ลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรของทุเรียน

Physicochemical Characteristics of Activated Carbon Produced from Durian Agricultural Waste Materials

ชนากานต์ ลักษณะ[1] และอรสุรางค์ โสภิพันธ์[1*]

Chanakan Laksana[1] and Onsulang Sophiphun[1*]

Received: June 6, 2025
Revised: July 3, 2025
Accepted: July 3, 2025

Abstract: Activated carbon is a highly porous material widely used as adsorbent. This research aimed to prepare and investigate the physicochemical characteristics of activated carbon from durian wastes, including young durian fruit, durian seeds, and pruned durian branches. The materials were first subjected to carbonization at 525 °C for 30 minutes under limited oxygen conditions to obtain biochar. The biochar was then activated by using 70% phosphoric acid (H_3PO_4) and subsequently pyrolyzed at 550 °C for 60 minutes to enhance porosity and produce activated carbon. Among the three raw materials, durian branches yielded the highest amounts of biochar (42.57 ± 0.66%) and activated carbon (13.07 ± 0.35%). Physical properties of the activated carbon were analyzed by several techniques. All materials had moisture contents below 8%, in accordance with TIS 900-2547 standards, ash content ranging from 2.31 to 11.77%, and bulk density values between 0.321 and 0.571 g/cm^3. Based on the nitrogen adsorption–desorption isotherm analysis, the three types of activated carbon exhibited specific surface areas ranging from 456 to 621 m^2/g and pore volumes ranging from 0.3341 to 0.3665 cm^3/g. The activated carbon derived from young durian demonstrated the highest surface area and pore volume, with an iodine adsorption value of 912 mg/g. Scanning electron microscopy (SEM) images of all three activated carbon samples revealed a degraded and porous structure, resulting from chemical activation with phosphoric acid in combination with thermal treatment, which contributed to pore formation in the material.

Keywords: Activated charcoal, Biochar, Durian seed and pruned durian brunch, Young durian fruit

บทคัดย่อ: ถ่านกัมมันต์จัดเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเป็นวัสดุดูดซับ งานวิจัยนี้มุ่งเตรียมและศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์จากเศษเหลือทิ้งของทุเรียน ได้แก่ ผลอ่อนทุเรียน เมล็ดทุเรียน และกิ่งที่ได้จากการตัดแต่งต้นทุเรียน โดยนำเศษเหลือทิ้งของทุเรียนมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ในสภาวะจำกัดออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอชาร์ จากนั้นนำไบโอชาร์จากเศษเหลือทิ้งของทุเรียนมากระตุ้นให้มีรูพรุนสูงขึ้นด้วยวิธีทางเคมีและความร้อนเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ โดยมีสารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร เป็นสารกระตุ้นจากนั้นทำการ

[1]คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว จ.สระแก้ว 27160

[1]Faculty of Agricultural Technology, Burapha University, Sakaew Campus, Sakaew 27160

*Corresponding author: onsuland@buu.ac.th

ไพโรไลซ์ไบโอชาร์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที พบว่า การใช้กิ่งทุเรียนเป็นวัตถุดิบตั้งต้นได้ผลผลิตไบโอชาร์ (42.57±0.66 เปอร์เซ็นต์) และถ่านกัมมันต์ (13.07±0.35 เปอร์เซ็นต์) สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลอ่อนทุเรียนและเมล็ดทุเรียน จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยเทคนิคต่าง ๆ พบว่า ถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดมีความชื้นน้อยกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน มอก.900-2547 มีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 2.31-11.77เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วง 0.321-0.571 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวหน้าและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับ-คายซับไนโตรเจน (Nitrogen adsorption–desorption isotherm) พบว่า ถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดมีพื้นที่ผิวหน้าอยู่ในช่วง 456-621 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนอยู่ในช่วง 0.3341-0.3665 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม โดยถ่านกัมมันต์จากผลทุเรียนอ่อนมีพื้นที่ผิวหน้าและปริมาตรรูพรุนสูงสุด และมีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 912 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด พบโครงสร้างที่ผุพังเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกร่วมกับความร้อนซึ่งก่อให้เกิดรูพรุนในวัสดุ

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์, ไบโอชาร์, เมล็ดทุเรียนและกิ่งทุเรียน, ผลอ่อนทุเรียน

