



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกกระท้อนและก้านพริก

Preparation of Activated Carbons from Santol Peel and Chili Stem

ยุวรัตน์ เงินเย็น* วีรวิทย์ ผิวเรืองนนท์ และ รัชพล อณาชัย

Yuvarat Ngernyen* Werawit Phiewruangnont and Ratchapon Anachai

ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุและพลังงานชีวมวล สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

Biomass and Bioenergy Research Laboratory, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,

Khon Kaen University, Mittapap Road, Nai-Muang, Muang District, Khon Kaen 40002

Received: 10 พ.ย.61

Accepted: 21 ธ.ค.61

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกกระท้อนและก้านพริกโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เฟอริกคลอไรด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ผลการศึกษาพบว่า สำหรับเปลือกกระท้อน กรดฟอสฟอริกสามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด โดยมีพื้นที่ผิว $557 \text{ m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรรูพรุนรวม $0.447 \text{ cm}^3/\text{g}$ และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 3.10 nm โดยมีรูพรุนขนาดเล็ก 58.2% ส่วนการกระตุ้นก้านพริกด้วยซิงค์คลอไรด์ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด คือ $400 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยมีปริมาตรรูพรุนรวม $0.270 \text{ cm}^3/\text{g}$ และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 2.70 nm โดยเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ถึง 70% ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเปลือกกระท้อนและก้านพริกมีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ หลากหลายชนิด ดังนั้น เปลือกกระท้อนและก้านพริกซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร จึงมีศักยภาพที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์ เปลือกกระท้อน ก้านพริก พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน

*ติดต่อ: nyuvarat@kku.ac.th, 081-2889649

Abstract

Preparation of activated carbons from santol peel and chili stem by chemical activation with zinc chloride, phosphoric acid, ferric chloride and potassium hydroxide and physical activation with carbon dioxide has been carried out in this study. The prepared activated carbons were characterized surface area and porosity analyses. It was found that activated carbon with highest surface area of $577 \text{ m}^2/\text{g}$ has been obtained by phosphoric acid activation of santol peel with the total pore volume of $0.447 \text{ cm}^3/\text{g}$ and average pore size of 3.10 nm with the micropore volume of 58.2% . For activated carbons from chili stem, activation with zinc chloride exhibits the highest surface area of $400 \text{ m}^2/\text{g}$ with the total pore volume $0.270 \text{ cm}^3/\text{g}$ and average pore size of 2.70 nm with mainly micropore volume of 70% . The prepared activated carbons from santol peel and chili stem shows higher surface area values than many raw materials. Therefore, agricultural wastes such as santol peel and chili stem has potential as raw materials for production of activated carbon.

Keywords : Activated carbon: santol peel: chili stem: surface area: pore volume

1. บทนำ

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) ชนิดหนึ่ง ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีรูพรุนและพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง และสามารถดูดซับสารทั้งในสถานะของเหลวและแก๊ส เช่น ใช้ในการดูดซับโลหะหนักหรือสีย้อมจากน้ำเสีย หรือ ใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากแก๊สเสีย เป็นต้น โดยถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทุกชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหิน หรือ วัสดุชีวมวลต่าง ๆ ได้แก่ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม และไม้ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ได้มีความพยายามหาวัสดุทางเลือกใหม่ ๆ ที่มีราคาต่ำ หาได้ง่าย หรือเป็นวัสดุเหลือทิ้ง มาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว เปลือกถั่วพิทาชิโอ เปลือกถั่วแมคคาเดเมีย ยางรถยนต์ หรือ กากตะกอนน้ำเสีย เป็นต้น [1]

ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากการนำวัตถุดิบมาผ่านกรรมวิธีกระตุ้น (activation process) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (porosity) มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งการกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) และการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) โดยการกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นโดยใช้แก๊ส เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกซิเจน (O_2) อากาศ (air) หรือไอน้ำ (steam) ที่อุณหภูมิ $800\text{--}1,100^\circ\text{C}$ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่พื้นผิวของคาร์บอน ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ให้สูงขึ้น และมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ส่วนการกระตุ้นทางเคมีเป็นการเติมสารเคมีหรือสารกระตุ้น เช่น ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น ลงไปผสมกับวัตถุดิบ จากนั้นนำตัวอย่างไปเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนเซชัน

(carbonization) ที่อุณหภูมิ 400–800°C เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ โดยในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่เตรียมถ่านกัมมันต์จากการกระตุ้นทั้งสองวิธีร่วมกัน

ผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจที่จะผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งที่ไม่มีมูลค่าและไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ใดๆ ได้แก่ เปลือกกระเทียมและก้านพริก ซึ่งหาได้ง่ายตามร้านอาหารและร้านขายผลไม้ โดยยังไม่มีการวิจัยใดที่เตรียมถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบทั้งสองชนิด และหากวัตถุดิบทั้งสองสามารถนำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีรูปทรงได้ ก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมและวิเคราะห์วัตถุดิบ

เปลือกกระเทียมได้จากร้านขายผลไม้แห่งหนึ่ง ส่วนก้านพริกได้จากร้านอาหารอีกแห่งหนึ่ง ในจังหวัดขอนแก่น นำวัตถุดิบทั้งสองมาล้างให้สะอาด จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120°C จะได้ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นนำวัตถุดิบมาบดด้วยเครื่องบดอาหารร้อนด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh (850 μm) นำตัวอย่างมาวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer หรือ TGA (TGA-50, Shimadzu) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิห้องจนถึง 700°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min เพื่อนำข้อมูลที่ได้มากำหนดอุณหภูมิในการเตรียมถ่านกัมมันต์ต่อไป

ทำการหาสมบัติแบบประมาณ (proximate analysis) ของวัตถุดิบ ได้แก่ คาร์บอนคงตัว สารระเหย เถ้า และความชื้น โดยปริมาณสารระเหยใช้วิธีการ ASTM D5832-98 ซึ่งทำโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 30 นาที ส่วนการหา

ปริมาณความชื้น ทำตามวิธีการของ ASTM D2867 ซึ่งทำโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การหาปริมาณเถ้าทำโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปริมาณคาร์บอนคงตัวหาจากความแตกต่างของสารระเหย เถ้า และความชื้น ที่มีอยู่ในตัวอย่าง



รูปที่ 1 เปลือกกระเทียมและก้านพริกที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์

2.2 การเตรียมและวิเคราะห์สมบัติถ่านกัมมันต์

ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทั้งทางเคมีและทางกายภาพ สำหรับการกระตุ้นทางเคมี นำวัตถุดิบปริมาณ 20 กรัม มาทำการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และไอรอน (III) คลอไรด์ (FeCl_3) ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและสารกระตุ้น 1:2 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา

นำตัวอย่างใส่ลงในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor) ที่ทำจากเหล็ก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร จากนั้นนำไปคาร์บอนไนซ์ด้วยเตาเผาไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหล 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำซ้หลาย ๆ ครั้ง เพื่อกำจัดสารเคมีที่ตกค้างอยู่ในตัวอย่าง จนกระทั่งค่า pH ของน้ำที่ผ่านการล้างมีค่าเท่ากับค่า pH ของน้ำที่ใช้ล้าง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 120°C จนแห้ง ก็จะได้ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์สมบัติต่อไป

สำหรับการกระตุ้นทางกายภาพ นำวัตถุดิบปริมาณ 20 กรัม มาทำการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหล 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ (char) จากนั้นนำถ่านชาร์ไปกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อัตราการไหล 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ โดยในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นจะใช้เตาปฏิกรณ์และเตาเผาไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับการกระตุ้นทางเคมี

