



รายงานโครงการวิจัย

การกระตุ้นด้วยไอน้ำเสริมด้วยการใช้อัลคาไลน์ของถ่านไม้ไผ่
Alkaline Assisted Steam Activation of Bamboo Char Coal

โดย

นางสาววิศรา ระตะเจริญ เลขประจำตัวนิสิต 6032958223

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระตุ้นด้วยไอ้หน้าเสริมด้วยการใช้อัลคาไลน์ของถ่านไม้ไฟ

นางสาววิศรา ระตะเจริญ

โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Alkaline Assisted Steam Activation of Bamboo Char Coal

Warissara Ratacharoen

A Senior Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Bachelor of Science Program in Chemical Technology Department

Faculty of Science Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

ชื่อโครงการ การกระตุ้นด้วยไอน้ำเสริมด้วยการใช้อัลคาไลน์ของถ่านไม้ไผ่

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ชื่อนิติกร่วมในโครงการ นางสาววิศรา ระตะเจริญ

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาในโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คุณลธาราช

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในด้านอุตสาหกรรมและด้านครัวเรือน เพราะถ่านไม้เป็นพืชที่ได้รับความนิยมในการปลูกอย่างกว้างขวาง เนื่องจากไม้สามารถนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าได้มากมาย อีกทั้งยังเหมาะกับการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงและปราศจากสารตกค้าง ซึ่งช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) เป็นตัวช่วยในการกระตุ้น อีกทั้งยังปรับปรุงให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้าที่ผลิตจากการกระตุ้นทางเคมี โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นที่มีต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 650, 700 และ 850 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่คือ 850 องศาเซลเซียส โดยมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงถึง 889.05 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าพื้นที่ผิว BET 807.98 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ยังศึกษาผลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ทั้งสิ้น 3 ค่า ได้แก่ ความเข้มข้นร้อยละ 0.04, 0.06 และ 0.08 โดยน้ำหนัก พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับที่ดีขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถแสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำไม้ไผ่มาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำร่วมกับการใช้สารเคมี เพื่อลดต้นทุนในการผลิต อีกทั้งยังส่งเสริมการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัตถุดิบท้องถิ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

คำสำคัญ: ไม้ไผ่, ถ่านกัมมันต์, การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำ, การดูดซับไอโอดีน

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิติกร่วม...วิศรา ระตะเจริญ.....

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...ประพันธ์ คุณลธาราช.....

Title Alkaline Assisted Steam Activation of Bamboo Char Coal
Student name Miss Warissara Ratacharoen
Advisor Assoc. Prof. Dr. Prapan Kuchonthara
Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,
Academic Year 2020

Abstract

Nowadays, activated carbon (AC) is widely available in industrial and residential use; however, the production cost of AC is still expensive. One possible way to lower the production cost is to find a new substance which is more economical. Bamboos are extremely popular plants, due to the capability to transform into value-added goods. They are also suitable for being used as a substance to produce the high-quality AC. Therefore, the aim of this research is to find the optimum conditions for the AC production using the bamboos through the steam activation assisted by potassium hydroxide (KOH). The AC from bamboo could be improved to have as high performance as the conventional AC, which is made from the palm shell. This research investigated the effects of the activation temperatures, which are at 650, 700 and 850°C, on the performance of the AC. The results show that the highest iodine number of 889.05 mg/g and BET surface area of 807.98 m²/g were obtained when using the activation temperature of 850°C. It can be also observed that the iodine number of the bamboo AC is comparable to that of the conventional AC. In addition, the increase in the KOH concentrations of 0.04, 0.06 and 0.08 wt% in KOH-assisted steam activation at 850°C was found to enhance the adsorption capability of the AC. These results imply the possibility in the use of bamboo as a substance for the AC production by KOH-assisted steam activation.

Keywords: Bamboo, Activated carbon, Steam activation, Iodine adsorption

Department of Chemical Technology

Student's signature...*Warissara Ratacharoen*.....

Major: Chemical Engineering

Advisor's signature...*Pran Kuchonthara*.....

กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยให้ความรู้ ความช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขโครงการให้สำเร็จลุล่วง นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการทำโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปใช้ สถานที่เพื่อทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณศิริชัย รัตนวราหะ และนักวิทยาศาสตร์ผู้ดูแลและควบคุมห้องเครื่องมือภายในศูนย์ เชื้อเพลิงและชีวมวล อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ทุกท่านที่คอยรับฟังคำปรึกษาและให้คำแนะนำ ตลอดจนการช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นางสาวปภาวรินทร์ สอนสุวรรณ และนายณัฐชนน นิลอ่อน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย ให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำเกี่ยวการงานวิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายสิริวิชญ์ จันทร์ทอง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการทำโครงการวิจัยนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และคณะครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่เป็นกำลังใจ และคอยให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

วริศรา ระตะเจริญ

สารบัญ

| เรื่อง | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ | ก |
| Abstract | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญรูปภาพ | ช |
| สารบัญตาราง | ซ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมา และมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)..... | 3 |
| 2.2 วัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ | 3 |
| 2.2.1 ชีวมวล (Biomass) | 3 |
| 2.2.2 ไม้ (Bamboo)..... | 7 |
| 2.2.3 กะลาปาล์ม (Palm shell)..... | 7 |
| 2.3 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์..... | 7 |
| 2.3.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์..... | 7 |
| 2.3.2 ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์..... | 8 |

| | | |
|----------------|---|-----------|
| 2.3.3 | โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ | 9 |
| 2.4 | ชนิดของถ่านกัมมันต์..... | 10 |
| 2.4.1 | การแบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น | 10 |
| 2.4.2 | การแบ่งตามขนาดอนุภาค | 10 |
| 2.4.3 | การแบ่งตามขนาดรูพรุนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์..... | 11 |
| 2.4.4 | การแบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์..... | 11 |
| 2.4.5 | การแบ่งตามชนิดสารที่ถูกดูดซับ | 11 |
| 2.5 | กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ | 12 |
| 2.5.1 | การเตรียมวัตถุดิบ..... | 12 |
| 2.5.2 | การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)..... | 12 |
| 2.5.3 | การกระตุ้น (Activation)..... | 14 |
| 2.6 | วิธีการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์..... | 17 |
| 2.6.1 | คุณสมบัติทางกายภาพ | 17 |
| 2.7 | ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์..... | 23 |
| 2.8 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 24 |
| บทที่ 3 | วิธีดำเนินงานวิจัย | 27 |
| 3.1 | สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย | 27 |
| 3.2 | เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย | 27 |
| 3.3 | เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์..... | 28 |
| 3.4 | วิธีดำเนินการทดลอง..... | 28 |
| 3.4.1 | วิธีการเตรียมถ่านเพื่อใช้ในการกระตุ้น..... | 28 |
| 3.4.2 | วิธีการเตรียมสารเคมี..... | 28 |
| 3.4.3 | วิธีการเทียบสารละลายมาตรฐาน | 29 |

| | | |
|------------------------|---|-----------|
| 3.5 | วิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์..... | 30 |
| 3.6 | วิธีวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น..... | 31 |
| 3.6.1 | การวิเคราะห์ด้วยความสามารถในการดูดซับไอโอดีน..... | 31 |
| 3.6.2 | วิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเครื่อง Specific surface area analyzer (BET)..... | 31 |
| บทที่ 4 | ผลและอภิปรายผลการวิจัย | 32 |
| 4.1 | ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ | 32 |
| 4.2 | การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน..... | 34 |
| 4.3 | การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET | 35 |
| บทที่ 5 | สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 37 |
| 5.1 | สรุปผลการวิจัย..... | 37 |
| 5.1.1 | ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์..... | 37 |
| 5.1.2 | ผลของความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านกัมมันต์..... | 37 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ | 38 |
| บรรณานุกรม..... | | 39 |

สารบัญรูปภาพ

| เรื่อง | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Biomass) | 4 |
| รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส (Cellulose structure)..... | 4 |
| รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose structure)..... | 5 |
| รูปที่ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน (Lignin structure)..... | 5 |
| รูปที่ 2.5 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ | 8 |
| รูปที่ 2.6 ลักษณะของรูพรุนประเภทต่าง ๆ..... | 9 |
| รูปที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันนัลบนผิวของถ่านกัมมันต์..... | 10 |
| รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างของคาร์บอนอะตอมที่อุณหภูมิต่าง ๆ | 14 |
| รูปที่ 2.9 การดูดซับแก๊สไนโตรเจนบริเวณผิวหน้า และภายในรูพรุนของวัสดุ..... | 19 |
| รูปที่ 2.10 การดูดซับแก๊สไนโตรเจนของวัสดุ | 20 |
| รูปที่ 2.11 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับตามระบบ IUPAC | 23 |

สารบัญตาราง

| เรื่อง | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของซีวมวล | 6 |
| ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของซีวมวล | 6 |
| ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่และกะลาปาล์ม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง | 33 |
| ตารางที่ 4.2 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่และกะลาปาล์มที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง | 33 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่และกะลาปาล์มที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง | 34 |
| ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่และกะลาปาล์ม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสในระยะเวลา 2 ชั่วโมง | 35 |
| ตารางที่ 4.5 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนโดยเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่อง BET ของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก | 36 |
| ตารางที่ 4.6 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนโดยเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่อง BET ของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก | 36 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

ถ่านกัมมันต์ หรือ Activate carbon เป็นถ่านที่เกิดจากกระบวนการก่อกัมมันต์ เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างของถ่านอาทิเช่น พื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านทำให้ถ่านมีประสิทธิภาพในการดูดซับดียิ่งขึ้น ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวถ่านกัมมันต์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ไม่ว่าจะเป็นการดูดซับกลิ่น กำจัดแก๊สในอากาศ รวมถึงกำจัดสารเคมีที่อยู่ในน้ำ

ในปัจจุบันมีการผลิตถ่านกัมมันต์กันอย่างแพร่หลาย โดยจะมีกระบวนการผลิตและวิธีการผลิตที่แตกต่างกันแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้วัตถุดิบอิมตัวด้วยสารที่มีคุณสมบัติดูดน้ำ (Dehydrating agent) ชนิดเข้มข้นจำพวกกรดฟอสฟอริกหรือซิงค์คลอไรด์แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 - 800 องศาเซลเซียส แต่กระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีจะมีสารเคมีตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์ที่จะนำมาใช้งานแม้จะมีการชะล้างสารเคมีออกหลังจากกระบวนการแล้วก็ตาม จึงทำให้มีการเลือกใช้กระบวนการผลิตที่ปราศจากสารเคมีตกค้างเกิดเป็นกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical activation) ซึ่งเป็นการกระตุ้นในสถานะแก๊ส โดยใช้ไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) ที่อุณหภูมิ 800 - 1,100 องศาเซลเซียส แต่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีพื้นที่ผิวและรูพรุนในปริมาณน้อย^[1] และเนื่องจากปัจจุบันต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นมีราคาสูง จึงได้มีการหาวัตถุดิบตั้งต้นที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยวัตถุดิบที่นิยมใช้มักเป็นวัตถุดิบธรรมชาติเช่น กะลาปาล์ม ชั่งข้าวโพด ไม้ชนิดต่าง ๆ ถ่านหิน รวมไปถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์จะต้องมีองค์ประกอบของคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 45^[2]