คำนำ

ทุเรียนเป็นผลไม้เศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่นิยมปลูกมากในพื้นที่ภาคตะวันออกของประเทศไทย ในแต่ละรอบการผลิตเกษตรกรจะต้องตัดแต่งกิ่งเพื่อรองรับการออกดอกของต้นทุเรียน ลดความเสี่ยงจากโรคและแมลงศัตรูพืช เมื่อทุเรียนเกิดการติดผล ผลทุเรียนอ่อนสามารถร่วงหล่นจากต้นเป็นจำนวนมากเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความไม่สมบูรณ์ของทุเรียน สภาพลมฟ้าอากาศ พายุ รวมกระทั้งการคัดทิ้งให้เหลือเฉพาะผลที่สมบูรณ์โดยเกษตรกร ดังนั้นกิ่งที่ได้จากการตัดแต่งต้นทุเรียน และผลทุเทียนอ่อนจัดเป็นเศษเหลือทิ้งจากกระบวนการปลูกต้นทุเรียน สำหรับกระบวนการแปรรูปทุเรียน พบว่า มีเปลือกและเมล็ดทุเรียนเป็นเศษเหลือทิ้งจำนวนมหาศาล โดยคิดเป็นเปลือกทุเรียน และเมล็ดทุเรียนเหลือทิ้งกว่า 55-66 เปอร์เซนต์ และ 5-15 เปอร์เซนต์ ของผลทุเรียนตามลำดับ (Gamay *et al*., 2024) ซึ่งทั่วไปแล้วเศษเหลือทิ้งจากทุเรียนที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกทิ้งทับถมเป็นมลพิษทางสิ่งแวดล้อม มีเพียงเกษตรกรส่วนน้อยนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยหมักซึ่งมีมูลค่าไม่สูงนัก จากการทบทวนวรรณกรรมต่าง ๆ พบว่า มีการนำเศษเหลือทิ้งจากทุเรียนไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ (บุษรา และยุทธนา, 2565) ผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ (นิติพล และคณะ, 2564) ไบโอชาร์ และถ่านกัมมันต์ (Gęca *et al*., 2022) ถ่านกัมมันต์จัดเป็นวัสดุที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวหน้าสูง สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุดูดซับสารอินทรีย์ ตัวดูดซับสารพิษในอุตสาหกรรมยา ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเสริมแรงในคอนกรีตและโพลีเมอร์ โดยถ่านกัมมันต์สามารถผลิตผ่าน 2 กระบวนการดังนี้ 1) กระบวนการคาร์บอไนเซชัน โดยเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในชีวมวลภายใต้บรรยากาศที่จำกัดออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอชาร์ และ 2) กระบวนการก่อกระตุ้นเป็นขั้นตอนทำให้เกิดรูพรุนในวัสดุ ซึ่งประกอบด้วยการกระตุ้นด้วยกระบวนการทางกายภาพและกระบวนการเคมี โดยการกระตุ้นทางเคมีจะใช้สารเคมีร่วมกับความร้อน ซึ่งใช้ความร้อนน้อยกว่าการกระตุ้นทางกายภาพเพียงอย่างเดียว (Heidarinejad *et al*., 2020)

Mokhtar *et al*. (2012) ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดทุเรียนโดยกระตุ้นด้วยสารละลายเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และศึกษาผลของความเข้มข้นของ KOH อุณหภูมิและระยะเวลาในการคาร์บอไนเซชัน ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์จากเศษเหลือทิ้งทุเรียนให้ผลผลิตสูงสุดเมื่อกระตุ้นด้วย KOH 0.6 M และอุณหภูมิในการคาร์บอไนที่ 400 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง โดยสามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดทุเรียนและเปลือกทุเรียนคิดเป็น

