

Received: September 16, 2025; Revised: October 22, 2025; Accepted: March 17, 2026

ผลของการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากถ่านไม้ไผ่

Effect of potassium hydroxide (KOH) activation on the properties of activated carbon derived from bamboo charcoal

จุฑาพล จำปาแถม^{1*} ลำพูน เหลลาราช¹ เพ็ญยศ วงษ์บัวงาม¹ สุรสิงห์ อารยางค์กูร²
และรพีพล อินสุพรรณ³
Jutapol Jumpatam^{1*}, Lumpoon Laorach¹, Peomyot Wongbua-Ngam¹,
Surasing Arayangkun² and Rapeepol Insupan³

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

¹Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University, Surin Province

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

²Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, Surin Province

³โรงเรียนอุดมพัฒนศึกษา สำนักงานเขตพื้นที่มัธยมศึกษา นครพนม จังหวัดนครพนม

³Udompattanasuksa School, The Secondary Educational Service Area Office, Nakhon Phanom Province

*Corresponding Author E-mail Address : jutapol.j@sru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของถ่านไม้ไผ่ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมีของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยใช้ความเข้มข้นของตัวกระตุ้นที่ระดับ 0% 10% และ 40% ถ่านไม้ไผ่ที่ใช้ได้จากการกระบวนการคาร์บอนเซชัน (Carbonization) และผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย แก๊ส คาร์บอนคงตัว ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน และพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของ KOH ที่เพิ่มขึ้นมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของถ่าน โดยค่าคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ค่าความชื้น สารระเหย และปริมาณแก๊สลดลง โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 40% ให้ค่าคาร์บอนคงตัวสูงสุดที่ 68.88% และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 124 m²/g พร้อมค่าการดูดซับไอโอดีน 253 mg/g แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนและสมบัติการดูดซับที่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวกระตุ้น การกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านไม้ไผ่ได้ดี และชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของไม้ไผ่ในฐานะวัตถุดิบชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อมและวัสดุพลังงานต่อไป

คำสำคัญ: ถ่านไม้ไผ่ การกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พื้นที่ผิวจำเพาะ การดูดซับไอโอดีน

Abstract

The objective of this research was the improvement of the properties of bamboo charcoal through physical and chemical activation with potassium hydroxide (KOH). Bamboo charcoal, obtained from a carbonization process, was subsequently activated with KOH at concentrations of 0%, 10%, and 40%. The products were then analyzed for physical properties, including moisture content, volatile matter, ash, fixed carbon, iodine adsorption capacity, and specific surface area using the BET technique. From the results, it was found that the properties of the charcoal were directly influenced by the concentration of KOH. With higher level of KOH, a continuous increase in fixed carbon was observed, while the values for moisture, volatile matter, and ash content were decreased. Specifically, at a concentration of 40%, the highest fixed carbon content of 68.88%, a specific surface area of 124 m²/g, and an iodine adsorption value of 253 mg/g were obtained. This indicates that a more porous structure and improved adsorption properties were developed as the activator concentration was increased. It was shown that the properties of bamboo charcoal can be significantly improved by chemical activation with potassium hydroxide, and the potential of bamboo as a suitable biomass raw material for development into activated carbon for further application in environmental and energy material fields is highlighted.

Keywords: Bamboo charcoal, Physical and chemical activation, Potassium hydroxide, Specific surface area, Iodine adsorption

บทนำ

ปัจจุบัน ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal) เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งที่ใช้ในกระบวนการดูดซับสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายสาขาอย่างกว้างขวาง ได้แก่ การบำบัดน้ำเสีย การฟอกอากาศ อุตสาหกรรมอาหาร ตลอดจนการผลิตแบตเตอรี่พลังงานสูง (Heidarinejad, 2020) เนื่องจากสมบัติทางโครงสร้างที่มีความพรุนสูงและพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับมลพิษอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มักเป็นถ่านหินและกะลามะพร้าว ซึ่งมีต้นทุนการผลิตสูงและอาจก่อให้เกิดข้อกังวลด้านสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ จึงมีความสนใจเพิ่มขึ้นในการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์จากแหล่งชีวมวลที่ยั่งยืนมากกว่า เช่น ไม้ ซึ่งเป็นพืชที่เจริญเติบโตเร็ว มีปริมาณคาร์บอนสูง ทำให้มีศักยภาพต่อการสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงได้ (Zhang et al., 2022)

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลสามารถทำได้หลายกระบวนการ โดยทั่วไปจำแนกออกเป็น การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation), การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) และ การกระตุ้นแบบผสมผสาน (Hybrid activation) โดยแต่ละวิธีปรับเปลี่ยนสมบัติของถ่านกัมมันต์ในลักษณะที่แตกต่างกัน ในการกระตุ้นทางกายภาพ จะใช้ก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้เกิดรูพรุน (Heidarinejad, 2020) ในขณะที่การกระตุ้นทางเคมีอาศัยตัวกระตุ้น เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) หรือกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) (Ngernyen & Kamwilaisak 2013; Youme, 2015; Phothitontimongkol, 2017; Heidarinejad, 2020) เพื่อส่งเสริมการก่อตัวของรูพรุนและเพิ่มพื้นที่ผิว ส่วนวิธีแบบผสมผสานเป็นการรวมข้อดีของทั้งสองแนวทาง เช่น การใช้ตัวกลางของก๊าซร่วมกับสารกระตุ้นเคมี เพื่อยกระดับสมรรถนะการดูดซับและปรับแต่งโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุให้จำเพาะต่อการใช้งาน (Zhao et al., 2021) KOH ถือเป็นตัวกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถเพิ่มผลผลิตถ่านกัมมันต์ได้โดยการยับยั้งการเกิดน้ำมันดินและเถ้า พร้อมทั้งกระตุ้นการเกิดรูพรุนระดับรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) และรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น (Wang et al., 2017; Heidarinejad et al., 2020; Ipeh & Hanim, 2020; Zhang et al., 2022) อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย KOH มักให้ผลผลิตสูงและมีการกระจายตัวของรูพรุนที่เล็ก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมอย่างยิ่งต่อการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ จากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็น