ในปัจจุบันจังหวัดน่าน ซึ่งเป็นจังหวัดหนึ่งของประเทศไทยที่มีการปลูกต้นไม้เป็นจำนวนมาก และจากการศึกษาเรื่องถ่านกัมมันต์พบว่า ไม้เป็นพืชที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนอยู่ที่ร้อยละ 47.43 และยังสามารถเติบโตได้อย่างรวดเร็วใน 1 - 2 ปี ทำให้สามารถหมุนเวียนตัดสางลำแก่ไปใช้เผาถ่านได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ไม้ยังมีเส้นใยและรูพรุนมากกว่าต้นไม้ปกติถึง 4 เท่า ดังนั้นช่องว่างในเนื้อผงคาร์บอนของถ่านที่ผลิตได้จากไม้ย่อมมีมากกว่าถ่านที่ผลิตจากไม้ชนิดอื่น^[3] ด้วยสมบัติดังกล่าวไม้จึงเป็นอีกวัตถุดิบตั้งต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์

ด้วยข้อจำกัดของการกระตุ้นทางกายภาพ ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาวิธีการทำถ่านกัมมันต์ให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นเบสที่มีความเหมาะสมในการกระตุ้นทางเคมี^[4] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ และเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์คุณภาพดีและมีสารเคมีตกค้างในปริมาณน้อยที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.1.1 เพื่อปรับปรุงคุณภาพของถ่านไม้ไผ่โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายเบส
- 1.1.2 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่มีผลต่อรูพรุนของถ่านไม้ไผ่
- 1.1.3 เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนของอัลคาไลน์ที่มีผลต่อรูพรุนของถ่านไม้ไผ่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการกระตุ้นถ่านไม้ไผ่ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้อัลคาไลน์เป็นตัวช่วยในการกระตุ้น โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น และความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

1.4 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.4.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์
- 1.4.2 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้เรียนรู้ทักษะการทำงานวิจัย การจัดวางแผนการทำงาน และการแก้ปัญหา
- 1.5.2 ได้ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่มีคุณภาพดีที่สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดด้านอุตสาหกรรม และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ หรือ Activated carbon เป็นของแข็งที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง ซึ่งเกิดจากการนำเอาวัสดุธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กะลามะพร้าว, ถ่านหิน, ไม้ หรือเมล็ดพืช ไปผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น^[5] โดยวัสดุที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีปริมาณคาร์บอนที่สูง มีปริมาณองค์ประกอบของสารอินทรีย์และปริมาณเถ้าในวัสดุที่ต่ำ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้^[6] รวมทั้งความหนาแน่นของวัสดุที่เลือกใช้ หากเลือกใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น ไม้ หรือลิกนิน ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีปริมาตรรูพรุนสูงแต่มีความหนาแน่นต่ำทำให้ดูดซับแก๊สได้ไม่ดี ในขณะที่การเลือกใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กสูง ซึ่งทำให้สามารถดูดซับสารละลายและแก๊สได้ดี นอกจากนี้คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น วิธีการผลิต เครื่องมือที่ใช้ หรือสภาวะที่ใช้ในการผลิต^[7]

2.2 วัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มักเป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักไม่ว่าจะเป็นวัสดุที่ได้จากพืช เช่น กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย หรือเป็นวัสดุที่ได้จากถ่านหิน เช่น ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินบิทูมินัส นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการใช้วัสดุเหลือใช้จากกระบวนการอื่น ๆ มาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์^[7] ไม่ว่าจะเป็นปิโตรเลียมโค้กที่ได้จากกระบวนการถ่านน้ำมันดิบ^[8] กากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ^[9] ซึ่งวัสดุที่นำมาทำถ่านกัมมันต์ควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

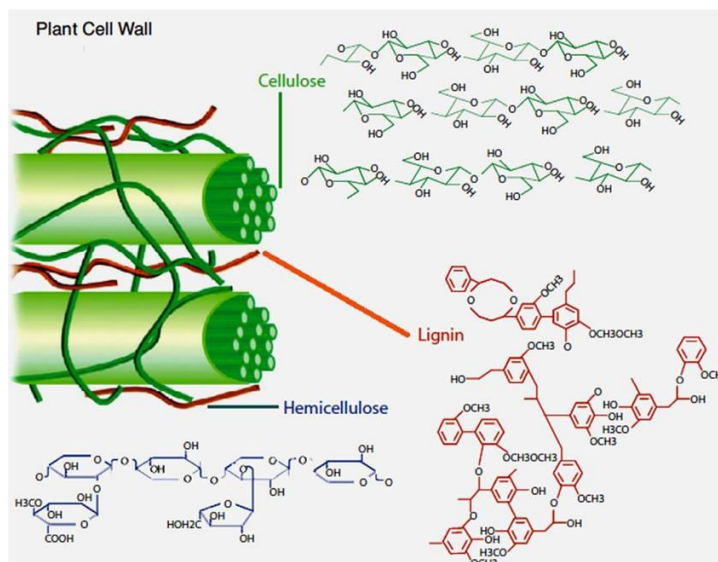
- (1) เป็นวัสดุที่เหลือทิ้ง หรือมีราคาถูก
- (2) ปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนสูง
- (3) ปริมาณสารอินทรีย์ หรือสารระเหยต่ำ
- (4) สะดวกต่อการใช้งาน ไม่เสื่อม หรือสลายตัว

2.2.1 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่ได้จากพืช สัตว์ หรือวัสดุเศษเหลือจากกระบวนการในอุตสาหกรรมเกษตร เช่น ชานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาล เศษไม้จากการแปรรูปไม้ยางพารา กากปาล์มจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

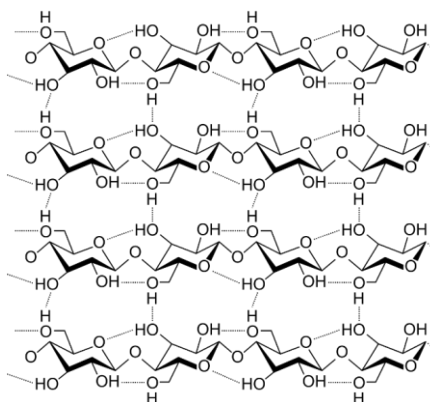
ออกจากผลปาล์ม เป็นต้น^[10] ซึ่งสารชีวมวลเป็นเหมือนแหล่งกักเก็บของพลังงานธรรมชาติจึงมีการนำเอาชีวมวลเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการเผาไหม้ เพื่อดึงเอาพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้งานต่อไป^[11]

ชีวมวลเป็นสารประกอบลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic biomass) ที่มีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin)^[12]



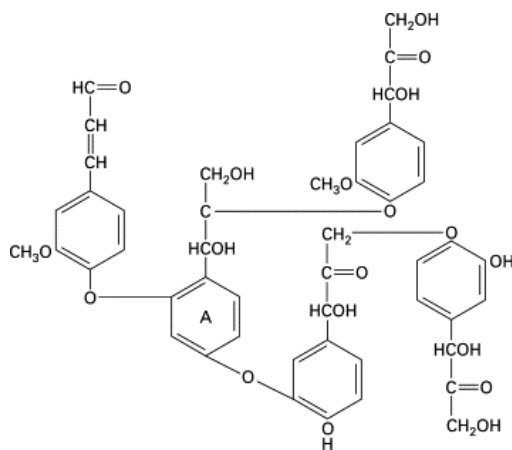
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic biomass)^[13]

เซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$)_n เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) และเป็นส่วนประกอบหลักของสารชีวมวล ภายในโครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบไปด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เซลลูโลสในชีวมวลมีความแข็งแรง มีอุณหภูมิการหลอมตัวสูง และไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั่วไป^[14]



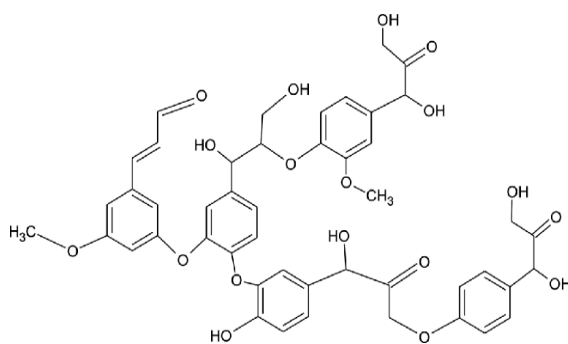
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส (Cellulose structure)^[14]

เฮมิเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) และเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบหลัก รองลงมาจากเซลลูโลส แต่จะประกอบไปด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ 5 และ 6 คาร์บอนอะตอมที่แตกต่างกัน โดยที่โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสจะขึ้นกับชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าเซลลูโลส แต่เมื่อทำการเชื่อมกันด้วยลิกนินจะทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่สามารถย่อยสลายได้เมื่อใช้กรด เบส หรือเอนไซม์^[15]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose structure)^[15]

ลิกนิน ($C_{10}H_{12}O_4$) เป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โครงสร้างของหน่วยย่อยของลิกนินจะมีโครงสร้างแบบอะโรมาติก มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่ยืดหยุ่น มีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ลิกนินยังมีโครงสร้างเป็นร่างแหเพื่อทำหน้าที่ยึดติดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสกับเฮมิเซลลูโลส และทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียน้ำของพืช^[16]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน (Lignin structure)^[17]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของซีวมวล^[18,19]

| ซีวมวล | เซลลูโลส (%wt) | เฮมิเซลลูโลส (%wt) | ลิกนิน (%wt) |
|----------------|----------------|--------------------|--------------|
| กะลาปาล์ม | 29.00 | 47.70 | 53.40 |
| กะลามะพร้าว | 15.00 | 35.00 | 50.00 |
| เปลือกอัลมอนด์ | 32.50 | 25.50 | 24.80 |
| เมล็ดทับทิม | 26.98 | 25.52 | 39.67 |
| เมล็ดพลัม | 23.00 | 20.00 | 49.00 |
| เมล็ดมะกอก | 14.00 | 15.00 | 42.00 |
| ไม้เนื้ออ่อน | 36.00 | 18.50 | 30.50 |
| ขานอ้อย | 42.16 | 36.00 | 19.30 |
| ไม้ไผ่ | 43.62 | 26.21 | 22.68 |
| ถั่วลิสง | 40.50 | 14.70 | 26.40 |

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของซีวมวล^[18]

| ซีวมวล | องค์ประกอบโดยประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | | | องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | | | | |
|----------------|---|------|----------|--|------|------|------|-------|
| | ความชื้น | เถ้า | สารระเหย | C | H | N | S | O |
| กะลาปาล์ม | 7.96 | 1.10 | 72.47 | 50.01 | 6.9 | 1.9 | 0.0 | 41 |
| กะลามะพร้าว | 8.21 | 0.1 | 73.09 | 48.63 | 6.51 | 0.14 | 0.08 | 44.64 |
| เปลือกอัลมอนด์ | 10.00 | 0.60 | 80.30 | 50.50 | 6.60 | 0.20 | 0.01 | 42.69 |
| ไม้ไผ่ | – | 3.90 | 80.6 | 43.8 | 6.6 | 0.4 | 0.0 | – |
| เมล็ดมะกอก | 10.40 | 1.40 | 74.40 | 44.80 | 6.0 | 0.1 | 0.01 | 49.09 |
| ซังข้าวโพด | 4.3 | 0.90 | 78.7 | 46.8 | 6.0 | 0.9 | – | 46.3 |
| เมล็ดทับทิม | 5.38 | 1.83 | 78.71 | 49.65 | 7.54 | 4.03 | 0.65 | 38.13 |
| ขานอ้อย | 6.2 | 0.90 | – | 47.3 | 6.2 | 0.3 | – | 46.2 |
| ไม้เบิร์ช | 6.6 | 0.2 | 81.2 | 48.4 | 5.6 | 0.2 | – | 45.8 |

2.2.2 ไม้ (Bamboo)

ไม้ เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่จัดอยู่ในวงศ์หญ้า Poaceae (เดิมคือวงศ์ Gramineae) และมีวงศ์ย่อยคือ Bambusoideae ซึ่งไม้ได้ถูกจัดเป็นหญ้าชนิดที่ใหญ่ที่สุดในโลก และเป็นพืชที่สามารถพบได้ในทุกสภาพอากาศ^[20] นอกจากนี้ไผ่ยังถือเป็นอีกหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย ไม่ว่าจะเป็น การสร้างที่อยู่อาศัย ใช้ทำเครื่องดนตรี ใช้ประกอบอาหาร หรือการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกมากมาย^[21]