55.37 และ 52.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากเมล็ดทุเรียนมีองค์ประกอบของคาร์บอนมากกว่าเปลือกทุเรียน ขณะที่งานวิจัยของ Limsuwan *et al.* (2025) ได้เปรียบเทียบการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดทุเรียนและเปลือกทุเรียนเหลือทิ้ง โดยกระตุ้นวัตถุดิบด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) จากนั้นเผาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 600องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง พบว่า สามารถผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดทุเรียนและเปลือกทุเรียนได้เท่ากับ 18 และ 23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยพื้นที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดทุเรียนและเปลือกทุเรียนมีค่าเท่ากับ 2,054 และ 964 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอล พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดทุเรียนมีค่าสูงกว่าเปลือกทุเรียน เนื่องจากปริมาณพื้นที่ผิวหน้าที่สูงกว่า จะเห็นได้ว่าการผลิตถ่านกัมมันต์จากส่วนต่าง ๆ ของเศษเหลือทิ้งจากทุเรียน และชนิดสารก่อกระตุ้นให้ผลผลิตถ่านกัมมันต์และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน โดยสารละลายกรด H_3PO_4 ถูกนำมาใช้เป็นสารก่อกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชีวมวลต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และให้ผลผลิตถ่านกัมมันต์ที่สูงอยู่ในช่วง 26.1-85 เปอร์เซนต์ ทั้งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีพื้นที่ผิวหน้าอยู่ในช่วง 456.1-2806 ตารางเมตรต่อกรัม (Neme *et al.*, 2020) เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษเหลือทิ้งจากทุเรียน งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากผลอ่อนทุเรียน เมล็ดทุเรียน และกิ่งที่ได้จากการตัดแต่งต้นทุเรียน โดยจะใช้สารละลายกรด H_3PO_4 ในการก่อกระตุ้นกัมมันต์ร่วมกับความร้อน จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเศษเหลือทิ้งของทุเรียนส่วนต่าง ๆ ซึ่งการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งจากทุเรียนทั้ง 3 ชนิดนี้ยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่ทำการศึกษาอย่างแพร่หลายเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษเหลือทิ้งของทุเรียน

ผลอ่อนทุเรียน เมล็ดทุเรียน และกิ่งที่ได้จากการตัดแต่งต้นทุเรียนนำมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยล้างทำความสะอาดวัตถุดิบแต่ละชนิดด้วยน้ำประปา จากนั้นตัดแต่งให้มีขนาดเล็กลง อบให้แห้งสนิทที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำวัตถุดิบแต่ละชนิดไปคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส นาน 30 นาทีด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในสภาวะจำกัดออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอชาร์ แล้วบดไบโอชาร์ให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องปั่นอัตโนมัติ จากนั้นนำไบโอชาร์แต่ละชนิดไปก่อกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี โดยผสมไบโอชาร์ 25 g กับสารละลาย 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร H_3PO_4 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไป reflux นาน 4 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำมากรองแบบสุญญากาศของแข็งที่ได้นำไปอบต่อที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการไพโรไลซ์ของแข็งที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อสิ้นสุดกระบวนการไพโรไลซีสนำของแข็งที่ได้ไปล้างด้วยน้ำร้อนจน pH เป็นกลาง จากนั้นอบให้แห้งสนิทที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายคือถ่านกัมมันต์จากผลอ่อนทุเรียน เมล็ดทุเรียน และกิ่งทุเรียน โดยเปอร์เซ็นต์ของผลผลิตไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอชาร์} = \frac{\text{(น้ำหนักไบโอชาร์ที่ได้ (กรัม) x 100)}}{\text{น้ำหนักแห้งเศษเหลือจากทุเรียน (กรัม)}}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านกัมมันต์} = \frac{\text{(น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ได้ (กรัม) x 100)}}{\text{น้ำหนักไบโอชาร์ที่ก่อกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (กรัม)}}$$

2. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐาน AOAC (1990)

อบถ้วยกระเบื้อง (crucible) เปล่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก

ทศนิยม 4 ตำแหน่ง จากนั้นชั่งถ่านกัมมันต์แล้วใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง ชั่งและบันทึกน้ำหนักรวมไว้ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาปล่อยให้เย็นใน desiccator แล้วนำไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยเปอร์เซ็นต์ของความชื้นของถ่านกัมมันต์คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์ก่อนอบ – หลังอบ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์ก่อนอบ (กรัม)}} \times 100$$

3. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐาน AOAC (1990)

เผาถ้วยกระเบื้องเปล่าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จึงปล่อยให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง จากนั้นชั่งถ่านกัมมันต์แล้วใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาปล่อยให้เย็นใน desiccator แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยเปอร์เซ็นต์ของของเถ้าของถ่านกัมมันต์คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์เถ้า} = (\text{น้ำหนักเถ้าที่เหลือ (กรัม)} \times 100)/\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์ก่อนเผา (กรัม)}$$

4. การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากเศษเหลือทิ้งทุเรียนตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 (1999)