ว่า ชนิดและความเข้มข้นของตัวกระตุ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมบัติของถ่านกัมมันต์ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ (วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller (BET)) การกระจายขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนรวม (วิเคราะห์ด้วยไอโซเทอมก๊าซ) และความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Qin et al., 2014; Kibona et al., 2020) นอกจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านแล้ว เมื่อพิจารณาวัสดุชีวมวลที่สามารถนำมาใช้ผลิตถ่านได้ พบว่าไม้ไผ่เป็นวัสดุชีวมวลที่น่าสนใจ ซึ่งนอกจากจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงแล้ว ไม้ไผ่ยังเป็นทรัพยากรท้องถิ่นที่มีความอุดมสมบูรณ์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การนำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จึงไม่เพียงช่วยเพิ่มมูลค่าเศรษฐกิจให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แต่ยังสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาชุมชนอย่างยั่งยืน งานวิจัยสังเคราะห์ล่าสุดยังชี้ให้เห็นว่าปริมาณลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) และเถ้าแร่ธาตุในไม้มีผลต่อการเกิดรูพรุนเมื่อถูกกระตุ้นโดย KOH และพบว่า โครงสร้างรูพรุนที่เกิดขึ้นเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm (Micropore) และรูพรุนขนาดกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 2-50 nm (Mesopore) ซึ่งเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานด้านการดูดซับ (Zhang et al., 2022)

เมื่อพิจารณาถึงบริบทการใช้งาน ถ่านกัมมันต์มีศักยภาพสูงในระบบบำบัดน้ำเสีย การกำจัดโลหะหนัก สารอินทรีย์ระเหยง่าย และสารปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นต่ำ (Micropollutants) เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของรูพรุนและเคมีพื้นผิวให้เหมาะสมกับสารเป้าหมายได้ จากแบบจำลองสมการดูดซับ (เช่น Langmuir, Freundlich) และจลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics) พบว่าการกระตุ้นด้วย KOH เพื่อให้ได้โครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เหมาะกับการดูดซับสารโมเลกุลเล็ก และสามารถปรับปรุงกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนหรือไนโตรเจนบนพื้นผิวเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวเฉพาะทิศทางได้ หรือการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 หรือวิธีผสมผสานเพื่อให้ได้โครงสร้างเมโครพอร์ที่เหมาะสมกับการดูดซับสารโมเลกุลขนาดใหญ่หรือคอลลอยด์ จะเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่ภายในและการเข้าถึงบริเวณดูดซับมากขึ้น ซึ่งปัจจุบันชี้ให้เห็นว่า องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสและเถ้าแร่ธาตุของไม้มีบทบาทสำคัญต่อพัฒนาการของโครงสร้างรูพรุนภายใต้การกระตุ้นทางเคมี ก่อให้เกิดโครงสร้างระดับรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) และรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและสมรรถนะการดูดซับเพิ่มขึ้น (Heidarinejad, 2020; Zhang et al., 2022) ในมิติทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่เป็นแนวทางเชิงนโยบายที่มีความชัดเจน เนื่องจากไม้ไผ่เป็นทรัพยากรหมุนเวียนที่โตเร็ว หาได้ง่ายในท้องถิ่น จึงช่วยลดต้นทุนการขนส่งและการปลดปล่อยคาร์บอนตลอดวัฏจักรชีวิต ในมิติของอุตสาหกรรมชุมชน สามารถสร้างงาน กระจายรายได้และยกระดับเศรษฐกิจฐานรากได้อย่างยั่งยืน กล่าวได้ว่าถ่านประสิทธิภาพสูงจากไม้ไผ่เป็นทางเลือกที่บูรณาการ “สมรรถนะทางวัสดุ” เข้ากับ “ความยั่งยืน” ได้เป็นอย่างดี

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์หลักในการพัฒนาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้ไผ่ชุมชน โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวกระตุ้น KOH ต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า พื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าการดูดซับไอโอดีน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว ผลการศึกษาจะทำให้ทราบถึงสถานะที่ดีที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ให้มีคุณภาพสูง เป็นทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมหลากหลายสาขา พร้อมทั้งเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรชีวมวลในท้องถิ่น