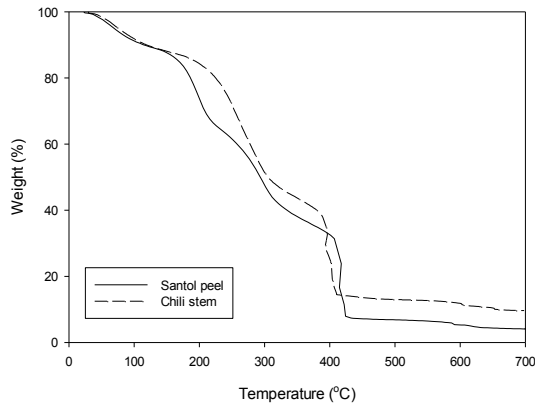
นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาทำการวิเคราะห์สมบัติรูพรุน โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C หรือ 77 K ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Surface Area and Porosimetry Analyzer (ASAP 2020) ซึ่งสมบัติรูพรุนที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ พื้นที่ผิว (S_{BET}) คำนวณโดยใช้สมการของ Brunauer–Emmett–Teller (BET) ที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P°) = 0.05-0.3 ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (micropore

volume, V_{mic}) ใช้สมการของ Dubinin–Radushkevich ที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P°) = 0.05-0.3 ปริมาตรรูพรุนรวม (total pore volume, V_T) วัดที่ค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P°) = 0.99 ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ (mesopore and macropore volume, V_{me+ma}) คำนวณโดยการลบปริมาตรรูพรุนรวมด้วยปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (pore diameter, D_p) คำนวณจากสมการ (4×V_T)/S_{BET}

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบ

รูปที่ 2 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกกระท้อนและก้านพริก พบว่า กราฟการสลายตัวของวัตถุดิบทั้งสองชนิดเหมือนกับการสลายตัวของวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เฮลิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน โดยน้ำหนักของตัวอย่างทั้งสองลดลง 2 ช่วง กล่าวคือ ในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 120°C ซึ่งน้ำหนักที่หายไปในช่วงอุณหภูมินี้ คือ ความชื้นที่อยู่ในตัวอย่าง โดยมีประมาณ 12% และการลดลงของน้ำหนักในช่วงที่ 2 คือที่อุณหภูมิระหว่าง 150–400°C โดยน้ำหนักของตัวอย่างทั้งสองลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สารระเหยต่างๆ เกิดการสลายตัวโดยระเหยออกไปจากโครงสร้างเหลือเพียงแค่องค์ประกอบเป็นคาร์บอน ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์คืออุณหภูมิตั้งแต่ช่วงนี้เป็นต้นไป งานวิจัยนี้จึงทำการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 500°C และใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 400°C ในการเตรียมถ่านชาร์ก่อนเข้าสู่กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป 0.05-0.3



รูปที่ 2 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกกระท้อน (santol peel) และก้านพริก (chili stem) ด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติแบบประมาณของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด พบว่า ปริมาณความชื้นที่หาได้โดยวิธี ASTM มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในตัวอย่างจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA โดยเปลือกกระท้อนมีปริมาณเล็กน้อยมาก ส่วนก้านพริกก็มีปริมาณต่ำเทียบเท่ากับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ สำหรับปริมาณคาร์บอนคงตัวนั้น พบว่า เปลือกกระท้อนและก้านพริกมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 16.3 และ 17.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นๆ ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการนำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ เช่น ช้างขาวโพด (ร้อยละ 16.1 โดยน้ำหนัก) [2] ชานอ้อย (ร้อยละ 16.2 โดยน้ำหนัก) [3] กะลาปาล์ม (ร้อยละ 16.4 โดยน้ำหนัก) [4] หรือ ฟางข้าว (ร้อยละ 17.8 โดยน้ำหนัก) [5] ดังนั้น วัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด จึงมีศักยภาพที่จะนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