ค่าการดูดซับไอโอดีน หรือ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ บ่งบอกความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ชั่งตัวอย่างถ่านกัมมันต์ 1.5000 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) จากนั้นเติม 5 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร HCl 10 มิลลิลิตร ปิดปากขวดเขย่าให้เข้ากัน แล้วปิเปตสารละลายมาตรฐานไอโอดีน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่เขย่า 30 นาที จากนั้นกรองเอาถ่านกัมมันต์ออก ปิเปตสารละลายที่กรองได้ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน $Na_2S_2O_3$ จนสารละลายมีสีเหลืองอ่อนจากนั้นเติมน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด ได้สารละลายสีน้ำเงิน แล้วไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินของสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

5. การวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของถ่านกัมมันต์จากเศษเหลือทิ้งทุเรียน

วิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของถ่านกัมมันต์มาตรฐาน ASTM D2854-09 (2011) โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการอบให้แห้งและคัดขนาดโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 จากนั้นบรรจุถ่านกัมมันต์ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50.0 มิลลิลิตร เขย่าเพื่อให้ถ่านกัมมันต์รวมตัวแน่นในภาชนะที่บรรจุให้ครบปริมาตร นำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่บรรจุในขวดปรับปริมาตร (กรัม)}}{\text{ปริมาตรขวดปรับปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$

6. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคต่างๆ

วิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค N_2 adsorption-desorption โดยใช้เครื่อง gas sorption analyzer ยี่ห้อ Quantachrome Instruments ของบริษัท Anton Paar QuantaTec Inc. รุ่น QuadraSorb SI ให้ความร้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นและสิ่งปนเปื้อนบนวัสดุ จากนั้นทำการดูดซับแก๊ส N_2 ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส โดยวัดปริมาณแก๊ส N_2 ถูกดูดซับและความดันย่อยที่เปลี่ยนแปลงไป พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ (S_{BET}) คำนวณจากสมการของ

บรูนัวร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Vt) สามารถหาได้จากปริมาณการดูดซับไนโตรเจนที่ความดันสัมพัทธ์ P/Po = 0.9893 สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนในตัวอย่างทำด้วยเครื่อง CHN analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น LECO 628 Series ของบริษัท LECO corporation และลักษณะอสัณฐานของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้บันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิชชั่น ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7610F Plus ด้วย accelerating voltage ที่ 15.00 kV โดยเคลือบตัวอย่างด้วยชั้นบาง ๆ ของโลหะแพททินัม ด้วยเครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยโลหะนำไฟฟ้า ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEC 3000 FC ภายใต้บรรยากาศของอาร์กอน

7. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์จากเศษเหลือทิ้งของทุเรียนส่วนต่าง ๆ ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม R ด้วยวิธี ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($P<0.05$)

ผลการทดลองและวิจารณ์

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเศษเหลือทิ้งของทุเรียนส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ผลอ่อนทุเรียน เมล็ดทุเรียน และกิ่งทุเรียน เริ่มจากการนำเศษเหลือทิ้งมาผ่านกระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียส/นาที ในสภาวะจำกัดออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านไบโอชาร์ โดยเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไบโอชาร์ (Table 1) พบว่า ผลผลิตไบโอชาร์มีค่าเรียงจากมากไปหาน้อยเมื่อใช้วัตถุดิบเป็นกิ่งทุเรียน (42.57±0.66 เปอร์เซนต์) > ผลอ่อนทุเรียน (36.84±0.42 เปอร์เซ็นต์) > เมล็ดทุเรียน (29.47±0.91 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ ความแตกต่างของผลผลิตไบโอชาร์จากเศษเหลือทิ้งทุเรียนเนื่องมาจากความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีและความชื้นของวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งกิ่งทุเรียนจะมีองค์ประกอบของลิกนินสูง ในขณะที่ผลทุเรียนอ่อน และเมล็ดทุเรียนจะประกอบไปด้วยแป้ง และเนื้อเยื่ออ่อน (Srianta *et al.*, 2024) กล่าวได้ว่ากิ่งทุเรียนเหมาะสำหรับผลิตไบโอชาร์ จากนั้นนำไบโอชาร์จากวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ได้มาก่อกระตุ้นให้มีรูพรุนเพิ่มขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมีและความร้อน ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นถ่านกัมมันต์ จากงานวิจัยของ Neme *et al.* (2022) ได้อธิบายกลไกการกระตุ้นไบโอชาร์ด้วยสารละลายกรด H_3PO_4 ไว้ดังสมการต่อไปนี้