ไผ่ชาง

ไผ่ชาง (*Dendrocalamus strictus*) เป็นไผ่ขนาดกลาง ลำต้นมีสีเขียวอ่อน ไม่มีหนาม ผิวเป็นมัน และมีกิ่งแขนงเป็นจำนวนมาก ไผ่ชางจะมีความสูงของลำต้นประมาณ 6 – 20 เซนติเมตร เนื้อหนา ประมาณ 5 – 8 มิลลิเมตร ปล้องยาวประมาณ 15 – 50 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 – 12.5 เซนติเมตร ลักษณะเป็นไม้เนื้อหยาบ กากหุ้มลำในปล้องจะมีสีเขียวอมเหลือง และมีลักษณะของ ใบเป็นปลายเรียวแหลม ที่ได้ท้องใบจะมีขนอ่อนอยู่แน่น มักใช้ในงานก่อสร้าง หรือทำเฟอร์นิเจอร์^[22]

2.2.3 กะลาปาล์ม (Palm shell)

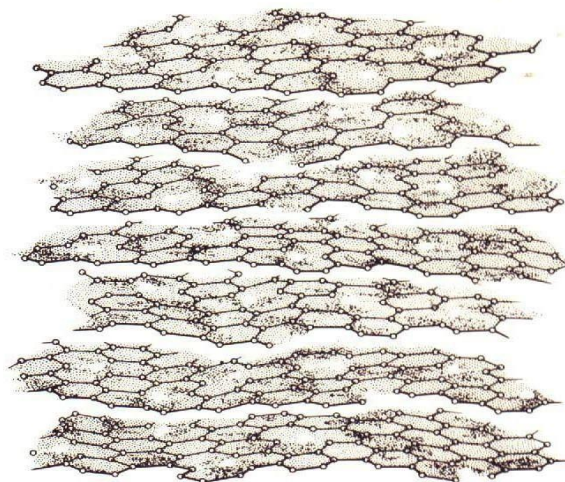
กะลาปาล์ม เป็นส่วนประกอบหนึ่งของผลปาล์ม โดยจะอยู่ระหว่างเส้นใยปาล์มที่ติดกับเปลือกด้านนอกสุด กับเนื้อปาล์มที่อยู่ด้านในสุด ลักษณะทั่วไปมีสีน้ำตาลและมีเนื้อแข็ง กะลาปาล์มจะเป็นผลพลอยได้จาก กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งกะลาปาล์มจะมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ให้ค่าความร้อนสูงจึงนิยมใช้ใน อุตสาหกรรมแทนการใช้ น้ำมันเตาที่มีราคาสูง และเนื่องจากการใช้กะลาปาล์มเป็นพลังงานทดแทนการใช้เชื้อเพลิง มีค่อนข้างสูงจึงทำให้ไม่เพียงพอต่อความต้องการในประเทศทำให้ต้องมีการนำเข้ากะลาปาล์มจากประเทศต่าง ๆ เช่น อินโดนีเซีย มาเลเซีย^[23]

2.3 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

2.3.1 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้างของแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็น ระเบียบน้อยกว่า และมีโครงสร้างเป็นผลึกเล็ก ๆ ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉาก และมีการซ้อน เหลื่อมกันในแนวราบอีกทั้งการจัดเรียงตัวยังมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการคาร์บอนไนเซชัน โดยทั่วไป ถ่านกัมมันต์จะมีการจะเรียงตัวของชั้นอะตอมคาร์บอนเป็นรูปของวงเบนซีน (Benzene ring) และแต่ละอะตอมจะ เกิดการสร้างพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมของคาร์บอนในแผ่นราบ (Plan) ในลักษณะสมมาตรกัน และอิเล็กตรอนที่ เหลืออีกหนึ่งอิเล็กตรอนจะเกิดการเคลื่อนที่ไปทั่วโครงสร้าง และเกิดการเรโซแนนซ์ (Resonance) เพื่อให้ โครงสร้างมีความเสถียรยิ่งขึ้น แต่ละชั้นจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ที่

ไม่แข็งแรงทำให้สามารถเกิดการสลับตำแหน่ง (Displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (Layer) ได้ง่าย ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ในโครงสร้างที่จุดนี้ได้ง่าย^[24]

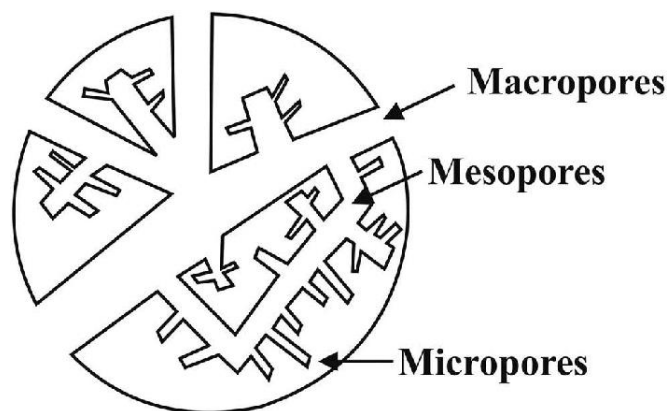


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์^[25]

2.3.2 ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์

กระบวนการกระตุ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียสารประกอบที่อยู่ภายในโครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์ และเกิดเป็นช่องว่างหรือรูพรุน ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับดีขึ้น และเมื่อพิจารณาพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะพบว่า บนพื้นผิวจะมีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากกระจายตัวเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและมีความลึกที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้รูพรุนที่เกิดขึ้นยังมีขนาดแตกต่างกันออกไปและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน โดยสามารถจำแนกประเภทของรูพรุนตามขนาดของรัศมีได้ ดังนี้^[24]

- แมคโครพอร์ (Macropores) คือรูพรุนที่มีรัศมีมากกว่าหรือเท่ากับ 100 – 200 นาโนเมตร มีปริมาตรรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ๆ ดังนั้นรูพรุนประเภทแมคโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญต่อการดูดซับ
- เมโซพอร์ (Mesopores) คือรูพรุนที่มีขนาดรัศมีระหว่าง 1.5 – 100 นาโนเมตร มีปริมาตรรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิว 20 – 100 ตารางเมตรต่อกรัม
- ไมโครพอร์ (Micropores) คือรูพรุนที่มีขนาดรัศมีน้อยกว่า 1.5 นาโนเมตร มีปริมาตรรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวจำเพาะจำนวนมากทำให้รูพรุนประเภทนี้มีความสำคัญต่อการดูดซับเป็นอย่างมาก

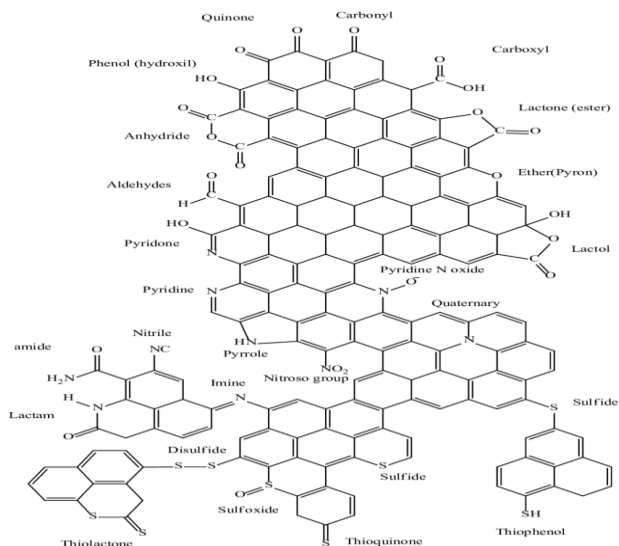


รูปที่ 2.6 ลักษณะของรูพรุนประเภทต่าง ๆ^[26]

2.3.3 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

กระบวนการคาร์บอนเซชันจะมีการกำจัดอะตอมของสารต่าง ๆ ที่ไม่ใช่อะตอมของคาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ออกไปในรูปของแก๊ส อะตอมของคาร์บอนที่เหลืออยู่จะมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นของวงแหวนเหลี่ยมอะโรมาติก (Aromatic ring) เชื่อมกันอย่างไม่เป็นระเบียบทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งช่องว่างนี้จะเป็นที่อยู่ของทาร์ หรือสารอื่นที่เกิดขึ้นจากการเผา เมื่อผ่านกระบวนการกระตุ้นช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับ โดยจะมีการกำจัดสารที่อุดตันอยู่ในช่องว่างออกไป และเกิดการสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะเกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพไม่เสถียร หรือวาเลนซ์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated valencies) พยายามไปเกาะหรือสร้างพันธะกับอะตอม หรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น ซึ่งกระบวนการกระตุ้นจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับพันธะที่มีการสร้างขึ้น โดยการสร้างพันธะนี้มักเกิดขึ้นกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่บริเวณขอบของวงแหวนเหลี่ยม นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ยังสามารถเกิดการดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) กับออกซิเจนได้ที่อุณหภูมิ 400 – 500 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็นออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น และยังพบว่า อะตอมของคาร์บอนสามารถสร้างพันธะที่มีความแข็งแรงกับไฮโดรเจน ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมของไนโตรเจน อะตอมซัลเฟอร์ และอะตอมของกลุ่มฮาโลเจน (Halogen) ออกจากโมเลกุลต่าง ๆ ได้ แม้จะอยู่ในสถานะแก๊ส หรือของเหลว จึงพบหมู่ฟังก์ชันนัลต่าง ๆ ที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์^[24]



รูปที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันที่ติดบนผิวของถ่านกัมมันต์^[33]

2.4 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้ โดยอาศัยเกณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่^[24]

2.4.1 การแบ่งตามชนิดของสารกระตุ้น

- เคมี (Chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน ทำให้ได้รูพรุนที่มีขนาดใหญ่
- ฟิสิกส์ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดส์ มักทำให้ได้รูพรุนที่มีขนาดเล็ก

2.4.2 การแบ่งตามขนาดอนุภาค

- ประเภทเป็นผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 15 ไมโครเมตร มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลืนในสารละลายได้หลายชนิด ซึ่งคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้ต้องตรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900 - 2547 ซึ่งทดสอบตามมาตรฐานของ American Water Work Association (AWWA)
- ประเภทเป็นเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

- (1) Pellet activated carbon มีรูปร่างขึ้นอยู่กับเครื่องอัด ใช้สำหรับการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ และใช้ทำหน้าที่ปกป้องกันแก๊สและไอพิษต่าง ๆ
- (2) Granular activated carbon มีรูปร่างไม่แน่นอน ใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์

2.4.3 การแบ่งตามขนาดรูพรุนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

- ขนาดเล็ก (Micropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอระเหย
- ขนาดกลาง (Transitional pores or Mesopores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15 - 100 นาโนเมตร ซึ่งใช้ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง (Catalytic reaction)
- ขนาดใหญ่ (Macropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสีและผลิตยา

2.4.4 การแบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น
- ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดแก๊สพิษหรือไอระเหย

2.4.5 การแบ่งตามชนิดสารที่ถูกดูดซับ

- สำหรับดูดซับแก๊ส (Gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับสารพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภทที่ต้องใช้ความดันสูงในการเผา
- สำหรับดูดซับสี (Color adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผาถ่านประเภท Soft artificial char ซึ่งเป็นถ่านที่ได้จากถ่านจากไม้ ถ่านจากขาน้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านจากหินน้ำมัน และ ถ่านจากกากน้ำตาล
- สำหรับดูดซับโลหะ (Metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวแยกพวกโลหะชนิดต่าง ๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน แพลทินัม และแร่