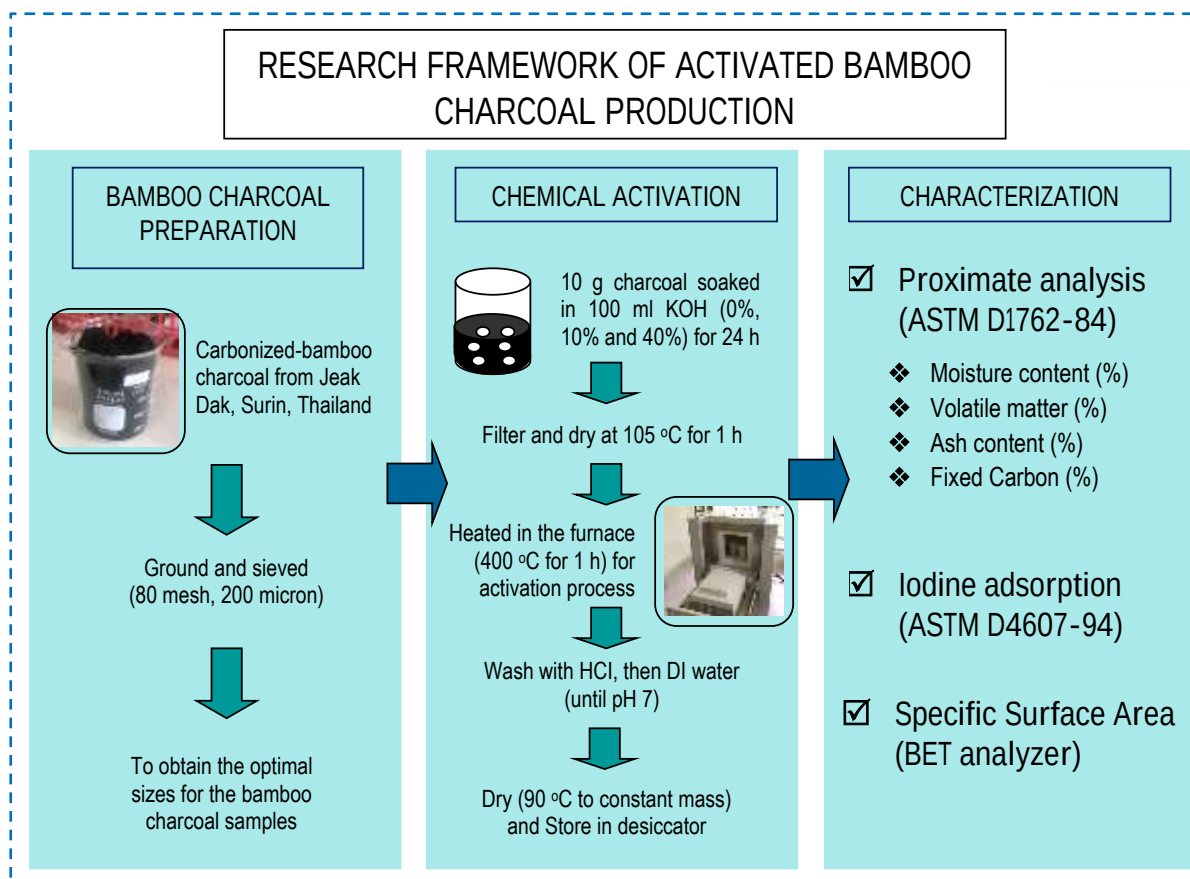


Figure 1 Research framework of activated bamboo charcoal production

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการปรับปรุงสมบัติของถ่านไม้ให้มีสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์มากขึ้น โดยใช้กระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสาร KOH ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบ การกระตุ้นทางเคมี และการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณและสมบัติทางกายภาพของถ่านที่เตรียมได้ ซึ่งสามารถสรุปแผนผังกรอบการวิจัยและกระบวนการการเตรียมถ่านไม้ไผ่ที่กระตุ้นทางเคมีได้ดัง Figure 1 โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอน มีดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ ถ่านไม้ไผ่กิมซุง หรือ ไผ่ตงลิ้มแล้ง ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) แล้ว จากศูนย์เทคโนโลยีและธุรกิจใหม่ชุมชน อำเภอพนมดงรัก จังหวัดสุรินทร์ โดยคัดเลือกจากถ่านที่เผาได้สมบูรณ์ตามเกณฑ์ ได้แก่ มีสีดำทั่วทั้งก้อน ผิวมันและแหลมคมเมื่อหัก จากนั้นจึงนำถ่านไม้ไผ่บดให้ละเอียดเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรง (ขนาด 80 mesh) ให้ได้ขนาดที่ใกล้เคียงกัน (ไม่เกิน 200 μm)

2. การกระตุ้นทางเคมี

นำถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันปริมาณ 10 g แช่ในสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 0% 10% และ 40% w/v ปริมาตร 100 mL (อัตราส่วน KOH:ถ่าน เท่ากับ 0:1 1:1 และ 4:1 ตามลำดับ) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 h จากนั้นนำมารองและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 h นำตัวอย่างถ่านที่ได้ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 h ภายใต้สภาวะในอากาศ (Chandra et al., 2009) ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.1 M แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนถ่านที่เตรียมได้แต่ละเงื่อนไขมีค่า pH เท่ากับ 7 และ

อบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C จนมวลมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณและกายภาพต่อไป

3. การศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ

ถ่านที่ผ่านการกระตุ้นแล้วจะถูกนำไปศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) D1762-84

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (%Moisture)

ในการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ เริ่มต้นด้วยการอุ่นเตาอบให้มีอุณหภูมิ 150°C นำครุชีเบลพร้อมฝาปิดที่สะอาด อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 30 min แล้วนำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 15 min ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_1 (ทำซ้ำจนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งทั้งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 mg) จากนั้นใส่ตัวอย่างถ่านลงในครุชีเบลประมาณ 1 g ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างและบันทึกเป็น W หลังจากนั้นจึงนำครุชีเบลที่บรรจุตัวอย่างแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2-3 h เพื่อระเหยความชื้นออกให้หมด แล้วจึงนำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 20 min และชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อบันทึกเป็นค่าน้ำหนักหลังอบ W_2 จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาณความชื้นเป็นร้อยละ (M) โดยใช้สมการ (Eq.1)

$$M = \frac{(W_1 - W_2)}{W} \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

โดยที่ M คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น, W_1 คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและตัวอย่างก่อนอบ (กรัม), W_2 คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและตัวอย่างหลังอบ (g) และ W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g) ซึ่งค่าที่ได้จะสะท้อนปริมาณความชื้นในตัวอย่างถ่านที่เตรียมได้

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (%Volatile Matter)

เริ่มต้นด้วยการเผาถ่านด้วยกระบี่พร้อมฝาปิดในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 3 h เพื่อให้ถ่านสะอาดปราศจากสารปนเปื้อน จากนั้นนำถ่านที่เผาแล้วไปตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงใส่ถ่านตัวอย่างที่อบไล่ความชื้นแล้วลงในถ่านที่เตรียมไว้ประมาณ 1 g ปิดฝาให้สนิท ก่อนนำไปเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 7 min เมื่อครบกำหนดเวลาให้นำถ่านด้วยกระบี่พร้อมฝาปิดออกจากเตาเผาทันทีและวางไว้ในสภาพบรรยากาศปกติประมาณ 20 min จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นอีกครั้งจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักของสารหลังการเผา หากน้ำหนักยังไม่คงที่ให้นำตัวอย่างกลับไปเผาซ้ำในเงื่อนไขเดิมจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณปริมาณสารระเหยโดยใช้สมการ (Eq.2)

$$V = \frac{(W_1 - W_2)}{W} \times 100 \quad (\text{Eq.2})$$

โดยที่ V คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย, W_1 คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและตัวอย่างก่อนเผา (g), W_2 คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและตัวอย่างหลังเผา (g) และ W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g) ค่านี้สะท้อนถึงปริมาณองค์ประกอบที่ระเหยได้ภายในถ่าน และเป็นดัชนีหนึ่งในการประเมินคุณภาพของถ่าน

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (%Ash)

เริ่มจากการเผาถ่านด้วยกระบี่พร้อมฝาปิดในเตาเผาที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 3 h เพื่อให้ถ่านสะอาดและปราศจากสารตกค้าง จากนั้นนำถ่านออกมาตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนกระทั่งอุณหภูมิของถ่านลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงใส่ถ่านตัวอย่างลงในถ่านที่เตรียมไว้ในปริมาณประมาณ 1 g โดยปิดฝาขณะทำการเผา และนำถ่านที่บรรจุตัวอย่างไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 650°C จนกว่าน้ำหนักของตัวอย่างจะคงที่ ซึ่งแสดงว่าสารอินทรีย์ในถ่านได้สลายตัวหมด เหลือเพียงส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์หรือเถ้า จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่เผาแล้วไปตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องอีกครั้ง แล้วจึงชั่งน้ำหนัก และใช้ค่าดังกล่าวคำนวณปริมาณเถ้าของถ่านตามสมการ (Eq.3)

$$A = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (\text{Eq.3})$$

โดยที่ A คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย, W_1 คือ น้ำหนักของครุชิลพร้อมฝาและตัวอย่างก่อนเผา (g), W_2 คือ น้ำหนักของครุชิลพร้อมฝาและตัวอย่างหลังเผา (g) โดยค่าที่ได้จะสะท้อนถึงปริมาณของสิ่งเจือปนที่ไม่สามารถสลายได้ด้วยความร้อน และเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของถ่านในด้านความบริสุทธิ์

3.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%Fixed carbon)

สำหรับการคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว หาได้จากผลต่างระหว่างปริมาณเท่ากับปริมาณสารระเหยได้ ตามสมการ (Eq.4)

$$\text{ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ร้อยละของถ่าน-ร้อยละของสารระเหยได้}) \quad (\text{Eq.4})$$

4. การวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีน

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 โดยอบตัวอย่างถ่านที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 3 h จากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งถ่านประมาณ 1 g ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 5% ปริมาตร 10 mL แล้วต้มให้เดือดประมาณ 30 s เพื่อขจัดสิ่งเจือปน เมื่อถ่านแห้งสนิทแล้ว ให้เติมสารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.10 N ปริมาตร 100 mL ปิดฝาแล้วเขย่าแรง ๆ ประมาณ 30 s จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิ่มตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสารละลายด้วยขวดรูปชมพู่ นำสารละลายที่ผ่านการกรองปริมาตร 50 mL มาวัดปริมาณไอโอดีนที่เหลือโดยใช้วิธีไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.10 N เติมน้ำแบ่ง 2-3 หยด จนได้สารละลายสีน้ำเงิน ไทเทรตจนได้สารละลายใสไม่มีสีบันทึกปริมาตรโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ จากนั้นคำนวณหาการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) โดยใช้สมการ (Eq.5) ซึ่งแสดงค่าความสามารถในการดูดซับของถ่าน

$$X/M (\text{mg/g}) = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (\text{Eq.5})$$