$$2H_3PO_4 \rightarrow H_4P_2O_7 + H_2O \quad .....(1)$$

$$3H_3PO_4 \rightarrow H_5P_3O_7 + 2H_2O \quad .....(2)$$

$$nH_3PO_4 \rightarrow H_{n+2}PnO_{3n+1} + (n-1)H_2O \quad .....(3)$$

$$H_{n+2}PnO_{3n+1} \rightarrow P_4O_{10} + H2O \quad .....(4)$$

$$P_4O_{10} + 2C \rightarrow P_4O_6 + 2CO_2 \quad .....(5)$$

โดยเมื่อนำไบโอชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H3PO4 มาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 400-700 องศาเซลเซียส เกิดการ dehydration ของ H_3PO_4 กลายเป็นสารออกซิไดซ์ P_4O_{10} ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในโครงสร้างของไบโอชาร์และปลดปล่อยแก๊ส CO_2 ออกมาก่อให้เกิดรูพรุนในถ่านกัมมันต์นั่นเอง จากงานวิจัยนี้พบว่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตถ่านกัมมันต์เรียงจากมากไปหาน้อยเมื่อใช้วัตถุดิบเป็น ดังนี้ กิ่งทุเรียน (13.07±0.35 เปอร์เซ็นต์) > เมล็ดทุเรียน (7.26±0.47 เปอร์เซนต์) > ผลอ่อนทุเรียน (4.67±0.05 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ กล่าวได้ว่าโครงสร้างของคาร์บอนในไบโอชาร์จากเศษเหลือทิ้งทุเรียนแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยที่โครงสร้างคาร์บอนที่ง่ายต่อการทำปฏิกิริยากับ H_3PO_4 คือ ผลอ่อนทุเรียน เมล็ดทุเรียน กิ่งทุเรียน ตามลำดับ ในแง่ของเปอร์เซ็นต์ผลผลิตอาจกล่าวได้ว่า กิ่งทุเรียนมีความเหมาะสมในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อบ่งชี้คุณภาพของถ่านกัมมันต์จากเศษเหลือทิ้งของทุเรียน คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีมาตรฐาน AOAC Z (1990) พบว่า ความชื้นเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เรียงจากน้อยไปหามากได้ดังนี้ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากผลอ่อนทุเรียน (2.58±0.24 เปอร์เซ็นต์) < กิ่งทุเรียน (5.72±0.36 เปอร์เซ็นต์) < เมล็ดทุเรียน (6.20±0.08 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ ซึ่งมีความชื้นน้อยกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน มอก.900-2547 ที่กำหนดไว้

จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (1990) พบว่า ปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดทุเรียน (2.31 ± 0.53 เปอร์เซ็นต์) < ผลทุเรียนอ่อน (7.66 ± 0.65 เปอร์เซ็นต์) < กิ่งทุเรียน (11.77 ± 0.98 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณเถ้าต่ำจะถือว่ามีคุณสมบัติที่ดี เนื่องจากเถ้าสูงอาจลดประสิทธิภาพของพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ (Maulina and Anwari, 2019) โดยองค์ประกอบของเถ้าส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกอน สารประกอบซัลเฟตและคาร์บอนเนตของโลหะต่าง ๆ ได้แก่ Fe, Al, Co, Na, P, Mg เป็นต้น (วัลยา, 2554 และวิภาวรรณ, 2565) จะเห็นได้ว่าปริมาณเถ้าขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบชีวมวล ซึ่งมีความแตกต่างกันด้านการสะสมแร่ธาตุ

Table 1 Yield percentages of biochar and activated carbon, moisture and ash contents of activated carbon produced from different durian waste components.

Components	Biochar yield (%)	Activated carbon yield (%)	Moisture of activated carbon (%)	Ash of activated carbon (%)
young durian fruit	36.84±0.42[b]	4.67±0.05[c]	2.58±0.24[b]	7.66±0.65[b]
durian seeds	29.47±0.91[c]	7.26±0.47[b]	6.20±0.08[a]	2.31±0.53[c]
pruned durian branches	42.57±0.66[a]	13.07±0.35[a]	5.72±0.36[a]	11.77±0.98[a]

