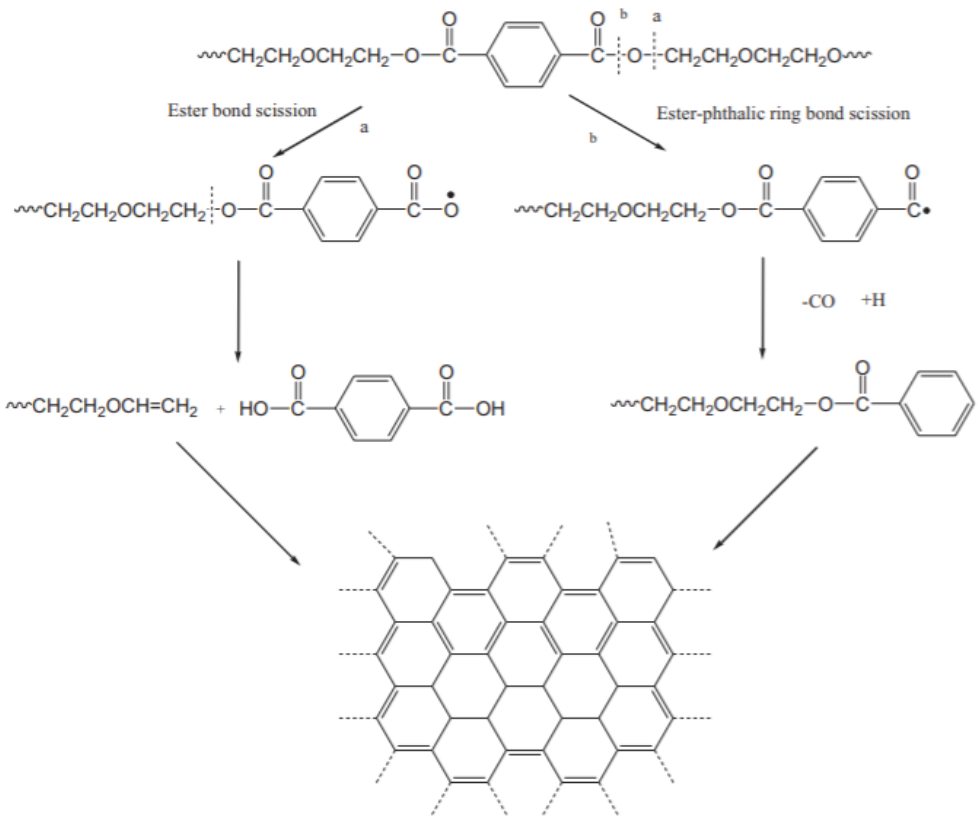
ตารางที่ ก. 8 ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จากขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตแบบมีสีด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

อุณหภูมิกระตุ้น (°C)	**เวลากระตุ้น (hr.)**	**น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (g)**	**ปริมาณร้อยละผลิตภัณฑ์ (%wt.)**
800	1	15.66	78.30
	2	15.15	75.75
	3	14.20	71.00
	4	13.98	69.90
900	1	14.04	70.20
	2	13.46	67.30
	3	13.02	65.10
	4	12.43	62.15
1000	1	12.33	61.65
	2	11.93	59.65
	3	11.61	58.05
	4	11.51	57.55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.

แผนผังการคาร์บอไนซ์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ ข. 1 แผนผังแสดงขั้นตอนการคาร์บอไนซ์ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) [29]

ภาคผนวก ค.
ข้อมูลเบื้องต้นสารเคมี

ค-1 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ชื่อสาร	:	Potassium hydroxide
CAS Number	:	1310-58-3
น้ำหนักโมเลกุล	:	56.11 กรัม/โมล
สูตรโมเลกุล	:	KOH

สมบัติทางเคมีและกายภาพ

ลักษณะ	:	ของแข็ง
สี	:	ขาว
กลิ่น	:	ไมมีกลิ่น
ค่าพีเอช 50 g/l	:	น้ำ (20°C) > 13.5
จุดหลอมเหลว	:	360°C
จุดเดือด	:	1320°C
ความหนาแน่น	:	(20°C) 2.04 g/cm3
ความสามารถในการละลาย	:	น้ำ (20°C) ประมาณ 1100 g/l เอทานอล (20°C) ประมาณ 400 g/l

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

มาตรการปฐมพยาบาล

เมื่อสูดดม	ใหรับอากาศบริสุทธิ์ นำสงแพทย์
เมื่อถูกผิวหนัง	ชะล้างออกด้วยน้ำปริมาณมาก ทาด้วยพอลีเอทิลีนไกลคอล 400 ถอดเสื้อผาที่เปื้อนออกทันที
เมื่อเข้าตา	ชะออกด้วยน้ำปริมาณมากเป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาทีโดยลืมตากว้าง พบจักษุแพทท์ทันที
เมื่อกลืนกิน	ให้ผู้ป่วยดื่มน้ำปริมาณมาก (หลายลิตรถ้าจำเป็น), ไม่ควรทำใหอาเจียน (อาจทำใหเกิดการกัดจนทะลุ) นำส่งแพทย์ทันทีห้ามปรับสภาพสารใหเป็นกลาง[30]