โดยที่ $A = 12693N_2$ (N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน ในหน่วย N), $B = 126.93N_1$ (N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ในหน่วย N), S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (mL), M คือ น้ำหนักถ่าน (g) และ DF คือ ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (Dilution factor) หาได้จากสมการ (Eq.6)

$$DF = \frac{\text{ปริมาตรไอโอดีนเริ่มต้น} - \text{ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาตรไอโอดีนที่เหลือ}} \quad (\text{Eq.6})$$

5. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ

วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเครื่อง Surface area and pore size analyzer (BET) ศูนย์วิจัยวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยใช้เทคนิคการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และเทคนิคการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ด้วยหลักการวัดปริมาตรของแก๊สในสภาวะสูญญากาศ ณ ความดันคงที่ (Vacuum volumetric technique)

6. วิธีการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของข้อมูล

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 ซึ่งประกอบด้วย การหาปริมาณความชื้น สารระเหย ถ่าน และคาร์บอนคงตัว โดยทำการทดลองซ้ำอย่างละ 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าที่ได้จากผลการทดลองมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Mean; $\bar{x}$) และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติต่อไป

6.1 การหาค่าเฉลี่ย โดยใช้สูตร (Eq.7)

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \quad (\text{Eq.7})$$

โดยที่ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล x_i คือ ค่าที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้ง และ N คือ จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง

6.2 การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้สูตร (Eq.8)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N} - \bar{x}^2} \quad (\text{Eq.8})$$

โดยที่ SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล x_i คือ ค่าที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้ง และ N คือ จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง

ผลการวิจัย และอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ

จากผลการทดลองแสดงใน Table 1 ซึ่งได้จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ พบว่า ความเข้มข้นของตัวกระตุ้นมีผลต่อองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดัง Figure 2

Table 1 Results of proximate analysis

KOH concentration (%w/v)	Moisture content (%)	Volatile matter (%)	Ash content (%)	Fixed carbon (%)
0	5.85±0.083	29.93±0.193	11.92±0.189	52.29±0.060
10	5.61±0.033	24.70±0.261	11.45±0.104	58.24±0.219
40	3.74±0.040	19.59±0.368	7.79±0.149	68.88±0.254

จากผลการทดลองที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 เพื่อศึกษาสมบัติของถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย KOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน พบว่า ความเข้มข้นของตัวกระตุ้นมีผลต่อองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านอย่างชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวกระตุ้นจาก 10% เป็น 40% จะส่งผลให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนว่าถ่านที่ได้มีความเสถียรและบริสุทธิ์มากขึ้น เช่น ปริมาณความชื้นลดลงจาก 5.85% ในถ่านที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เหลือเพียง 3.74% ที่ความเข้มข้น 40% ของ KOH ขณะที่ปริมาณสารระเหยลดลงจาก 29.93% เหลือ 19.59% และปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจาก 52.29% เป็น 68.88% ตามลำดับ ส่วนปริมาณเถ้าซึ่งสะท้อนสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่คาร์บอน ก็มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพของถ่านโดยการกระตุ้นด้วย KOH ที่ความเข้มข้น 40% สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์และคุณภาพของถ่านไม้ไผ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้ KOH เป็นตัวกระตุ้นมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมกับสถานะอุณหภูมิที่เหมาะสม การปรับปรุงดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Ponken et al. (2023) ที่ระบุว่าความเข้มข้นของ KOH มีผลต่อการเพิ่มรพูนและพื้นที่ผิวภายในของถ่าน ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งค่าปริมาณสารระเหยและเถ้าเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดูดซับของถ่านที่เตรียมได้ นอกจากนี้ Phohtitontimongkol (2017) ยังพบว่าการใช้ KOH และตัวกระตุ้นอื่น ๆ มีผลโดยตรงต่อการเพิ่มค่าการดูดซับไอโอดีนและปริมาณคาร์บอนคงตัวซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัยของ Rujira (2013) และ

Sangkaew et al. (2011) ยืนยันว่าไฟเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ เมื่อได้รับการปรับสภาพอย่างเหมาะสม สามารถยกระดับทั้งสมรรถนะและมูลค่าเชิงเศรษฐกิจได้อย่างมีนัยสำคัญ ข้อค้นพบเหล่านี้ระบุชัดเจนว่า การควบคุมความเข้มข้นของตัวกระตุ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของถ่านชาร์ และองค์ความรู้ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางในการพัฒนาถ่านกัมมันต์สำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท

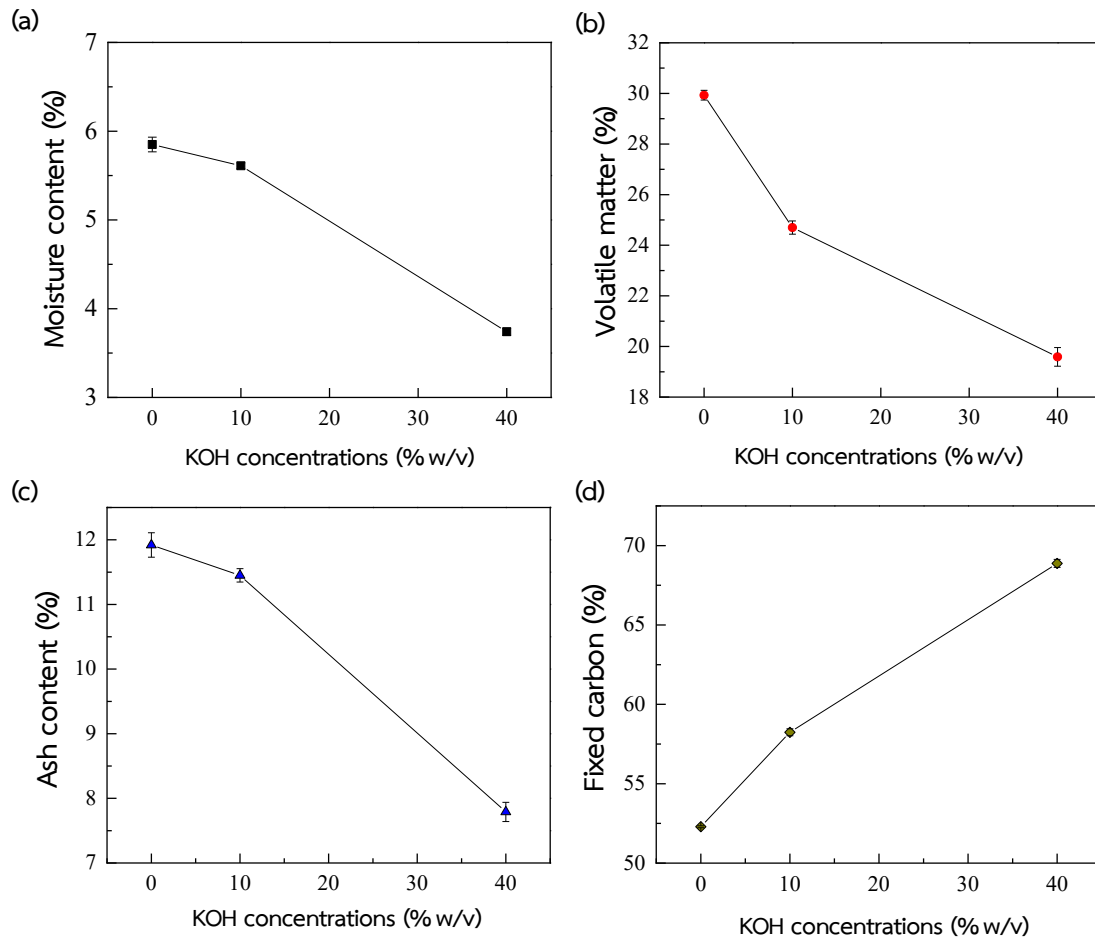


Figure 2 (a) Moisture content, (b) Volatile matter, (c) Ash content, and (d) Fixed carbon content of bamboo charcoal activated with different concentrations of KOH

2. การวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะ

ผลการทดลองของค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังแสดงใน Figure 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของตัวกระตุ้น KOH เพิ่มขึ้น ถ่านที่ได้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น โดยพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก $16 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็น $124 \text{ m}^2/\text{g}$ และค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจาก 128 mg/g เป็น 253 mg/g เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ KOH จาก 10% เป็น 40% ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ KOH ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่รายงานว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH มีค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวสูงกว่าวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Spencer et al., 2024a)

แนวโน้มของผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Spencer et al. (2024a) ซึ่งยืนยันว่าการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าวิธีการทางกายภาพ (Spencer et al., 2024a) ขณะเดียวกัน การศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับค่าการดูดซับไอโอดีน โดยตัวอย่างที่กระตุ้นทางเคมีให้ค่าการดูดซับไอโอดีน

ได้สูงถึง 900 mg/g (Spencer et al., 2024b) แม้ว่าถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านกระตุ้นด้วย KOH ในงานวิจัยนี้จะมีพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่าบางงานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่พื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการใช้วัสดุตั้งต้นชนิดอื่น ๆ ความแตกต่างของสมบัติที่ได้อาจมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิการกระตุ้น อัตราส่วนของ KOH ที่ใช้ หรือพันธุ์ของไม้ไผ่ ซึ่งยืนยันว่า KOH เป็นตัวกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพ และการควบคุมความเข้มข้นของ KOH เป็นกุญแจสำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงสำหรับการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงาน (Spencer et al., 2024b; Gao et al., 2025)