Values in the same column followed by different letters indicate statistically significant differences at $p < 0.05$ as determined by Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบคาร์บอน ไนโตรเจน และไฮโดรเจนของไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง CHN analyzer (Table 2)พบว่า ปริมาณคาร์บอนในไบโอชาร์จากกิ่งทุเรียน (55.17 เปอร์เซ็นต์) > ผลอ่อนทุเรียน (53.48 เปอร์เซ็นต์) > เมล็ดทุเรียน (47.48 เปอร์เซ็นต์) และเมื่อนำไบโอชาร์ทั้งหมดที่เตรียมได้ไปกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับความร้อนพบว่า ปริมาณคาร์บอนในถ่านกัมมันต์จากกิ่งทุเรียน (59.07 เปอร์เซ็นต์) > ผลอ่อนทุเรียน (59.85 เปอร์เซ็นต์) > เมล็ดทุเรียน (55.13 เปอร์เซ็นต์) การเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนหลังการกระตุ้นแสดงให้เห็นว่า กระบวนการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับความร้อนสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของคาร์บอน โดยการปลดปล่อยสารประกอบที่ระเหยได้และความชื้นจากถ่านไบโอชาร์ส่งผลได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติดีขึ้น (Jantaboot *et al.*, 2023)

Table 2 Chemical contents of biochar and activated carbon from different durian waste components.

Components	Chemical contents of biochar (%)			Chemical contents of activated carbon (%)		
	C	N	H	C	N	H
young durian fruit	53.48±0.24	1.56±0.06	3.14±0.16	59.85±0.12	5.71±0.01	1.85±0.05
durian seeds	47.48±0.55	1.22±0.01	2.93±0.09	55.13±0.01	8.42±0.04	nd
pruned durian branches	55.17±0.15	1.18±0.08	2.67±0.14	59.07±0.01	7.40±0.03	0.38±0.01

%C, %N and %H by CHN analyzer

จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค N_2 adsorption-desorption (Table 3) โดยพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุคำนวณจากสมการ BET พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังนี้ ถ่านกัมมันต์จากผลอ่อนทุเรียน (621 ตารางเมตรต่อกรัม) > ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดทุเรียน (608 ตารางเมตรต่อกรัม) > ถ่านกัมมันต์จากกิ่งทุเรียน (456 ตารางเมตรต่อกรัม) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นรวมของวัสดุ (bulk density) กล่าวคือ วัสดุที่มีความหนาแน่นรวมต่ำจะมีพื้นที่ผิวหน้าและความพรุนสูงเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Kayiwa *et al.* (2021) โดยความหนาแน่นรวมของผลอ่อนทุเรียน (0.321 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) < เมล็ดทุเรียน (0.470 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) < กิ่งทุเรียน (0.571 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ตามลำดับ จากมาตรฐาน ASTM D2854-70 ความหนาแน่นรวมของผงถ่านกัมมันต์ควรอยู่ในช่วงระหว่าง 0.25-0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับต่อไป จากนั้นวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้ง 3 ชนิดตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากผลอ่อนทุเรียน (912 มิลลิกรัมต่อกรัม) > ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดทุเรียน (867 มิลลิกรัมต่อกรัม) > ถ่านกัมมันต์จากกิ่งทุเรียน (661 มิลลิกรัมต่อกรัม) ตามลำดับ สอดคล้องกับปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุที่คำนวณจากสมการ BET โดยค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จะบ่งชี้ถึงความพรุนที่ผิวหน้าของวัสดุ โดยหากวัสดุมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงแสดงว่ามีความพรุนที่ผิวหน้าของวัสดุในปริมาณที่สูง (Daosukho *et al.*, 2012) โดยโมเลกุลไอโอดีนมีขนาดเล็ก (0.54 นาโนเมตร) สามารถถูกดูดซับในรูพรุนระดับไมโครพอร์ของถ่านกัมมันต์ (Pongsert *et al.*, 2021) ซึ่งถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดเป็นแบบผงมีค่าดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.900-2547 ของถ่านกัมมันต์คุณภาพปานกลาง กล่าวคือมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนในช่วง 400-900 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าพื้นที่ผิวหน้าอยู่ในช่วงระหว่าง 400-850 ตารางเมตรต่อกรัม (Jantaboot *et al.*, 2023) เมื่อพิจารณาในแง่ของคุณภาพอาจกล่าวได้ว่า ผลทุเรียนอ่อนมีความเหมาะสมในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนสูง

Table 3 Physical properties and iodine number of activated carbon from different durian waste components.