ค-2 กรดไฮโดรคลอริก 37%

ชื่อสาร	:	HYDROCHLORIC ACID 37%
CAS Number	:	7647-01-0
น้ำหนักโมเลกุล	:	36.46 กรัม/โมล
สูตรโมเลกุล	:	HCl

สมบัติทางเคมีและกายภาพ

ลักษณะ	:	ของเหลว
สี	:	ใส-ไม่มีสี
กลิ่น	:	มีกลิ่นฉุน
ค่าพีเอช 50 g/l	:	<1 ที่ 20°C
จุดหลอมเหลว	:	-30°C
จุดเดือด	:	51°C
ความหนาแน่น	:	(20°C) 1.19 g/ml
ความสามารถในการละลาย	:	ละลายน้ำได้ที่ 20°C

มาตรการปฐมพยาบาล

ข้อแนะนำทั่วไป	ให้แสดงเอกสารข้อมูลความปลอดภัยนี้ต่อแพทย์
เมื่อเข้าสู่ระบบหายใจ	ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยไปที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ทำให้ผู้ป่วยตัวอุ่นอยู่ตลอดเวลา ถ้าผู้ป่วยมีอาการหายใจไม่สะดวกหรือหายใจสั้นๆ ให้ออกซิเจนแก่ผู้ป่วย ให้ใช้เครื่องช่วยหายใจในกรณีที่ผู้ป่วยไม่มีการหายใจหรืออยู่ภายใต้การดูแลของแพทย์เท่านั้น ห้ามช่วยเหลือผู้ป่วยโดยวิธีเป่าลมหายใจลักษณะปากต่อปาก หรือเป่าลมหายใจเข้าทางจมูก สามารถใช้อุปกรณ์/เครื่องมือที่เหมาะสมได้
เมื่อสัมผัสผิวหนัง	ถอดเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก ล้างผิวหนังด้วยน้ำและสบู่ ทาด้วยโพลีเอทิลีนไกลคอล 400 หากมีอาการเป็นพิษ ให้แก้ปัญหาเช่นเดียวกับกรณีการสูดดม รีบไปพบแพทย์ ทำความสะอาดเสื้อผ้าที่เปื้อนก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อเข้าตา	รีบล้างตาทันที ด้วยน้ำสะอาด อย่างน้อย 15 นาที แล้วรีบไปพบแพทย์
เมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร	รีบบ้วนปากทันทีด้วยน้ำสะอาดในปริมาณมากๆ อย่าทำให้อาเจียนออกมา ทำให้ผู้ป่วยตัวอุ่นอยู่ตลอดเวลา ถ้าผู้ป่วยมีอาการหายใจไม่สะดวกหรือหายใจสั้นๆ ให้ออกซิเจนแก่ผู้ป่วย ให้ใช้เครื่องช่วยหายใจในกรณีที่ผู้ป่วยไม่มีการหายใจ หรืออยู่ภายใต้การดูแลของแพทย์เท่านั้น ห้ามช่วยเหลือผู้ป่วยโดยวิธีเป่าลมหายใจลักษณะปากต่อปากหรือเป่าลมหายใจเข้าทางจมูก สามารถใช้อุปกรณ์/เครื่องมือที่เหมาะสมได้ ห้ามให้อะไรก็ตามทางปากแก่ผู้ป่วยที่ไม่รู้สึกตัว[31]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

1. สมบัติของพลาสติก Available from: https://scpdatacenter.deqp.go.th/newsdetail.php?id=718 [ตุลาคม 2020].
2. การรีไซเคิลขวดพลาสติกสี Available from: https://www.bangkokbiznews.com/news/detail/854769 [ตุลาคม 2020].
3. กระบวนการรีไซเคิล PET Available from: https://unionjplus.com/event-detail.php?id=23&keyword=recycle-pet-RPET%20_HDPE_LDPE_LLDPE_PP_PET_HIPS_ABS [ตุลาคม 2020].
4. Yuan, X., et al., Upcycling of waste polyethylene terephthalate plastic bottles into porous carbon for CF4 adsorption. Environ Pollut, 2020. 265(Pt A): p. 114868.
5. H.A. Jankowaka, A.S.a.J.C., Active Carbon . Poland: EllisHorwood Limited, 1991.
6. ถ่านกัมมันต์ Available from: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf [ตุลาคม 2020].
7. วิทิตศานต์, ธ., ถ่านกัมมันต์การผลิตและการนำไปใช้. พิมพ์ครั้งที่ 2.(2011) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
8. คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ Available from: http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=1606&Itemid=14 [พฤษภาคม 2021].
9. ประเภทถ่านกัมมันต์ Available from: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf [พฤษภาคม 2021].
10. มาตรฐานถ่านกัมมันต์. Available from: http://research.rid.go.th/vijais/moa/fulltext/TIS900-2547.pdf [พฤษภาคม 2021].
11. รูปถ่านกัมมันต์ [cited พฤษภาคม 2021; Available from: https://www.carbon-filter.com/filterelements/activated-carbon.html [พฤษภาคม 2021].
12. Zdravkov, B., et al., Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective. Open Chemistry, 2007. **5**(2): p. 385-395.
13. Pore size Available from: https://wiki.anton-paar.com/ch-fr/mesure-de-la-taille-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