2.5 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.5.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องเลือกวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ชานอ้อย ชังข้าวโพด และถ่านหิน เป็นต้น และสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้า จะต้องมีการพิจารณาถึงคุณสมบัติบางประการร่วมด้วย ได้แก่^[24]

- (1) ค่าคาร์บอนคงตัวสูง (Fixed carbon)
- (2) ปริมาณความชื้น (Moisture) ต่ำ
- (3) มีสารที่ระเหยได้ (Volatile matter)
- (4) ปริมาณขี้เถ้า (Ash) ต่ำ
- (5) ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- (6) สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง

นอกจากการคัดเลือกวัตถุดิบให้เหมาะสมแล้ว ในการผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานเพื่อจะเป็นตัวกำหนดขั้นตอนในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบตั้งต้นโดยตรง หรือจากวัตถุดิบที่เป็นถ่าน โดยวัตถุดิบที่นำมาใช้นั้นจะต้องมีความชื้นที่ต่ำ ซึ่งสามารถลดความชื้นของวัตถุดิบได้โดยการนำไปอบหรือตากแดด นอกจากนั้นจะต้องทำการลดขนาดของวัตถุดิบ และคัดเลือกขนาดของวัตถุดิบให้มีขนาดที่เหมาะสมและมีขนาดเท่า ๆ กัน เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นกระจายได้อย่างทั่วถึง แต่ในบางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียวยากแก่การบดวัตถุดิบ หรือทำให้วัตถุดิบมีขนาดเท่า ๆ กัน ซึ่งอาจนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันก่อนแล้วจึงนำมาบดเพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการกระตุ้น

2.5.2 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบในพื้นที่ อับอากาศในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นถ่านลักษณะ เป็นของแข็งสีดำ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลว (Tar) และส่วนที่เป็นแก๊ส

การคาร์บอนไนเซชันจะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นการเกิดรูพรุนของวัตถุดิบ เนื่องจากมีการกำจัดสารระเหยต่าง ๆ รวมทั้งธาตุ และองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนออกไปจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของแก๊สและน้ำมันทาร์ โดยถ่านที่ได้ออกมาจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันจะมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบเกิดเป็น ช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก ซึ่งสารอินทรีย์ที่เป็นทาร์สามารถเข้าไปอุดช่องว่างเหล่านั้นได้ นอกจากนี้ยังเกิด

การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบภายในของถ่าน โดยพบว่าหลังผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแล้วถ่านที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และคาร์บอนต่อออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น^[27] ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการคาร์บอนไนเซชันมีดังนี้^[24]

(1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมากที่สุด การใช้อุณหภูมิที่สูงในการคาร์บอนไนเซชันจะเป็นการเพิ่มพลังงานในการทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบ ส่งผลให้ปริมาณของถ่านที่ได้ลดน้อยลง ในขณะที่ปริมาณของน้ำมันทาร์ และแก๊สที่ได้จะมีมากขึ้น นอกจากนี้จะส่งผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้ว อุณหภูมิที่เลือกใช้ยังส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นด้วย

(2) อัตราความร้อน

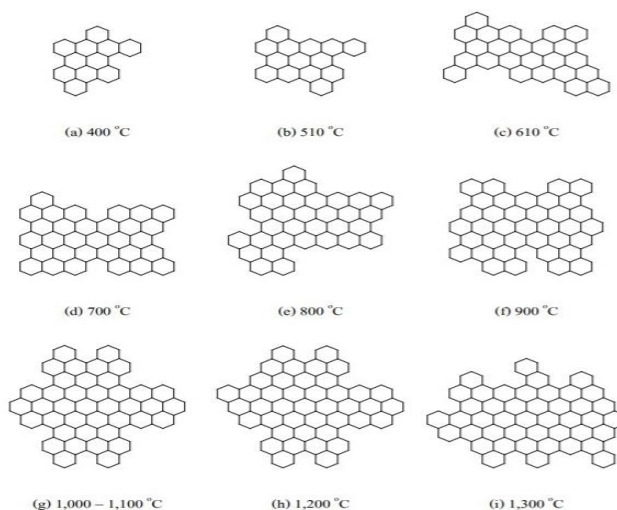
อัตราความร้อนที่ใช้ในการคาร์บอนไนเซชันจะส่งผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนมากขึ้นจะทำให้ปริมาณสารระเหยถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ และมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากคาร์บอนในโครงสร้างจะมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าการให้อัตราความร้อนที่ต่ำ ดังนั้นหากนำถ่านที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันด้วยอัตราการให้ความร้อนสูงไปกระตุ้นจะทำให้สารกระตุ้นสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้โดยง่าย

(3) ตัวกลางของปฏิกิริยา

ตัวกลางของปฏิกิริยา (Medium of reaction) จะมีผลกระทบท่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ถ้าแก๊สและไอที่เกิดระหว่างการไพโรไลซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยแก๊สที่เป็นตัวกลางจะเป็นแก๊สไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และแก๊สจากการเผาไหม้ หากตัวกลางเป็นแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นแก๊สไนโตรเจน แต่จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า

(4) ธรรมชาติของวัสดุคาร์บอน

วัสดุคาร์บอนแต่ละชนิดจะมีภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์แตกต่างกัน และส่งผลให้คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจะต้องเลือกใช้วัสดุคาร์บอนและสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมสำหรับการใช้งาน



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโครงสร้างของคาร์บอนอะตอมที่อุณหภูมิต่าง ๆ [27]

2.5.3 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น (Activation) เป็นการทำให้ถ่าน หรือคาร์บอนมีพื้นที่ผิว และความว่องไวของพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่าน โดยการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์จะมีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้ [28]

- (1) เพิ่มพื้นที่ผิวว่องไว (Active surface area) โดยการทำให้โมเลกุลบางกลุ่มเกิดการหลุดออก และเกิดเป็นพื้นที่ที่มีความสามารถในการดูดซับเข้ามาแทน
- (2) เพิ่มความว่องไวในการดูดซับของพื้นที่ผิว โดยทำให้อะตอมคาร์บอนมีพลังงานศักย์ที่สูงขึ้น และเกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับมากยิ่งขึ้น
- (3) กำจัดสารอินทรีย์ หรือนินทรีย์ที่ปนเปื้อนออกจากบริเวณพื้นที่ผิวที่ทำหน้าที่ในการดูดซับ
- (4) กำจัดสารทาร์ที่หลงเหลืออยู่ในถ่าน และขยายขนาดของรูพรุนภายในโครงสร้างของถ่าน

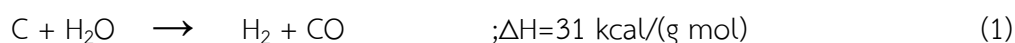
กระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งเป็น 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation)^[24,29]

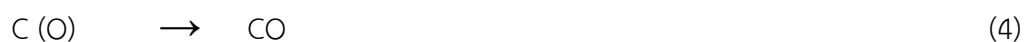
การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพบริเวณพื้นผิวทำให้ได้พื้นที่ผิว และรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชัน (Gasification) ที่อุณหภูมิสูง 800 – 1,000 องศาเซลเซียส ระหว่างสารที่ใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพหรือแก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ไอน้ำ แก๊สออกซิเจน และแก๊สไอเสียจากการเผา ก๊าซาร์ที่เหลืออยู่และคาร์บอนอะตอมในถ่าน ทำให้เกิดการหลุดออกของอะตอมคาร์บอนและเกิดเป็นรูพรุนขึ้น ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดจากกลไกที่แตกต่างกัน คือ การเปิดรูพรุนที่ถูกปิดไว้ด้วยอาร์ หรือสารอื่น ๆ การขยายขนาดของรูพรุนขนาดเล็ก และการสร้างรูพรุนใหม่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนและพื้นที่ผิวที่มีอิเล็คตรอนอิสระมากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น โดยข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่สูง และปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์ อัตราส่วนของแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

(1) การกระตุ้นด้วยไอน้ำ

การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation) เป็นการกระตุ้นทางกายภาพที่ใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง 950 – 1,100 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะอับอากาศหรือมีอากาศน้อยที่สุด โดยใช้เวลาและความดันที่เหมาะสม ซึ่งเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction)



กลไกของปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้



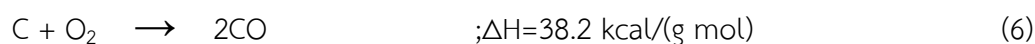
แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะหลุดออกไปจากผิวถ่านทำให้เกิดเป็นรูพรุน แต่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ส่วนใหญ่จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนดังสมการ



ในระหว่างการกระตุ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของถ่านเกิดเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนร้อยละ 97 – 98 และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของถ่าน

(2) การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

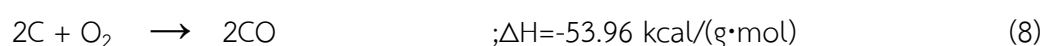
การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการกระตุ้นโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ และเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนขึ้น ดังนี้



จากค่า ΔH สังเกตเห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีการใช้พลังงานความร้อนมากกว่ากระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยทั่วไปการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้อุณหภูมิอยู่ที่ 1,000 – 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมากระตุ้น

(3) การกระตุ้นด้วยอากาศ

การกระตุ้นด้วยอากาศ เป็นการกระตุ้นโดยใช้ออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนี้



การกระตุ้นด้วยอากาศไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากการควบคุมค่าของอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการนั้นทำได้ยาก นอกจากนี้ ออกซิเจนที่เป็นตัวออกซิไดซ์จะทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของถ่านมากจึงทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณน้อย

การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)^[24,29]

การกระตุ้นทางเคมีเป็นการกระตุ้นวัตถุดิบโดยผสมวัตถุดิบเข้ากับสารเคมี และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 – 900 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ใช้นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น โดยทั่วไปสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นจะเป็นสารประเภทอัลคาไลน์ โลหะอัลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอเนต สารประเภทเบส และกรดบางชนิด เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride, ZnCl_2) และกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4) เป็นต้น การเติมสารเคมีเข้าไปในการกระตุ้นสามารถทำได้โดยการใส่สารเคมีเข้าไปพร้อมกับวัตถุดิบ หรือทำการแช่วัตถุดิบทิ้งไว้ในสารเคมีก่อนทำการกระตุ้น สารเคมีที่ใส่เข้าไปจะสลายสารที่ตกค้างอยู่บนผิวของวัตถุดิบ และเกิดการแทรกตัวในรูพรุน และเมื่อทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงสารเคมีเหล่านี้จะเกิดการสลายตัวเกิดเป็นรูพรุนขึ้น นอกจากนี้สารเคมีที่ใส่เข้าไปอาจ

เกิดการเชื่อมกันแบบไขว้ (Cross-link) ในโครงสร้างทำให้สารระเหยบางตัวไม่สามารถหลุดออกไปได้ส่งผลให้ปริมาณของคาร์บอนเพิ่มขึ้น และมีปริมาณของทาร์ที่ลดลง และการเชื่อมไขว้ประกอบกับการเลือกใช้สารเคมีที่มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงจะทำให้สารเคมีสามารถปกคลุมอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของถ่าน และลดโอกาสในการเกิดการหดตัว เมื่อนำถ่านที่ได้มาล้างสารเคมีออกจะเกิดช่องว่างหรือรูพรุนเพิ่มขึ้น

การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์^[5]

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นเบสแก่ที่สามารถแตกตัวให้อิออนของโพแทสเซียม และอิออนของไฮดรอกไซด์ เมื่อนำวัตถุดิบมาผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อิออนของโพแทสเซียมจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของวัตถุดิบ และเมื่อทำการกระตุ้นจะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