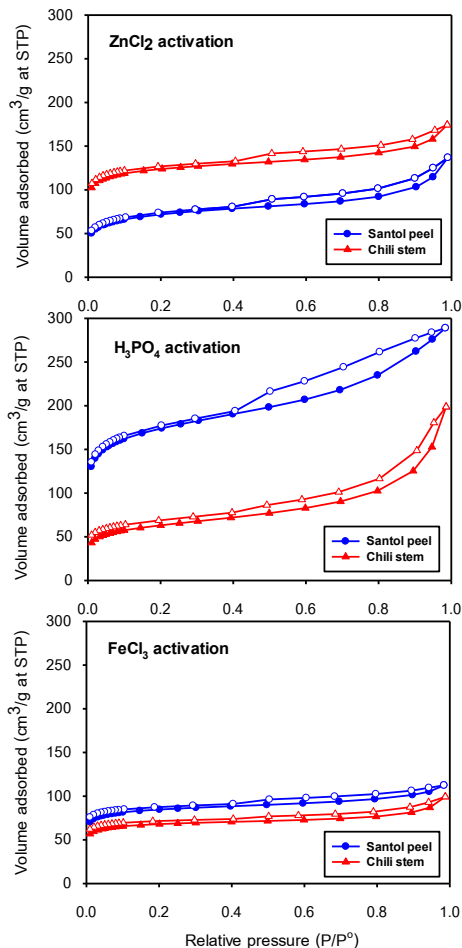
ตารางที่ 2 สมบัติแบบประมาณของเปลือกกระท้อนและก้านพริก

องค์ประกอบ (%โดยน้ำหนัก)	เปลือกกระท้อน	ก้านพริก
คาร์บอนคงตัว	16.3	17.3
สารระเหย	67.5	59.3
เถ้า	1.2	10.2
ความชื้น	15.0	13.2

3.2 สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

รูปที่ 3 แสดงไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเปลือกกระท้อนและก้านพริก โดยการกระตุ้นด้วย ZnCl_2 , H_3PO_4 และ FeCl_3 (ไม่ได้แสดงไอโซเทอมจากการกระตุ้นด้วย KOH และ CO_2 เนื่องจากมีปริมาณการดูดซับค่อนข้างน้อย) จากรูปพบว่า การกระตุ้นด้วย ZnCl_2 และ H_3PO_4 มีลักษณะของไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบชนิดที่ IV ตามการแบ่งของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ซึ่งเป็นไอโซเทอมของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุน 2–50 nm) โดยมีวงฮิสเทอรีซิสในช่วงของการคายซับอย่างเด่นชัด ซึ่งวงฮิสเทอรีซิสนี้จะเกิดขึ้นกับตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางอยู่ในโครงสร้าง โดยสำหรับการกระตุ้นด้วย FeCl_3 มีการเกิดขึ้นของวงฮิสเทอรีซิสเล็กน้อย โดยแสดงลักษณะของไอโซเทอมชนิดที่ I อย่างเด่นชัด ซึ่งเป็นลักษณะของไอโซเทอมที่เป็นการดูดซับของตัวดูดซับรูพรุนขนาดเล็ก (ขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 nm) โดยขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะแสดงในตารางที่ 1 ต่อไป

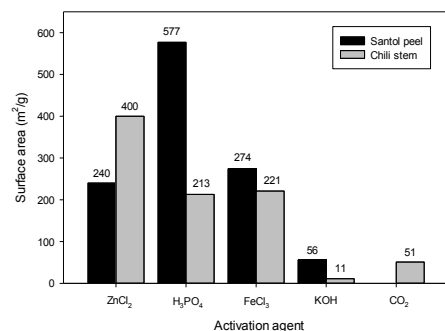
นอกจากนั้น จะเห็นได้ว่า สำหรับเปลือกกระท้อน การกระตุ้นด้วย H_3PO_4 มีปริมาณการดูดซับแก๊สไนโตรเจนสูงที่สุด ส่วนก้านพริกมีปริมาณการดูดซับสูงที่สุดเมื่อใช้ ZnCl_2 ในการกระตุ้น นั่นคือ ตัวอย่างทั้งสองมีความพรุนอยู่ในโครงสร้างมากที่สุด