Components	SBET[a] (m^2/g)	Vt[b] (cm^3/g)	Bulk density (g/cm^3)	Iodine number (mg/g)
young durian fruit	621	0.3665	0.321±0.002c	912±2.0a
durian seeds	608	0.3341	0.470±0.017b	867±2.0b
pruned durian branches	456	0.3512	0.571±0.002a	661±1.5c

[a]Total surface area (SBET) by BET method

[b]Total pore volume (Vt) by BJH method

Values in the same column followed by different letters indicate statistically significant differences at $p < 0.05$ as determined by Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

ลักษณะอสัณฐานของถ่านกัมมันต์จากเศษเหลือทิ้งทุเรียนสามารถศึกษาได้จากภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิชชั่นแสดง (Figure 1) โดยจะแสดงภาพถ่ายของถ่านไบโอชาร์และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก ผลอ่อนทุเรียน (1-2) เมล็ดทุเรียน (3-4) และกิ่งทุเรียน (5-6) ตามลำดับที่กำลังขยาย 1000 เท่า จะเห็นได้ว่าไบโอชาร์ที่เตรียมได้จากเศษทุเรียนเหลือทิ้งจะแสดงโครงสร้างที่มีรูพรุน รอยแตกหัก อันเนื่องมาจากการสลายตัวของอินทรียสารในวัสดุกลายเป็นแก๊สเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงผ่านกระบวน

การคาร์บอไนเซชัน (Figure 1-1),1-3) และ1- 5) และเมื่อนำไบโอชาร์ไปกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับความร้อนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นถ่านกัมมันต์จะสังเกตเห็นได้ว่าพบการพังทลายของพื้นผิววัสดุเพิ่มมากยิ่งขึ้น (Figure 1-2), 1-4) และ1- 6)

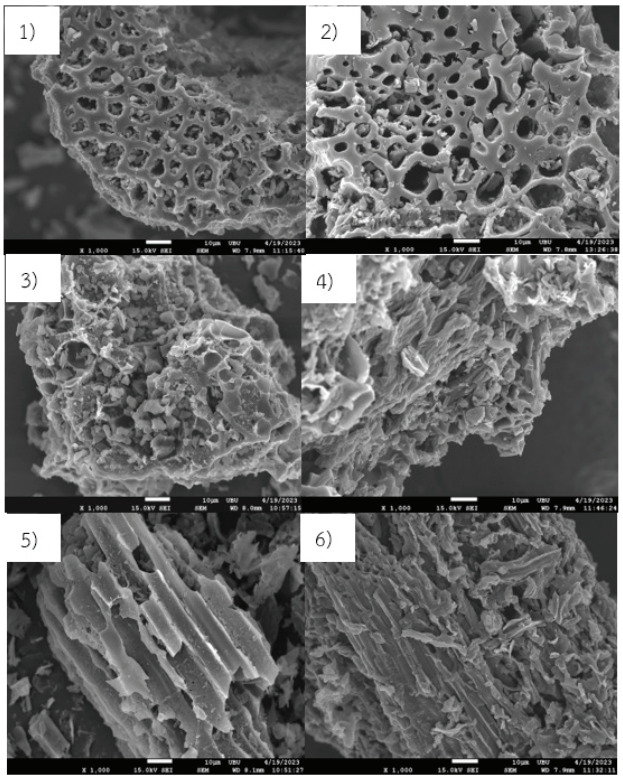


Figure 1 SEM micrographs (magnification of 1000x) of of biochar and activated carbon from different durian waste components 1) and 2) young durian fruit 3) and 4) durian seeds 5) and 6) pruned durian branches.

สรุป

ผลอ่อนทุเรียน กิ่งทุเรียน และเมล็ดทุเรียนเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากแปลงทุเรียนและกระบวนการแปรรูป ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนสูง โดยคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุตั้งต้น จากการศึกษาสรุปได้ว่า ผงถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัสดุทั้ง 3 ชนิด มีความชื้นน้อยกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน มอก.900-2547 มีปริมาณเถ้าต่ำ ความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วงระหว่าง 0.321-0.571 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีพื้นที่ผิวหน้าตั้งแต่ 456-621 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.900-2547 ของถ่านกัมมันต์คุณภาพปานกลางชนิดผง โดยถ่านกัมมันต์จากผลอ่อนทุเรียนมีคุณสมบัติที่โดดเด่น กล่าวคือ มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูงสุด เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ หรือตัวตรึงปุ๋ยเคมีเพื่อชะลอการปลดปล่อยทางการเกษตร ทั้งยังจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากแปลงทุเรียนที่สามารถหาได้ง่าย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา “งบประมาณเงินอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 เลขที่สัญญา วน 13.9/2566 และคณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว

เอกสารอ้างอิง

นิติพล พลสา, กมล ฉวีวรรณ, กันตา แสงวิจิตร, สุกัญญา สืบแสน และสมบูรณ์ อนันตลาโภชัย. 2564. ผลของการใช้เปลือกทุเรียนหมักจุลินทรีย์ที่ถูกปรับปรุงพันธุกรรมในอาหารต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและคุณภาพซากในสุกรระยะรุ่น-ขุน. แก่นเกษตร 49(6):1609-1617.