สมการที่ 9 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการสลายตัวเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide, K_2O) และน้ำ ทำให้คาร์บอนเกิดปฏิกิริยาแกซีฟิเคชันดังสมการที่ 10 จากนั้นโพแทสเซียมออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ด้วยไฮโดรเจน หรือคาร์บอนกลายเป็นโลหะโพแทสเซียมดังสมการที่ 11 และ 12 ตามลำดับ



ที่อุณหภูมิสูงโลหะโพแทสเซียมจะเกิดการอ่อนตัวทำให้สามารถเข้าแทรกในชั้นอะตอมของคาร์บอนได้ ทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น

2.6 วิธีการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

2.6.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่น (Density)^[5]

ความหนาแน่น เป็นการทดสอบหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาค ปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ และปริมาตรของถ่านกัมมันต์ โดยค่าความหนาแน่นที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดและความพรุนของถ่านกัมมันต์ เมื่อทำการวิเคราะห์โดยกำหนดให้ขนาดของอนุภาคมีค่าคงที่พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Volumetric density) ต่ำจะมีปริมาณรูพรุน

ขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรยังขึ้นกับความชื้นของอนุภาค หากอนุภาคมีความชื้นสูงจะมีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรต่ำ

พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)^[5]

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้ในการแสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากสามารถเปรียบเทียบค่าดังกล่าวได้กับถ่านกัมมันต์ทุกชนิด โดยส่วนมากค่าพื้นที่ผิวจะได้มาจากการทดสอบด้วยวิธีการของบีอีที (The Brunauer, Emmett and Teller, BET) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซในการดูดซับและใช้เครื่องทดสอบพื้นที่ผิวเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ โดยปกติถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวอยู่ที่ 600 – 2,500 ตารางเมตรต่อกรัม

การคำนวณพื้นที่ผิว BET^[31]

วิธีบีอีที (BET) เป็นวิธีการศึกษาพื้นที่ผิวของวัสดุ โดยอาศัยการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนพื้นผิวและภายในรูพรุนของวัสดุ ลักษณะการดูดซับจะเริ่มจากการเคลือบแก๊สไนโตรเจนบริเวณผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิว จากนั้นจะเกิดการแพร่กระจายของแก๊สไนโตรเจนไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งลักษณะการดูดซับดังกล่าวสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ (V) กับความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเป็นสมการที่เรียกว่า “สมการของ BET” ได้ดังนี้

$$\frac{1}{V \left[\left(\frac{P_0}{P} \right) \right] - 1} = \frac{1}{V_m C} - \frac{C - 1}{V_m C} \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

โดย V = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P_0

V_m = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว

P = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะที่ทำการทดลอง (มิลลิเมตรปรอท)

P_0 = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิเมตรปรอท)

C = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

จากสมการ BET เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[V(P/P_0 - 1)]$ กับ P/P_0 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีสมการของความชัน (Slope, s) ดังสมการ

$$s = \frac{C - 1}{V_m C}$$

และได้จุดตัดแกน y (y intercept, i) ดังสมการ

$$i = \frac{1}{V_m C}$$

จากนั้นนำค่า s และ i ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (V_m) จากสมการ

$$V_m = \frac{1}{s + i}$$

เมื่อทราบค่าของ V_m จะสามารถหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุได้ โดยแทนค่าในสมการ

$$S_t = \frac{V_m N A_{cs}}{M}$$

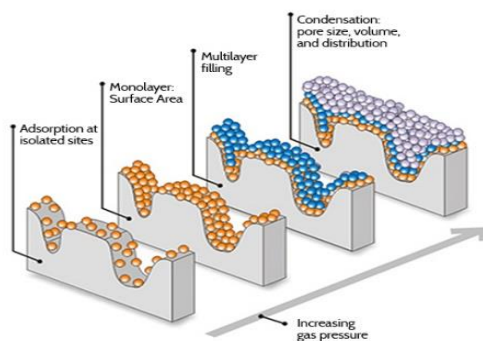
โดยที่ S_t = พื้นที่ผิวของวัสดุ (ตารางเมตร)

N = เลขอาโวกราโดร (6.023×10^{23}) (โมเลกุลต่อโมล)

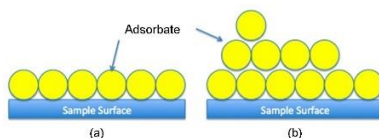
M = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (28 กรัมต่อโมล)

A_{cs} = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (16.2×10^{-23}) (ตารางเมตร)

นำค่า S_t ที่ได้หารด้วยปริมาณของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทดสอบ (V) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะในหน่วยตารางเมตรต่อกรัม



รูปที่ 2.9 การดูดซับแก๊สไนโตรเจนบริเวณผิวหน้า และภายในรูพรุนของวัสดุ^[34]



รูปที่ 2.10 การดูดซับแก๊สไนโตรเจนของวัสดุ^[35]

ค่าความแข็ง หรือค่าในการขัดถู (Hardness or Abrasion number)^[5]

ค่าความแข็ง หรือค่าในการขัดถู เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต้านทานของการสึกกร่อน ความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสี และความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ต่อกระบวนการล้าง (Backwashing) ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุที่ใช้ในการกระตุ้น และระดับการทดสอบความแข็งของถ่านด้วย Brinell hardness test

2.6.2 คุณสมบัติในการดูดซับ

สมบัติในการดูดซับของถ่านกัมมันต์หาได้จากไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) ของเหลวบนถ่านกัมมันต์ เมื่อนำไปดูดซับของเหลวตัวอย่าง

การดูดซับไอโอดีน (Iodine adsorption)^[5,32]

การดูดซับไอโอดีนเป็นวิธีในการหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยเป็นการหาจำนวนมิลลิกรัมของสารละลายไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ที่จุดที่ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนเหลือเท่ากับ 0.02 นอร์มัล ซึ่งอาจมีค่าแตกต่างจาก 0.02 นอร์มัล อยู่ในช่วง 0.007 – 0.03 นอร์มัล โดยขนาดโมเลกุลของไอโอดีนมีค่าเท่ากับ 0.54 นาโนเมตร วิธีวิเคราะห์ค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนนั้นจะเป็นไปตามมาตรฐาน American Society for Testing and Material (ASTM)

การคำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน

$$X/M \text{ (mg/g)} = \frac{[A - (DF \times B \times S)]}{M}$$

| | | | |
|-------|-----|---|---|
| เมื่อ | X/M | = | มิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ |
| | A | = | 12693N ₂ |
| | B | = | 126.93N ₁ |
| | DF | = | ค่าแฟคเตอร์การเจือจาง (Dilution factor) |
| | S | = | ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (มิลลิลิตร) |

| | | |
|----------------|---|---|
| M | = | น้ำหนักถ่าน (กรัม) |
| N ₁ | = | ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (นอร์มัล) |
| N ₂ | = | ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (นอร์มัล) |

การดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene blue)

การดูดซับเมทิลีนบลู สามารถบ่งบอกถึงค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์สำหรับโมเลกุลที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดโมเลกุลของเมทิลีนบลูได้ โดยมักจะเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นในรูพรุนแบบเมโซพอร์ (Mesoporous pore) หรือรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร

2.6.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Isotherm absorption)

ไอโซเทอมของการดูดซับจะแสดงในรูปของกราฟ เพื่ออธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างวัฏภาคของแข็งและของเหลว โดยอัตราการกระจายตัวจะสามารถทำการวัดได้ที่จุดสมดุล ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ และจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่กระจายไปยังบริเวณที่สามารถเกิดการดูดซับได้จนเต็ม ส่งผลให้แรงดึงดูดที่ผิวของตัวดูดซับน้อยลง แต่อาจสามารถดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้ โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับเป็นชั้น ๆ ต่อไป และการดูดซับในชั้นที่สองอาจเกิดขึ้นก่อนการดูดซับในชั้นแรกเกิดอย่างสมบูรณ์ แต่ในบางบริเวณอาจมีการดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น ซึ่งรูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับที่บนพื้นผิวตัวดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ โดยมีการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับของสมดุลวัฏภาคแก๊สกับของแข็งออกเป็น 5 ประเภทที่ถุกคิดค้นโดย Brunauer-Deming-Deming-Teller จึงเรียกการแบ่งไอโซเทอมแบบนี้ว่า BDDT ซึ่งต่อมาได้มีการเพิ่มประเภทไอโซเทอมการดูดซับอีก 1 ประเภท และจัดเป็นการแบ่งประเภทของไอโซเทอมแก๊สตามหลักของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ได้ดังต่อไปนี้^[36]

ประเภทที่ I

ไอโซเทอมประเภทนี้จะมีลักษณะการดูดซับเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร (Microporous adsorbent) และเกิดการดูดซับขึ้นในรูพรุนที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มากนัก ลักษณะการดูดซับของไอโซเทอมประเภทนี้จะเกิดการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์

ประเภทที่ II

ไอโซเทอมประเภทที่ II เป็นรูปแบบของไอโซเทอมที่เกิดการดูดซับโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (Monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจะมีการเกิดเป็นการดูดซับในชั้นถัดไป (Multilayer) โดยจะมีจุดเปลี่ยนโค้งเกิดขึ้นหลังสิ้นสุดการดูดซับในชั้นแรก ซึ่งตัวดูดซับของไอโซเทอมประเภทนี้มันจะเป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

ประเภทที่ III

ไอโซเทอมของการดูดซับประเภทนี้จะมีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับค่อนข้างน้อย แต่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองมาก ทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่จะเกิดการดูดซับในชั้นแรกอย่างสมบูรณ์ ทำให้ลักษณะของเส้นกราฟไอโซเทอมที่ได้มีลักษณะโค้งออก (Convex) ตามความดันย่อย ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับที่จะเพิ่มสูงตามความดันย่อยที่เพิ่มขึ้น

ประเภทที่ IV

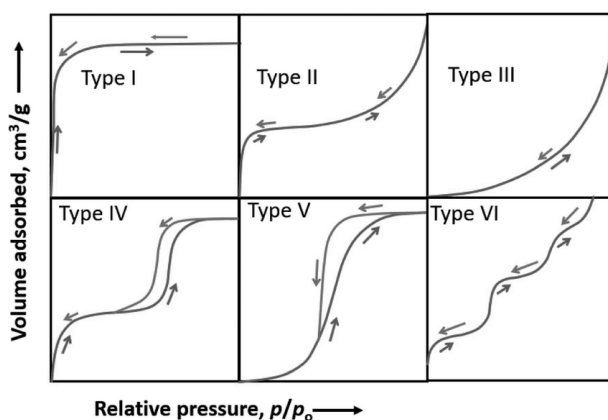
ไอโซเทอมประเภทนี้เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับค่อนข้างมาก ทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่บริเวณผิวแบบสองชั้น (Bilayer) โดยความชันของกราฟจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของตัวถูกดูดซับภายในโมเลกุล นอกจากนี้การเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นยังเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary condensation in pore) โดยจะมีจุดเปลี่ยนโค้งเช่นเดียวกับไอโซเทอมประเภทที่ II ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงการเกิดการดูดซับในชั้นแรกอย่างสมบูรณ์

ประเภทที่ V

ไอโซเทอมประเภทที่ V จะคล้ายกับประเภทที่ III โดยจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีค่าน้อย พบได้ในตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกันกับไอโซเทอมประเภทที่ IV โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นในชั้นที่ 2 จะเกิดก่อนการเกิดไอโซเทอมในชั้นแรกอย่างสมบูรณ์

ประเภทที่ VI

ไอโซเทอมประเภทนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) เกิดบนผิวของ Nonporous โดยความสูงของแต่ละชั้นจะขึ้นกับความสามารถของ Monolayer ในชั้นนั้น ๆ



รูปที่ 2.11 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับตามระบบ IUPAC^[37]