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับ (สัญลักษณ์ทึบ) และการคายซับ (สัญลักษณ์โปร่ง) ของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

ข้อมูลจากไอโซเทอมการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 3 สามารถนำไปคำนวณพื้นที่ผิวและสมบัติรูพรุนต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ ได้ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 2 พบว่า

สำหรับเปลือกกระท้อน กรดฟอสฟอริกสามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด โดยมีพื้นที่ผิว $577 \text{ m}^2/\text{g}$ รองลงมาได้แก่ ไอร์รอน (III) คลอไรด์ ซึ่งคอลลอยด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ โดยไม่สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์จากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ในขณะที่ซิงค์คลอไรด์สามารถใช้ในการกระตุ้นก้านพริกให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด ($400 \text{ m}^2/\text{g}$) โดยไอร์รอน (III) คลอไรด์ และกรดฟอสฟอริกสามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน ซึ่งสำหรับก้านพริกสามารถใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการกระตุ้นแล้วได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนสูงกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า โดยภาพรวมแล้วการกระตุ้นด้วยสารเคมีจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าการกระตุ้นด้วยแก๊ส ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยอื่นๆ ที่แสดงให้เห็นว่า การกระตุ้นทางเคมีจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีความพรุนสูงกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ แต่ก็มีข้อเสีย คือ ต้องทำการล้างสารเคมีก่อนนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ ส่วนการกระตุ้นทางกายภาพถึงแม้ว่าจะมีความพรุนน้อยกว่า แต่ก็มีข้อดีคือ สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ได้เลย โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการล้าง



รูปที่ 4 พื้นที่ผิว BET ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากสารกระตุ้นชนิดต่างๆ

สำหรับปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ พบว่า วัสดุดิบทั้งสองมีแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ $H_3PO_4 > ZnCl_2 > FeCl_3 > KOH > CO_2$ โดยสำหรับเปลือกกระท้อน สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น โดยส่วนใหญ่สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้น $FeCl_3$ ที่ได้ถ่านกัมมันต์ที่รูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับขนาดของรูพรุน กล่าวคือ เมื่อถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมาก ก็จะมีขนาดรูพรุนเล็กๆ ในขณะที่เมื่อตัวอย่างมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่เพิ่มสูงขึ้น ขนาดรูพรุนก็จะใหญ่ขึ้น สำหรับการกระตุ้นก้านพริก ด้วย $ZnCl_2$ $FeCl_3$ และ CO_2 จะได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่การกระตุ้นด้วย KOH และ H_3PO_4 จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่เป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะการกระตุ้นก้านพริก ด้วย KOH ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนกว้างถึง 27.25 nm ซึ่งถือว่ากว้างมากเมื่อเทียบกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากงานวิจัยอื่นๆ โดยถ่านกัมมันต์ตัวอย่างนี้ มีพื้นที่ผิวเพียง $11 \text{ m}^2/\text{g}$ (รูปที่ 4) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า เมื่อตัวดูดซับมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ก็จะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่ากรณีที่ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม การที่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวน้อยแต่มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ ไม่ได้หมายความว่า จะไม่สามารถนำถ่านกัมมันต์นี้ไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับ โดยถ่านกัมมันต์นี้เหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เพราะถ้าสารที่เราต้องการดูดซับมีขนาดโมเลกุลใหญ่ แต่รูพรุนของตัว

ดูดซับเล็กกว่าขนาดของโมเลกุล โมเลกุลที่เราต้องการดูดซับก็จะไม่สามารถเคลื่อนย้ายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้