des-pores/ [พฤษภาคม 2021].

14. Brunauer isotherms Available from: file:///C:/Users/User/Downloads/The_Pore_Structure_of_Phosphoaluminate_Cement.pdf [พฤษภาคม 2021].
15. IUPAC classification for adsorption isotherms Available from: https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0039602807001823?token=4F5B82B6EEC77D294D2E7719C0302BA50441BC5CCBA56973144A85B09BB7FCEA52F4A15D1E421CAF1610FE4CA5342EBC&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210603140950 [พฤษภาคม 2021].
16. ห. นพิดา, ง.ช., เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา Catalyst technology. 2014: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
17. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128160060000207 [พฤษภาคม 2021].
18. Polyethylene terephthalate Available from: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic [พฤษภาคม 2021].
19. Kaur, B., R.K. Gupta, and H. Bhunia, Chemically activated nanoporous carbon adsorbents from waste plastic for CO2 capture: Breakthrough adsorption study. Microporous and Mesoporous Materials, 2019. 282: p. 146-158.
20. Yuan, X., et al., Solving two environmental issues simultaneously: Waste polyethylene terephthalate plastic bottle-derived microporous carbons for capturing CO2. Chemical Engineering Journal, 2020. 397.
21. Esfandiari, A., T. Kaghazchi, and M. Soleimani, Preparation and evaluation of activated carbons obtained by physical activation of polyethyleneterephthalate (PET) wastes. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2012. 43(4): p. 631-637.
22. Mendoza-Carrasco, R., et al., Preparation of high-quality activated carbon from polyethyleneterephthalate (PET) bottle waste. Its use in the removal of pollutants in aqueous solution. J Environ Manage, 2016. 181: p. 522-535.
23. László, K. and A. Szucs, Surface characterization of polyethyleneterephthalate

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(PET) based activated carbon and the effect of pH on its adsorption capacity from aqueous phenol and 2,3,4-trichlorophenol solutions. Carbon, 2001. 39(13): p. 1945-1953.

24. Yuliusman, et al., Preparation of activated carbon from waste plastics polyethylene terephthalate as adsorbent in natural gas storage. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. 176.

25. Parra, J.B., et al., Textural characterisation of activated carbons obtained from poly(ethylene terephthalate) by carbon dioxide activation, in Characterization of Porous Solids VI, Proceedings of the 6th International Symposium on the Characterization of Porous Solids (COPS-VI). 2002. p. 537-543.

26. Lian, F., et al., Adsorptive removal of hydrophobic organic compounds by carbonaceous adsorbents: A comparative study of waste-polymer-based, coal-based activated carbon, and carbon nanotubes. Journal of Environmental Sciences, 2012. 24(9): p. 1549-1558.

27. Attila Bo´ta, K.L.s., *,† Lajos Gyo¨rgy Nagy,† and Thomas Copitzky‡, Comparative Study of Active Carbons from Different Precursors. Langmuir, 1997(13): p. 6502-6509.

28. XRD of PET Available from: http://scijournal.kku.ac.th/files/Vol_43_No_3_P_788-798.pdf [พฤษภาคม 2021].

29. Chen, S., et al., Carbonization: A feasible route for reutilization of plastic wastes. Sci Total Environ, 2020. 710: p. 136250.

30. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ Available from: https://www.tailiang.co.th/MSDS/MSDS_PotassiumHydroxide.pdf [พฤษภาคม 2021].

31. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยกรดไฮโดรคลอริก 37% Available from: https://pronto-core-cdn.prontomarketing.com/511/wp-content/uploads/2019/11/hydrochloric-acid-37-t-customer-rv03-010718.pdf [พฤษภาคม 2021].

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ซุ ฮุ่ย คอ
วัน เดือน ปี เกิด	8 กุมภาพันธ์ 2539
สถานที่เกิด	สงขลา
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	173 ถนนทุ่งเสา2 ตำบลหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
ผลงานตีพิมพ์	นำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ The 27th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymer and The 12nd Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2020) ณ วันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ.2564

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University