2.7 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติเกี่ยวกับการฟอกสีและดูดซับสารได้หลายชนิด อุตสาหกรรมหลายประเภทนิยมนำถ่านกัมมันต์มาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนใหญ่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสารที่เป็นของเหลว ส่วนที่เหลือจะเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด อุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์^[38]

อุตสาหกรรมเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์

- ใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดรส และกลิ่นที่ไม่ต้องการออกจากแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ
- ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อให้ได้ไวน์เกรดดีขึ้น
- ใช้ถ่านกัมมันต์เติมลงในเบียร์เพื่อกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจากการแช่เย็น โดยถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่ดูดซับตะกอนโปรตีนที่เอนไซม์ย่อยไม่ได้ และยังใช้ถ่านกัมมันต์ในการเตรียมน้ำสะอาดนำไปต้มเพื่อผลิตเบียร์

- การทำน้ำให้บริสุทธิ์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดคลอรีนและสารที่เป็นพิษอื่น ๆ ที่ติดมากับน้ำประปา หรือน้ำบาดาล

อุตสาหกรรมผลิตไขมันและน้ำมัน

- ใช้ดูดสิ่งปลอมปนในน้ำมันพืช
- ใช้ดูดซับตัวยับยั้งโดยไม่ดูดสี
- ใช้ร่วมกับดินช่วยฟอกขาว เพื่อให้สีของน้ำตามต้องการและได้รสชาติที่ดีขึ้น

การประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ

- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรซีน
- ใช้เป็นตัวพองเมอร์คิวรีคลอไรด์ในอุตสาหกรรมผลิตไวนิลคลอไรด์จากอะเซทิลีน และกรดไฮโดรคลอริก
- ใช้เป็นตัวพองทองคำขาว ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรเจน
- ใช้เป็นตัวแยกสาร โดยการบรรจุถ่านกัมมันต์ลงในคอลัมน์ของเครื่องโครมาโทกราฟีแก๊ส
- ใช้ผสมในสีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน
- ใช้เป็นตัวกรองในหน้าการกันก๊าซพิษและไอพิษต่าง ๆ
- ใช้ในกั้นกรองของบู่หรือบางชนิด
- ใช้ดูดควัน หรือกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ตามห้องปรับอากาศหรือตู้เย็น
- ใช้ฟอกสีในอุตสาหกรรมผลิตผงชูรส

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ying Pin Huang และคณะ^[39] ศึกษาผลของการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อให้ได้ช่วงที่เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นด้วยไอน้ำ และการกระตุ้นด้วยสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทั้ง 2 วิธีใช้ช่วงอุณหภูมิที่ 729.3 – 900 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการกระตุ้น 0.5 - 4 ชั่วโมง จากการทดลองเมื่อพิจารณาการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในเวลา 2.25 ชั่วโมง พบว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1,135 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.521 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีอัตราส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านไม้ไผ่อยู่ที่ 1 ต่อ 2 พบว่า ขนาดของพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเป็น 1,673 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.847 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านไม้ไผ่เป็น 1 ต่อ 4 และเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นเป็น 870 องศาเซลเซียส 1.27 ชั่วโมง พบว่า

ถ่านกัมมันต์ จะมีขนาดของพื้นที่เท่ากับ 2,527 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.96 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มของอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น รวมทั้งลดสัดส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อทำการทดสอบการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2 adsorption) ของถ่านกัมมันต์ พบว่าการมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่มากจะทำให้การดูดซับดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า วิธีเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central composite design, CCD) เป็นวิธีที่สามารถหาช่วงที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ได้ ซึ่งได้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 835 องศาเซลเซียส $\pm 5\%$ และช่วงเวลา 1.75 ชั่วโมง $\pm 30\%$ สำหรับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และการกระตุ้นทางเคมีตามลำดับ

Yan Juan Zhang และคณะ^[40] ศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่มีผลต่อรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากไม้ไผ่ จากการทดลองพบว่า ถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำจะทำให้ค่าของพื้นที่ผิว อัตราส่วนของปริมาตรรูพรุนต่อปริมาตรของสารทั้งหมด การเผาไหม้ และเปอร์เซ็นต์ผลได้ที่ดีกว่าการเผาไหม้แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นให้อยู่ในช่วง 550 - 850 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 60 - 150 นาที พบว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ในเวลา 120 นาที เป็นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้น มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1,210 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.542 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ Boehm titration, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ pH measurement พบว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน แต่มีผลต่อปริมาณของหมู่ฟังก์ชัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การเผาไหม้แบบไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) เพื่อดูลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น และเมื่อทดสอบการดูดซับด้วยสารละลายเมทิลีนบลู (Methylene blue, MB) ถ่านที่ถูกกระตุ้นในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจะมีความสามารถในการดูดซับอยู่ที่ 330 มิลลิกรัมต่อกรัม

Jingfeng Wu และคณะ^[41] ได้ทำการศึกษาวิธีการกระตุ้นถ่านไค้กที่มีปริมาณกำมะถันสูงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยใช้สารเคมี 2 ชนิดคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังจากทำการกระตุ้นถ่านไค้กด้วยไอน้ำ โดยใช้อัตราส่วนโดยมวลที่ 0.12 ถึง 1.02 หรืออัตราส่วนโดยมวลที่ 0.5 - 3 ที่เวลา 0 - 120 นาที และอุณหภูมิ 1,073 เคลวิน พบว่าในสภาวะที่อัตราส่วนโดยโมลของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ 0 - 0.7 และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 0.2 - 1 โดยใช้เวลา 30 นาที ขนาดรูพรุนของถ่านไค้กที่ถูกกระตุ้นด้วยไอน้ำและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่สภาวะดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 1 นาโนเมตร

เป็น 4 นาโนเมตร แต่ในทางกลับกันถ่านโค้กที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และไอน้ำที่สภาวะข้างต้นกลับทำให้ปริมาณรูพรุนโดยรวมลดลง

Feng Chin Wu และคณะ^[42] ได้ทำการศึกษา และเปรียบเทียบคุณสมบัติของรูพรุนและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และไอน้ำ โดยในการทดลองได้ใช้เปลือกพิสตาชิโอในการนำมาทำเป็นถ่าน หลังจากนั้นจึงนำไปกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และไอน้ำ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของรูพรุน พื้นที่ผิวของรูพรุนตามทฤษฎี Brunauer-Emmett-Teller (BET) ปริมาตร และการกระจายของรูพรุน รวมไปถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน โดยศึกษาคุณสมบัติเหล่านี้ด้วยวิธี t-plot โดยอาศัยการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2 adsorption) เป็นตัวกำหนด ซึ่งในวิธีการทดลองจะใช้อัตราส่วนของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านกัมมันต์ ตั้งแต่ 0.5 - 3 โดยจะได้พื้นที่ผิว BET ตั้งแต่ 731 - 1,687 ตารางเมตรต่อกรัม โดยมีปริมาณรูพรุนบนพื้นผิวร้อยละ 80 - 92 และเมื่อทำการทดลองกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำที่ 830 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะทำให้ได้พื้นที่ผิว BET เท่ากับ 821 ตารางเมตรต่อกรัม โดยจะมีปริมาณรูพรุนอยู่ที่ร้อยละ 42 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบทั้งสองวิธีการจะพบว่า การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพมากกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพนี้ไม่เพียงแต่เปรียบเทียบเฉพาะพื้นที่ผิว BET แต่ยังพิจารณาจากขนาดสัมพัทธ์ของรูพรุน และความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้น ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิว BET ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เป็นไปตามสมการ Elovich) มีประสิทธิภาพมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไอน้ำ (เป็นไปตามแบบจำลองการกระจายของอนุภาคภายใน (Intraparticle diffusion model))

P.G. Gonzalez และ Y.B. Pliego-Cuervo^[43] ได้ทำการศึกษาต้นไผ่ 3 ชนิด คือ ไผ่เก้าดาว (*Guadua angustifolia*) ไผ่เหลือง (*Bambusa vulgaris striata*) และไผ่ลู่จู่ (*Bambusa oldhamii*) โดยทำการจำแนกลักษณะทางกายภาพด้วยค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ซึ่งให้ค่าอยู่ในช่วง 280 - 1,500 มิลลิกรัมต่อกรัม มีร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์อยู่ที่ร้อยละ 80 - 85 และมีค่าประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับอยู่ที่ประมาณ 9.9 อีกทั้งยังมีค่าของกลุ่มสารจำพวกควิโนนิก (Quinonic group) บริเวณพื้นที่ผิวที่สูง ผลของชนิดของไผ่ ขนาดของอนุภาค เวลา และอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะถูกวิเคราะห์โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial experimental design methodology) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้เวลาในการกระตุ้น 4 ชั่วโมง ไผ่เหลืองเป็นไผ่ที่ให้ผลที่ดีที่สุด และปริมาณของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ประกอบไปด้วยออกซิเจน ที่อยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นที่ใช้ เวลา และอุณหภูมิ ซึ่งจะเป็นสิ่งที่ควบคุมปริมาณของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จากการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. ถ่านไม้ไฟ
2. ถ่านกะลาปาล์ม
3. สารละลายไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
4. น้ำแข็งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
5. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)
6. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
7. สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate, KIO_3) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
8. สารละลายไอโอดีน (Iodine, I_2) เข้มข้น 0.05 นอร์มัล
9. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI)
10. โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3)
11. สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH)
12. สารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลท (Potassium hydrogen phthalate, KHP) เข้มข้น 0.01 โมลาร์
13. น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ครกบดสาร
2. ตะแกรงร่อน
3. เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
4. ตู้อบสารควบคุมอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส
5. ตู้ดูดควัน
6. เตาให้ความร้อน
7. นาฬิกาจับเวลา
8. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 40
9. ชุดเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

10. เครื่องปฏิกรณ์ชนิดเบดนิ่ง (Fixed bed tubular reactor)
11. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
12. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K
13. แผ่นแรยไห้ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

Surface area and Porosity analyzer ASAP 2020 V4.0

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 วิธีการเตรียมถ่านเพื่อใช้ในการกระตุ้น

- | | |
|--------------|---|
| ขั้นตอนที่ 1 | บดถ่านไม้ไฟและถ่านกะลาปาล์มด้วยครกบดสาร |
| ขั้นตอนที่ 2 | คัดแยกขนาดของถ่านด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดอยู่ที่ประมาณ 2 มิลลิเมตร |

3.4.2 วิธีการเตรียมสารเคมี

- | | |
|--------------|--|
| ขั้นตอนที่ 1 | เตรียมสารไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยตวงสารไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 70 ml ใส่ลงในน้ำกลั่นปริมาณ 550 มิลลิลิตร |
| ขั้นตอนที่ 2 | เตรียมน้ำแข็งเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยชั่งแข็งปริมาณ 1 กรัม ละลายด้วยน้ำร้อนจนมีน้ำหนัก 100 กรัม |
| ขั้นตอนที่ 3 | เตรียมสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตปริมาณ 24.820 กรัม ในน้ำ 75 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.1 กรัม และเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาณเป็น 1000 มิลลิลิตร |
| ขั้นตอนที่ 4 | เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยอบผงโพแทสเซียมไอโอเดตที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นและชั่งสารปริมาณ 3.5667 กรัม จากนั้นละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาณเป็น 1000 มิลลิลิตร |
| ขั้นตอนที่ 5 | เตรียมสารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยละลายไอโอดีน 12.700 กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ 19.10 กรัม ด้วยน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กวนสารละลายทิ้งไว้ 4 ชั่วโมง จนกระทั่งผลึกไอโอดีนละลายหมด จากนั้นเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร |