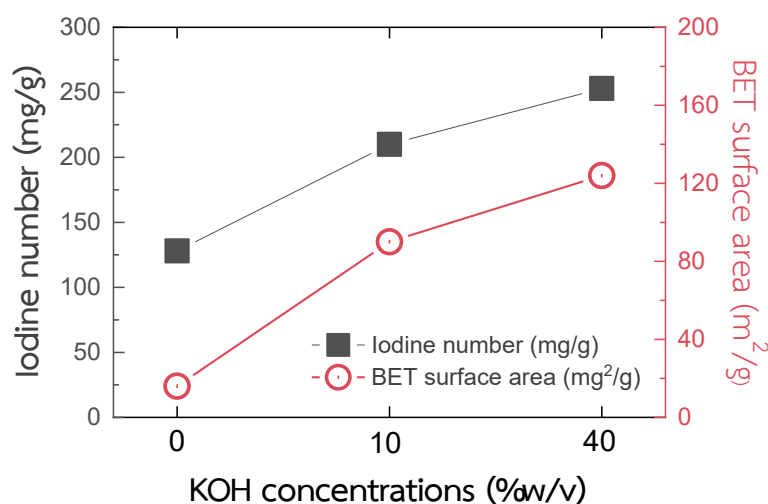


Figure 3 Iodine number and specific surface area of bamboo charcoal activated with different concentrations of KOH

Table 2 แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของถ่านกัมมันต์ถูกกำกับโดยปัจจัยหลักสองประการ ได้แก่ (1) ชนิดของตัวกระตุ้น และ (2) องค์ประกอบภายในของวัสดุตั้งต้น ตัวกระตุ้นที่มีสมบัติเป็นเบส เช่น KOH และ ZnCl_2 โดยทั่วไปให้ค่าพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวกระตุ้นที่มีสมบัติเป็นกรด เช่น H_2SO_4 เนื่องจากมีความสามารถในการกัดกร่อนที่ช่วยทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) และขยายให้เป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ในขณะที่การกระตุ้นด้วยกรดจะเป็นการช่วยให้เกิดการเชื่อมขวางของโครงข่าย (Cross-linking) และการเกิดน้ำมันดิน (Tar) ที่อุดตันการเกิดรูพรุน ดังตัวอย่างพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำมากของดอกปาล์ม ($\approx 9.57 \text{ m}^2/\text{g}$) เมื่อใช้ H_2SO_4 เป็นตัวกระตุ้น (Ioannidou & Zabaniotou, 2007) นอกจากนี้ ชนิดของวัสดุตั้งต้นยังส่งผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านอย่างชัดเจน เนื่องจากอัตราส่วนลิกนิน-เซลลูโลส และปริมาณเถ้าและแร่ธาตุมีผลต่อการกำจัดองค์ประกอบที่ระเหยได้ (Devolatilization) และการเกิดโครงสร้างรูพรุน เช่น การกระตุ้นถ่านจากเมล็ดลันจี้ด้วย KOH จะได้ถ่านที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านจากก้านพริกถึงประมาณ $11 \text{ m}^2/\text{g}$ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นเป็นตัวแปรสำคัญต่อสมบัติของถ่านที่กระตุ้นด้วย KOH (Gao et al., 2025) สำหรับถ่านไม้ไผ่ที่เตรียมด้วยสารกระตุ้น KOH ในงานวิจัยนี้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ $124 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยของ Ponken et al. (2023) และ Liu et al. (2010) ที่รายงานค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,257 และ $1,432 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากเงื่อนไขการกระตุ้นและอุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ อย่างไรก็ตาม การศึกษาอัตราส่วนระหว่างตัวกระตุ้นและถ่านพบว่า ช่วงอัตราส่วน 1:1 ถึง 4:1 เป็นช่วงที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET สูงที่สุด เช่น ที่อัตราส่วน NaOH:ถ่าน เท่ากับ 3:1 (Youme, 2015) KOH:ถ่าน เท่ากับ 3:1 (Ponken et al., 2023) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวกระตุ้นเป็นอัตราส่วน 4:1 พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของถ่านมีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณตัวกระตุ้นที่มากเกินไปอาจไปทำลายผนังของรูพรุนขนาดเล็กทำให้เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นและส่งผลต่อการลดลงของพื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET (Yang et al., 2017) ปัจจัยอื่นที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติของถ่าน ได้แก่ อัตราส่วนของ KOH:ถ่าน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น และการกำจัดแร่ธาตุก่อนและหลังการกระตุ้น ล้วนส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพโดยเฉพาะการเกิดโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) และขนาดกลาง (Mesopore) (Ponken et al., 2023; Spencer et al., 2024b)

สำหรับผลการทดลองในครั้งนี้ ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ที่ความเข้มข้น 40% ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 124 m²/g ซึ่งสูงกว่าวัสดุชีวมวลหลายชนิดดังแสดงใน Table 2 เมื่อพิจารณาถ่านที่ผ่านกระตุ้นด้วย KOH พบว่า ถ่านไม้ไผ่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านจากเปลือกถั่วลิสง (Peanut shell) กากกาแฟ (Coffee husk) และเมล็ดลิ้นจี่ (Lychee seed) นอกจากนี้ยังพบว่า ถ่านไม้ไผ่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านจากดอกปาล์ม (Palm flower) ที่ใช้ H₂SO₄ เป็นตัวกระตุ้น สำหรับถ่านที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านไม้ไผ่ส่วนใหญ่จะเป็นถ่านที่กระตุ้นด้วยตัวกระตุ้นอื่น เช่น H₂SO₄ ZnCl₂ NaOH และ H₃PO₄ อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านไม้ไผ่ที่สังเคราะห์ได้นี้มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานกำจัดสีย้อมหรือการดูดซับก๊าซหรือไอระเหยบางชนิดที่จำเพาะกับโครงสร้างรูพรุนระดับขนาดกลาง (Mesopore) (Hameed et al., 2007)