ตารางที่ 2 ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

ตัวอย่าง	V_{mic} (cm^3/g)	V_{me+ma} (cm^3/g)	V_T (cm^3/g)	D_p (nm)
เปลือกกระท้อน				
ZnCl ₂	0.107 (50.5%)	0.105 (49.5%)	0.212	3.53
H ₃ PO ₄	0.260 (58.2%)	0.187 (41.8%)	0.447	3.10
FeCl ₃	0.130 (74.7%)	0.044 (25.3%)	0.174	2.54
KOH	0.028 (45.2%)	0.034 (54.8%)	0.062	4.44
CO ₂	ไม่สามารถวัดได้			
ก้านพริก				
ZnCl ₂	0.189 (70.0%)	0.081 (30.0%)	0.270	2.70
H ₃ PO ₄	0.094 (30.6%)	0.213 (69.4%)	0.307	5.76
FeCl ₃	0.104 (67.5%)	0.050 (32.5%)	0.154	2.78
KOH	0.008 (10.7%)	0.064 (89.3%)	0.072	27.25
CO ₂	0.026 (83.9%)	0.005 (16.1%)	0.031	2.39

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเปลือกกระท้อนและก้านพริกมีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากดอกของต้นปาล์ม [6] ก้านของต้นวอลนัท [7] ไม้ไผ่ [8] เปลือกถั่วลิสง [9] ยางรถยนต์ใช้แล้ว [10] แร่ Shungite [11] กากตะกอน [12–13] เปลือกหุ้ม

เม็ด macauba [14] เปลือกลูกสน [14] และเส้นใยปอแก้ว [15] โดยถ่านกัมมันต์จากก้านพริกมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์จากใบปาล์มแฉีก (carnauba palm) [14] โดยเปลือกกระท้อนให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าแกนมะม่วง [16] และแห่น [17] เล็กน้อย ดังนั้น เปลือกกระท้อนและก้านพริกจึงมีศักยภาพที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 3 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

วัตถุดิบ	สารกระตุ้น	พื้นที่ผิว (m ² /g)
เปลือกกระท้อน	H ₃ PO ₄	577
ก้านพริก	ZnCl ₂	400
ดอกของต้นปาล์ม [6]	H ₂ SO ₄	9.57
ก้านของต้นวอลนัท [7]	HNO ₃	32
ไม้ไผ่ [8]	HNO ₃	68
เปลือกถั่วลิสง [9]	KOH	89
ยางรถยนต์ใช้แล้ว [10]	K ₂ CO ₃	133
	NaOH	128
	Na ₂ CO ₃	92
แร่ Shungite [11]	ไอน้ำ	247
กากตะกอน (sewage sludge) [12]	CO ₂	65–159
กากตะกอน (sewage sludge) [13]	H ₃ PO ₄	230–296
เปลือกหุ้มเม็ด macauba [14]	CaCl ₂	265
	H ₃ PO ₄	371
เปลือกลูกสน (pine nut) [14]	CaCl ₂	290
	H ₃ PO ₄	296
เส้นใยปอแก้ว (kenaf core fiber) [15]	H ₃ PO ₄	299
ใบปาล์มแฉีก (carnauba palm) [14]	H ₃ PO ₄	402
	CaCl ₂	431
แกนมะม่วง [16]	H ₃ PO ₄	490
แห่น (Lemna minor) [17]	H ₃ PO ₄	532

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่า สามารถนำเปลือกกระท้อนและก้านพริกมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ได้โดยผ่านการกระตุ้นทั้งทางเคมีและทางกายภาพ โดยสำหรับเปลือกกระท้อน พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เรียงตามสารกระตุ้นดังนี้ H₃PO₄ > ZnCl₂ > FeCl₃ > KOH โดยไม่สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนได้จากการใช้ CO₂ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงสุดคือ 577 m²/g ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากก้านพริกมีพื้นที่ผิวเรียงตามลำดับดังนี้ ZnCl₂ > FeCl₃ > H₃PO₄ > CO₂ > KOH โดยพื้นที่ผิวสูงสุดคือ 400 m²/g

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยต่อไปควรทำการศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ เช่น ความเข้มข้นของสารเคมี อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น มา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ngernyen Y, Tangsathitkulchai C, Tangsathitkulchai M. Porous properties of activated carbon produced from Eucalyptus and Wattle wood by carbon dioxide activation. Korean Journal of Chemical Engineering . Eng. 2006; 23(6): 1046-54.
- [2] Chang CF, Chang CY, Tsai WT. Effects of burn-off and activation temperature on preparation of activated carbon from