- ขั้นตอนที่ 6** เตรียมสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล โดยการปิเปตสารละลายไอโอดีนความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล มาในปริมาตรที่ต้องการ และเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนที่ 7** เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนที่ 8** เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ โดยการปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล มาในปริมาตรที่ต้องการ และเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนที่ 9** เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลทความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท 0.1 กรัม ด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร

3.4.3 วิธีการเทียบสารละลายมาตรฐาน

3.4.3.1 วิธีเทียบสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต

- ขั้นตอนที่ 1** ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนที่ 2** เติมโพแทสเซียมไอโอไดต์ 2 กรัม เขย่าให้ละลาย
- ขั้นตอนที่ 3** เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นประมาณ 5 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนที่ 4** ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้บัฟเฟอร์เป็นอินดิเคเตอร์

3.4.3.2 วิธีเทียบสารละลายมาตรฐานไอโอดีน

- ขั้นตอนที่ 1** ปิเปตสารละลายไอโอดีน 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนที่ 2** ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยใช้บัฟเฟอร์เป็นอินดิเคเตอร์

3.4.3.3 วิธีเทียบสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์

- ขั้นตอนที่ 1 ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไฮดรเจนพทาเลท 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนที่ 2 ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์

3.5 วิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์

- ขั้นตอนที่ 1 ผสมถ่านไม้ไผ่หรือถ่านกะลาปาล์มปริมาณ 30 กรัม กับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนที่ 2 บรรจุแผ่นใยหินลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง และใส่สารในขั้นตอนที่ 1 ลงในเครื่องปฏิกรณ์
- ขั้นตอนที่ 3 นำเครื่องปฏิกรณ์ใส่ลงในเตาเผา พร้อมทั้งต่อเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่ด้านบนและต่อสายยางเพื่อเป็นทางผ่านของแก๊สไนโตรเจนและไอน้ำที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ตามลำดับ
- ขั้นตอนที่ 4 เติมน้ำลงในหม้อต้มปริมาณ 2 - 3 ลิตร
- ขั้นตอนที่ 5 เปิดถังแก๊สไนโตรเจน และปรับในมิ้อตราการไหลอยู่ที่ 250 มิลลิลิตรต่อนาที
- ขั้นตอนที่ 6 เปิดเครื่องให้ความร้อน และปรับอัตราให้ความร้อนอยู่ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา คือ 650, 700, 850 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ
- ขั้นตอนที่ 7 เมื่ออุณหภูมิถึง 400 องศาเซลเซียส ทำการเปิดเตาให้ความร้อนของหม้อต้มน้ำ
- ขั้นตอนที่ 8 เมื่ออุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา ทำการจับเวลา 2 ชั่วโมง
- ขั้นตอนที่ 9 เมื่อถึงเวลาที่กำหนด ทำการปิดเครื่องให้ความร้อน และปล่อยให้เย็น จากนั้นทำการเก็บถ่านกัมมันต์
- ขั้นตอนที่ 10 อบถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในตัวดูดความชื้นและนำมาชั่ง เพื่อดูน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ได้
- ขั้นตอนที่ 11 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 - 2 โดยทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นร้อยละ 0.06, 0.08 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเลือกใช้อุณหภูมิที่ดีที่สุดในการกระตุ้น

3.6 วิธีวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้น

3.6.1 การวิเคราะห์ด้วยความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

- ขั้นตอนที่ 1** ชั่งน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ 3 ค่า เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายที่กรองได้มีค่า มากกว่า เท่ากับ และน้อยกว่า 0.02 นอร์มัล ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ขั้นตอนที่ 2** ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 10 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 10 วินาที จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 มาแช่และแกว่งเบา ๆ ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อกำจัดเถ้า หรือซัลเฟตออกจากผิวของถ่านกัมมันต์
- ขั้นตอนที่ 3** เติมสารละลายไอโอดีน 100 มิลลิลิตรลงในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดและเขย่าแรง ๆ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 40
- ขั้นตอนที่ 4** ปิเปตสารละลายที่กรองได้ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่เตรียมไว้ โดยใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์

3.6.2 วิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเครื่อง Specific surface area analyzer (BET)

วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนด้วยเครื่อง Surface area and Porosity analyzer

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ เพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร่วมกับการใช้สารเคมีพร้อมทั้งลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเลือกศึกษาถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ควบคู่กับถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม

4.1 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์

เมื่อนำถ่านไม้ไผ่ และถ่านกะลาปาล์มมาทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าถ่านทั้ง 2 ชนิด มีค่าร้อยละผลได้ที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความร้อนจะทำให้ไถ่ และสารระเหยที่อยู่ในโครงสร้าง และผิวของถ่านของถ่านหลุดออก ส่งผลให้ไอน้ำที่เป็นตัวกระตุ้นสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนของถ่านเพื่อก่อให้เกิดรูพรุนได้ดียิ่งขึ้น และหากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการกระตุ้นโดยปราศจากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับการกระตุ้นโดยการใส่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นจะสังเกตเห็นว่า ค่าร้อยละผลได้ของการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 650 และ 700 องศาเซลเซียส จะมีค่าค่อนข้างสูง แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นให้สูงถึง 850 องศาเซลเซียส ค่าร้อยละผลได้จะมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส จะเกิดการหลุดออกของสารอินทรีย์ และไถ่ที่ตกค้างอยู่ภายในถ่านได้มากขึ้น นอกจากนี้ไอออนของโพแทสเซียม (K^+) ที่แทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างของถ่านเกิดการทำให้ปฏิกิริยาได้ดีขึ้น และยังเกิดการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำที่ใส่เข้ามาเพื่อทำการกระตุ้นจึงส่งผลให้ค่าร้อยละผลได้มีค่าน้อยกว่าการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำเพียงอย่างเดียว และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างถ่านทั้ง 2 ชนิด จะพบว่าการใช้ถ่านกะลาปาล์มจะได้ค่าร้อยละผลได้ที่สูงกว่าการใช้ถ่านไม้ไผ่ เนื่องจากกะลาปาล์มมีปริมาณลิกนินที่มากกว่าไม้ไผ่จึงสามารถทนความร้อนได้มากกว่า ส่งผลให้มีการสูญเสียปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า

ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่และกะลาปาล์ม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง

| อุณหภูมิ (°C) | ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ | | | |
|---------------|-----------------------------|---------|------------|---------|
| | ถ่านไม้ไผ่ | | ถ่านกะลา | |
| | ไม้ใส่ KOH | ใส่ KOH | ไม้ใส่ KOH | ใส่ KOH |
| 650 | 58.29 | 76.62 | 82.39 | 76.67 |
| 700 | 49.67 | 75.79 | 77.60 | 65.34 |
| 850 | 31.03 | 15.32 | 49.40 | 20.05 |

จากตารางที่ 4.2 เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นเป็นความเข้มข้นร้อยละ 0.04, 0.06 และ 0.08 ตามลำดับ พบว่าค่าร้อยละผลได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ส่วนหนึ่งที่ยังไม่เกิดการแทรกตัวเข้าไปยังโครงสร้างของถ่าน ได้ทำหน้าที่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำที่ใช้ในการกระตุ้น และการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อาจทำให้มีปริมาณสารเคมีหลงเหลืออยู่ที่บริเวณผิวของถ่านมากกว่าเดิม จึงทำให้ค่าร้อยละผลได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.2 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่และกะลาปาล์ม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง

| KOH (%wt) | ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ | |
|-----------|-----------------------------|----------|
| | ถ่านไม้ไผ่ | ถ่านกะลา |
| 0.04 | 15.32 | 20.05 |
| 0.06 | 25.12 | 44.54 |
| 0.08 | 44.65 | 22.18 |

4.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน

ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ หรือค่าการดูดซับไอโอดีนเป็นค่าที่บ่งบอกพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าที่แสดงจำนวนมิลลิกรัมของสารละลายไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม จากตารางที่ 4.3 เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นให้สูงขึ้นพบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนจะมีค่าที่สูงขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงรูพรุนของถ่านกัมมันต์ และหากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการกระตุ้นด้วยไอน้ำ เพียงอย่างเดียวกับการกระตุ้นโดยการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นจะสังเกตเห็นว่า ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนของถ่านและไอน้ำ รวมทั้งเกิดจากการแทรกตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในโครงสร้างของถ่านที่ทำให้เกิดการสลายตัวของแก้ว และสารอนินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีอยู่เดิมก่อนถูกแทนที่ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นเมื่อความร้อนสูงขึ้นจะเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับคาร์บอนของถ่านทำให้เกิดการพัฒนาของรูพรุนขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ได้ปริมาณรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น และมีค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่สูงขึ้นมากกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าร้อยละผลได้ที่ลดลงดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่และกะลาปาล์ม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง

| อุณหภูมิ (°C) | ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g) | | | |
|---------------|----------------------------|---------|------------|---------|
| | ถ่านไม้ไผ่ | | ถ่านกะลา | |
| | ไม้ใส่ KOH | ใส่ KOH | ไม้ใส่ KOH | ใส่ KOH |
| 25 | 149.22 | - | 137.91 | - |
| 650 | 265.92 | 401.08 | 244.88 | 376.73 |
| 700 | 283.71 | 523.51 | 267.52 | 466.69 |
| 850 | 332.42 | 889.05 | 532.51 | 914.45 |

เมื่อทำการปรับค่าร้อยละความเข้มข้นโดยน้ำหนักของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของโพแทสเซียมไอออนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การกระจายตัวเข้าไปในโครงสร้างถ่านกัมมันต์เกิดได้อย่างทั่วถึงประกอบกับมีการใช้ไอน้ำในการกระตุ้นเป็นการเพิ่มโอกาสในการสร้างรูพรุนให้มากขึ้น ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนที่ดีขึ้น

ตารางที่ 4.4 ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่และกะลาปาล์ม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง

| KOH (%wt) | ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g) | |
|-----------|----------------------------|----------|
| | ถ่านไม้ไผ่ | ถ่านกะลา |
| 0.04 | 889.05 | 914.45 |
| 0.06 | 938.40 | 954.21 |
| 0.08 | 973.46 | 1059.50 |

4.3 การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้จากการวิเคราะห์ BET ของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ และถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน เนื่องจากในการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วย BET จะใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวถูกดูดซับ ซึ่งขนาดอนุภาคของแก๊สไนโตรเจนจะเล็กกว่าขนาดอนุภาคของไอโอดีนทำให้เกิดการกระจายตัวเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่า และจากตารางที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำเพียงอย่างเดียวจะสังเกตว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้น รวมถึงค่าปริมาตรของรูพรุนและขนาดของรูพรุนที่ได้จากการวิเคราะห์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าเหล่านี้เกิดจากการสลายสารอินทรีย์หรือสารอื่น ๆ ที่อยู่ภายในรูพรุนของถ่าน และการเข้าไปแทรกตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อสร้างรูพรุนทำให้ได้ปริมาณรูพรุนที่สูงขึ้น โดยจะสังเกตว่าค่าของพื้นที่ผิว และปริมาตรของรูพรุนจะเพิ่มสูงขึ้นกว่า 2 เท่า จากเดิมที่ไม่มีการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวช่วยในการกระตุ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนโดยเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่อง BET ของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำร่วมกับการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก

| ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ | ค่าพื้นที่ผิว (m ² /g) P/P ₀ = 0.31 | ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g) P/P ₀ = 0.95 | ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm) 4V/A by BET |
|-----------------------|---|--|---|
| ไม้ไผ่ KOH | 440.0671 | 0.2504 | 2.2760 |
| ไผ่ KOH | 807.9763 | 0.4889 | 2.4204 |