วิภาวรรณ ท้ายเมือง, จิรวัฒน์ บุญจันทร์ และ ษมาภร สิงหพันธุ์. 2565. ธาตุอาหารใน ใบ เนื้อและเปลือกทุเรียนหมอนทองที่ปลูกในชุดดินคลองซาก. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตรและการจัดการ 5(1): 82-90.

วัลยา วิศาลบรรณวิทย์. 2540. ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนและเปลือก มังคุดเพื่อใช้ กำจัดสีในโมลาส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. 132 หน้า.

บุษรา บรรจงการ และยุทธนา พรรคอนันต์. 2565. การศึกษาแนวคิดต่อผลิตภัณฑ์จากเปลือกทุเรียนและการวิจัยตลาดของผลิตภัณฑ์ใหม่จากเปลือกทุเรียน. วารสารรำไพพรรณี 16(1): 66-78.

AOAC. 1990. Official Methods of Analysis, 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.

ASTM D4607-94. 1999. Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D2854-09. 2011. "Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Gamay, R.A.J. P.N. Botecario, P.D.C. Sanchez and M.C. Alvarado. 2024. Durian (Durio zibethinus) waste: a promising resource for food and diverse applications: a comprehensive review. Food Production, Processing and Nutrition 6: 27, doi: 10.1186/s43014-023-00206-4.

Gęca, M. K., M. Wiśniewska and P. Nowicki. 2022. Biochars and activated carbons as adsorbents of inorganic and organic compounds from multicomponent systems: A review. Advances in Colloid and Interface Science 305. doi: 10.1016/j.cis.2022.102687.

Daosukho, S., A. Kongkeaw and U. Oengeaw. 2012. The development of durian shell biochar as a nutrition enrichment medium for agricultural purpose: Part I. chemical and physical characterization. Bulletin of Applied Sciences 1(1): 133-141.

Heidarinejad, Z., M.H. Dehghani, M. Heidari, J. Gholamali, A. Imran and S. Mika. 2020. Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. Environmental Chemistry Letters 18, doi: 10.1007/s10311-019-00955-0.

Jantaboot, A., A. Bunkham and P. Aggarangsi. 2023. Production of activated carbon from corncob by combined phosphoric acid and carbon dioxide activation. Thai Science and Technology Journal 31(5): 94-107.

Kayiwa, R., H. Kasedde, M. Lubwama and J.B. Kirabira. 2021. Mesoporous activated carbon yielded from pre-leached cassava peels. Bioresources and Bioprocessing 8, doi: 10.1186/s40 643- 021-00407-0.

Limsuwan, P., J. Pongpai, D. Yiamsawas, W. Tanthapanichakoon, K. Maneeintr, J. Trakulmututa, A. Srikhaow, S.M. Smith, K. Sasaki and C. Chuaicham. 2025.

Harnessing durian seed and shell waste-derived activated carbon for effective aqueous phenol removal. Adsorption 31, doi: 10.1007/s10450-025-00606-7.

Maulina, E. and F. Anwari. 2019. Characteristics of activated carbon produced from coconut shell by physical activation method. Journal of the Korean Wood Science and Technology 47(4): 503–512.

Mokhtar, M.F., E.H.A. Latib, S. Sufian and K.Z. Ku Shaari. 2012. Preparation of activated carbon from durian shell and seed. Advanced Materials Research 626, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.626.887.

Neme, I., G. Gonfa and C. Masi. 2022. Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review. Heliyon 8, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11940.

Pongsert, S., K. Warawut and A. Pornsawan. 2021. Preparation of activated carbon from durian rind with different activation methods and its optimization. Journal of Renewable Materials 9(2): 311-324.

Srianta, I., S.S. Yuwono, N.A. Febrianto and E.I. Dizon. 2024. Chemical and physical properties of durian (*Durio zibethinus* Murr.) seed and its potential as a food ingredient: A review. Horticulturae 10, doi: 10.3390/horticulturae10040342.