- corn cob agrowaste by CO₂ and steam. Journal of Colloid and Interface Science. 2000; 232: 45-9.
- [3] Darmstadt H, Garcia-Perez M, Chaala A, Cao NZ, Roy C. Co-pyrolysis under vacuum of sugar cane bagasse and petroleum residue properties of the char and activated char products. Carbon. 2001; 39: 815-25.
- [4] Lua A, Guo J. Activated carbon prepared from oil palm stone by one-step CO₂ activation for gaseous pollutant removal. Carbon. 2000; 38: 1089-97.
- [5] Oh GH, Park CR. Preparation and characteristics of rice-straw-based porous carbons with high adsorption capacity. Fuel. 2002; 81: 327-36.
- [6] Nethaji S, Sivasamy A. Adsorptive removal of an acid dye by lignocellulosic waste biomass activated carbon: equilibrium and kinetic studies. Chemosphere. 2011; 82: 1367-72.
- [7] Ghaedi M, Mazaheri H, Khodadoust S, Hajati S, Purkait MK. Application of central composite design for simultaneous removal of methylene blue and Pb²⁺ ions by walnut wood activated carbon. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2015; 135: 479-90.
- [8] Hajati S, Ghaedi M, Yaghoubi S. Local, cheap and nontoxic activated carbon as efficient adsorbent for the simultaneous removal of cadmium ions and malachite green: optimization by surface response methodology. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015; 21: 760-67.
- [9] AL-Othman ZA, Ali R, Naushad Mu. Hexavalent chromium removal from aqueous medium by activated carbon prepared from peanut shell: Adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. Chemical Engineering Journal. 2012; 184: 238-47.
- [10] Al-Rahbi AS, Williams PT. Production of activated carbons from waste tyres for low temperature NO_x control. Waste Management. 2016; 49: 188-95.
- [11] Kabulov AT, Nechipurenko SV, Sailaukhanuly Y, Mastai Y, Yefremov SA, Nauryzbayev MK. Preparation and characterization of activated carbons prepared from wood waste and their application for gas separation. International Journal of Chemical Science. 2015; 13(2): 747-58.
- [12] Silva TL, Ronix A, Pezoti O, Souza LS, Leandro PKT, Bedin KC, et al. Mesoporous activated carbon from industrial laundry sewage sludge:

- Adsorption studies of reactive dye Remazol Brilliant Blue R. Chemical Engineering Journal. 2016; 303: 467-76.
- [13] Boualem T, Debab A, Yuso AM, Izquierdo MT. Activated carbons obtained from sewage sludge by chemical activation: Gas-phase environmental applications. Journal of Environmental Management. 2014; 40: 145-51.
- [14] Lacerda VS, Lopez-Sotelo JB, Correa-Guimaraes A, Hernandez-Navarro S, Sanchez-Bascones M, Navas-Gracia LM, et al. Rhodamine B removal with activated carbons obtained from lignocellulosic waste. Journal of Environmental Management. 2015; 155: 67-76.
- [15] Shamsuddin MS, Yusoff NRN, Sulaiman MA. Synthesis and characterization of activated carbon produced from kenaf core fiber using H_3PO_4 activation. Procedia Chemistry. 2016; 19: 558-65.
- [16] Rai MK, Shahi G, Meena R, Chakraborty S, Singth RS, Rai BN. Removal of hexavalent chromium Cr (VI) using activated carbon prepared from mango kernel activated with H_3PO_4 . Resource-Efficient Technology. 2016; 2: S63-S70.
- [17] Huang Y, Li S, Lin H, Chen J. Fabrication and characterization of mesoporous activated carbon from *Lemna minor* using one-step H_3PO_4 activation for Pb(II) removal. Applied Surface Science. 2014; 317: 422-431.