ตารางที่ 4.6 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนโดยเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่อง BET ของถ่านกัมมันต์จากกะลาที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำความเข้มข้นร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนัก

| ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม | ค่าพื้นที่ผิว (m ² /g) P/P ₀ = 0.31 | ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g) P/P ₀ = 0.95 | ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm) 4V/A by BET |
|--------------------------|---|--|---|
| ไม้ไผ่ KOH | 573.3751 | 0.3844 | 2.6819 |
| ไผ่ KOH | 991.3026 | 0.9430 | 3.8045 |

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำเพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยการเลือกใช้สารละลายโพแทสเซียมที่มีความเข้มข้นต่ำเป็นตัวช่วยในการกระตุ้น โดยได้ทำการศึกษาตัวแปรของ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้ความดันบรรยากาศ และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 250 มิลลิลิตรต่อนาที

5.1.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์

อุณหภูมิในการกระตุ้น เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ และร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ เมื่อมีการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดการหลุดออกของสารระเหยได้โดยง่าย ซึ่งจะทำให้สารที่ใช้ในการกระตุ้นเกิดการแทรกตัวเพื่อเข้ามาทำให้เกิดรูพรุนได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ได้ลดลง ในขณะที่เดียวกันจะทำให้ได้ค่าพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น

5.1.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากความเข้มข้นที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย และมีการกระจายตัวเข้าไปในพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จึงมีพื้นที่ผิว และปริมาณรูพรุนที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์ผลของการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ โดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร่วมกับการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำ พบว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร่วมกระตุ้นเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิว และรูพรุนที่ดีกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำเพียงอย่างเดียวถึง 2 เท่า นอกจากนี้ยังได้ค่าพื้นที่ผิวจากการวิเคราะห์ BET ของถ่านกัมมันต์ใกล้เคียงกับการกระตุ้นด้วยสารเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการกระตุ้นที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน และเป็นกระบวนการที่ให้ค่าพื้นที่ผิวที่สูงถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม^[44] ซึ่งการกระตุ้นด้วยไอน้ำร่วมกับสารเคมีที่มีความเข้มข้นต่ำจะทำให้มีการใช้พลังงานในการกระตุ้นน้อยลง และลดโอกาสในการปล่อยสารเคมีจากกระบวนการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาลักษณะการเกิดรูพรุนและลักษณะการดูดซับของถ่านกัมมันต์
2. ปรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละผลได้ และค่าความสามารถในการดูดซับที่ชัดเจนขึ้น
3. ศึกษาและพิจารณาตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ เช่น เวลา สารเคมี หรือวัตถุดิบตั้งต้นในการทำถ่านกัมมันต์
4. ศึกษาการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เพิ่มเติม เช่น การดูลักษณะของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) หรือศึกษาองค์ประกอบโดยประมาณของถ่านกัมมันต์ที่ได้ (Proximate analysis)

บรรณานุกรม

- [1] VALITECH CO., LTD. Activated Carbon. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2563]. แหล่งที่มา: <http://www.vali-tech.net/home/article-read.php?ArticleId=14>.
- [2] Tang, Yu-bin, Liu, Qiang, Chen, Fang-yan. Preparation and characterization of activated carbon from waste ramulus mori. *Journal of Chemical Engineering*, 2012. 19-24.
- [3] T. Phuangchik. Activated Carbon from Bamboo: Does the Market have a high Demand?. *Scholarly Article* 2015, 23(6), 946-953.
- [4] J. Ludwinowicz, M. Jaroniec. Effect of activating agents on the development of microporosity in polymeric-based carbon for CO₂ adsorption. *Carbon* 2015, 673-679.
- [5] รองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ แก้วประดิษฐ์, นางสาวพฤกระยา พงศ์ยี่หล้า. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับงานเครื่องกรองน้ำ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 16.
- [6] DESOTEC activated carbon. Raw Materials of Activated Carbon. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 12 มีนาคม 2563]. แหล่งที่มา: <https://www.desotec.com/en/carbonology/carbonology-academy/raw-materials-activated-carbon>
- [7] นายสุธรรม สุขมณี, นายชาคริต ทองอุไร, นางสุภวรรณ ฐิระวณิชกุล. การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 6.
- [8] J. Wu, V. Montes, L.D. Virla, J.M. Hill. Impacts of amount of chemical agent and addition of steam for activation of petroleum coke with KOH or NaOH. *Fuel Processing Technology*, 2018. p. 53–60.
- [9] ฐิตาพร คำภู, ดร.ยุวรัตน์ เงินเย็น. ถ่านกัมมันต์จากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษและการศึกษาการกำจัดสีของน้ำทิ้ง. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 14.
- [10] พรพรรณ เล่าประวัติชัย. กรณีศึกษาพลังงานชีวมวลด้วยเศษไม้ยางพาราจังหวัดระนอง. มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, หน้า 5.
- [11] บริษัท เอ็นเนอร์ยี่ วิชั่น จำกัด. พลังงานชีวมวล. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 12 มีนาคม 2563]. แหล่งที่มา: <http://www.energyvision.co.th/14424507/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%8A%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%A1%E0%B8%A7%E0%B8%A5>.

- [12] รศ.ดร.ศิริพงษ์ เปรมจิต, รศ.ดร.ดวงพร เปรมจิต. การนำมวลชีวภาพของพืชเส้นใยมาใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานชีวภาพ. มหาวิทยาลัยนเรศวร, หน้า 3.
- [13] H. Bamdada, K. Hawboldta, S. MacQuarrieb. A review on common adsorbents for acid gases removal: Focus on biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. p.1705 - 1720.
- [14] Material selection. ความมุ่งมั่นเพื่อเป็นศูนย์กลางการขับเคลื่อนการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกไทยอย่างยั่งยืน. สถาบันพลาสติก, หน้า 8.
- [15] G. Brunner. Processing of Biomass with Hydrothermal and Supercritical Water. *Supercritical Fluid Science and Technology*, 2014. p. 395 – 509.
- [16] Material selection. ความมุ่งมั่นเพื่อเป็นศูนย์กลางการขับเคลื่อนการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกไทยอย่างยั่งยืน. สถาบันพลาสติก, หน้า 15.
- [17] Z. Mahmood, M. Yameen, M. Jahangeer, M. Riaz, A. Ghaffar, I. Javid. Lignin as Natural Antioxidant Capacity. *Lignin-Trends and Applications*, 2018. p.187.
- [18] M. A. Yahya, Z. Al-Qodah, C.W. Z. Ngah. Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. p. 218 – 235.
- [19] L. Huang, Z. Yang, M. Li, Z. Liu, C. Qin, S. Nie, S. Yao. Effect of Pre-Corrected pH on the Carbohydrate Hydrolysis of Bamboo during Hydrothermal Pretreatment. *Polymer*, 2020. 12, 612.
- [20] Bamboo farm. การกระจายพันธุ์ของไผ่. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 30 พฤษภาคม 2563]. แหล่งที่มา: <https://www.bamboofarm.org/about-bamboo/>.
- [21] ปานฉัตร กลัดเจริญ. การผลิตและทดสอบถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 6 – 8.
- [22] สุทัศน์ เล้าสกุล, ณัฐกร เสมสันทัต. การขยายพันธุ์ การปลูก และการจัดการสวนไผ่เศรษฐกิจ. กรมป่าไม้. หน้า 13.
- [23] Asia Bio Mass. Palm kernel shell. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 30 พฤษภาคม 2563]. แหล่งที่มา: http://www.asiabiomass.com/palm_shall/.
- [24] ปานฉัตร กลัดเจริญ. การผลิตและทดสอบถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 11 – 20.

- [25] ACES Activated Carbon Environmental Solution. ACTIVATED CARBON. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 30 พฤษภาคม 2563]. แหล่งที่มา: http://www.sorbotech.uk/4,activated_carbon
- [26] H. Patel. Charcoal as an adsorbent for textile wastewater treatment. *Separation Science and Technology*, 2018. p.2830.
- [27] ปรินทร์ เต็มญารศิลป์. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตง และไผ่หมาจู้. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 93.
- [28] ทศนีย์ น้อยเลิศ. การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราเพื่อดูดซับเหล็กในน้ำ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 5.
- [29] ดร.ไชยยันต์ ไชยยะ, ดร.วราภรณ์ ณะกุลรังสรรค์, ดร.ปทุมทิพย์ ตันทับทิมทอง. อิทธิพลของสารกระตุ้นที่มีต่อหมู่ทำหน้าที่และประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกเมล็ดยางพารา. หน้า 4.
- [30] ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์. ถ่านกัมมันต์. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 14 กรกฎาคม 2563]. แหล่งที่มา: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf.
- [31] สุพะไชย์ จินดาวงศ์กุล. การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ. สำนักเทคโนโลยีชุมชน. หน้า 22.
- [32] สุภาพร รัตนพันธ์, เพ็ญภา เพ็งแจ่ม, พนิดา กังซุ่น. การเตรียมและลักษณะจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด. มหาวิทยาลัยทักษิณ. หน้า 16.
- [33] F. G. Jahromi, A. Ghahreman. Effect of Surface Modification with Different Acids on the Functional Groups of AF 5 Catalyst and Its Catalytic Effect on the Atmospheric Leaching of Enargite. *Colloids and interfaces*, 2019. p.2.
- [34] Micromeritics. Surface Area. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 14 กรกฎาคม 2563]. แหล่งที่มา: <https://www.micromeritics.com/particle-testing/analytical-testing/surface-area/>.
- [35] Chemistry Libre Texts. BET Surface Area Analysis of Nanoparticles. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 14 กรกฎาคม 2563]. แหล่งที่มา: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Book%3A_Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_\(Barron\)/02%3A_Physical_and_Thermal_Analysis/2.03%3A_BET_Surface_Area_Analysis_of_Nanoparticles](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Book%3A_Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_(Barron)/02%3A_Physical_and_Thermal_Analysis/2.03%3A_BET_Surface_Area_Analysis_of_Nanoparticles).
- [36] วรวิทย์ จันท์สุวรรณ. ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลาย โดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. หน้า 10.

- [37] V. Kumar, B. Wood, G. Srinivas, K. K. Ramisetty, Characterization of adsorption site energies and heterogeneous surfaces of porous materials. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019
- [38] คณิตตา ธรรมจริยวงศา. ถ่านกัมมันต์: ภูมิปัญญาชาวบ้านสู่โรงงานอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. [เข้าถึงเมื่อ 14 กรกฎาคม 2563]. แหล่งที่มา: <http://blog.bru.ac.th/wp-content/uploads/bp-attachments/12259/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%96%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%A1%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%95%E0%B9%8C.pdf>.
- [39] Y. P. Huang, C. H. Hou, H. C. His, J. W. Wu. Optimization of highly microporous activated carbon preparation from Moso bamboo using central composite design approach. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2015. 50, 266-275.
- [40] Zhang, Y.J, Xing, Z.J, Duan, Z.K, Li, M., Wang, Y.. Effects of steam activation on the pore structure and surface chemistry of activated carbon derived from bamboo waste. *Applied Surface Science*, 2014. 315, 279-286.
- [41] J. Wu, Vicente Montes, L. D. Virla, J. M. Hill. Impacts of amount of chemical agent and addition of steam for activation of petroleum coke with KOH or NaOH. *Fuel Processing Technology*, 2018. 181, 53-60.
- [42] F. C. Wu, R. L. Tseng, C. C. Hu. Comparison of pore properties and adsorption performance of KOH activated and steam activation carbons. *Microporous and Mesoporous Materials*, , 2005. p. 95-106.
- [43] P.G. Gonzalez, Y.B. P. Cuervo. Physicochemical and microtextural characterization of activated carbons produced from water steam activation of three bamboo species. *Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013. p. 32 – 39.
- [44] S. Wang, H. Nam, H. Nam. Preparation of activated carbon from peanut shell with KOH activation and its application for H₂S adsorption in confined space. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020. p. 103 - 683.