Table 2 Comparative specific surface area of chemically activated biomass-based charcoal

Biomass precursor	Activating agent	BET surface area (m ² /g)	Reference
Peanut shell	KOH	89	Foo & Hameed (2012)
Coffee husk	KOH	28	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Lychee seed	KOH	119	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Peanut shell	KOH	1523	Boroojerdi et al. (2025)
Lychee seed	KOH	1854	Gao et al. (2025)
Peanut shell	H ₃ PO ₄	56.8	Boroojerdi et al. (2025)
Palm flower	H ₂ SO ₄	9.57	Ioannidou & Zabaniotou (2007)
Lychee seed	H ₃ PO ₄	345	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Lychee seed	H ₂ SO ₄	358	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Lychee seed	ZnCl ₂	106	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Chili stem	ZnCl ₂	876	Phromphithak et al. (2023)
Bamboo	NaOH	1215	Youme et al. (2015)
Bamboo	H ₃ PO ₄	1432	Liu et al. (2010)
Bamboo	KOH	1257	Ponken et al. (2023)
Bamboo (this study)	KOH	124	This study

จากการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะของแต่ละวัตถุดิบ ดัง Table 2 บ่งชี้ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพของการกระตุ้นสามารถยกระดับการสร้างขนาดรูพรุนในถ่านไม้ไผ่ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการปรับอัตราส่วนระหว่างตัวกระตุ้นกับถ่านชาร์ควบคู่กับความเข้มข้นของตัวกระตุ้น ตลอดจนการศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการเผากระตุ้นส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ก่อนแล้วค่อย ๆ ขยายเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) นอกจากนี้ การกำจัดเถ้าและซิลิกาด้วยกรดอ่อนออกจากไม้ไผ่ก่อนการกระตุ้นจะช่วยลดผลการขัดขวางต่อการทำปฏิกิริยา เช่นเดียวกับกระบวนการปรับสภาพหลังการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ระยะสั้นด้วย CO₂ หรือไอน้ำซึ่งสามารถขยายรูพรุนขนาดเล็กได้อย่างมากได้โดยไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียมวลจากการเผาไหม้มากเกินไป ขณะเดียวกัน การชะล้างหลังการกระตุ้นมีความจำเป็นเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ตกค้าง (เช่น K₂CO₃) อาจส่งผลต่อการสร้างโครงสร้างรูพรุนภายในได้ ภายใต้การปรับเปลี่ยนตัวแปรดังกล่าว ไม้ไผ่มีแนวโน้มที่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น และการกระจายขนาดรูพรุนที่ปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งเอื้อให้ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่คุ้มค่าและยั่งยืนสำหรับงานบำบัดน้ำ การกรองอากาศ และเทคโนโลยีการดูดซับที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ แม้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้ในงานนี้จะต่ำกว่าวัตถุดิบบางชนิด แต่ข้อได้เปรียบด้านการเติบโตเร็ว ความอุดมสมบูรณ์ในท้องถิ่น และต้นทุนการผลิตต่ำของไม้ไผ่ยังทำให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระดับชุมชน ซึ่งให้ความสำคัญกับความยั่งยืนและความพร้อมของทรัพยากร (Zhang et al., 2022)

อย่างไรก็ตาม จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับข้อมูลมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 900-2547) ซึ่งกำหนดให้ถ่านกัมมันต์ต้องมีการดูดซับไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600 mg/g และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 1,000 m²/g พบว่า

ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ความเข้มข้น 40% ในงานวิจัยนี้ ยังไม่สามารถผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก. ได้ โดยมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเพียง 253 mg/g และพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ 124 m²/g แม้จะสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นใน Table 2 แต่ยังคงถือว่าอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับเกณฑ์อุตสาหกรรม ทั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นเพียงขั้นตอนเดียวอาจยังไม่เพียงพอ และมีความจำเป็นต้องพัฒนาเงื่อนไขเพิ่มเติม เช่น การเพิ่มอุณหภูมิการเผา ระยะเวลาในการกระตุ้น หรือการใช้กระบวนการกระตุ้นแบบสองขั้น (Dual activation) เพื่อให้ได้คุณสมบัติเชิงโครงสร้างที่เหมาะสมและตรงตามมาตรฐานถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป ข้อเท็จจริงนี้บ่งชี้ว่า การกระตุ้นทางเคมีแบบขั้นตอนเดียว อาจไม่เพียงพอในการสร้างรูพรุนที่ต้องการสำหรับถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่คุณภาพอุตสาหกรรม จึงมีความจำเป็นต้องปรับเหมาะกระบวนการเพิ่มเติม เช่น การเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้น การยืดระยะเวลาคงอุณหภูมิ หรือการประยุกต์ กระบวนการกระตุ้นสองขั้น (เช่น กระตุ้นด้วยวิธีเคมี และต่อเนื่องด้วยวิธีทางกายภาพด้วย CO₂ หรือ ไอน้ำ) เพื่อสร้างรูพรุนขนาดเล็ก-กลาง (Micro-Mesopore) ให้เด่นชัดยิ่งขึ้นสอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรม

บทสรุป

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวกระตุ้น KOH ต่อสมบัติทางกายภาพของถ่านไม้ไผ่ พบว่า ความเข้มข้นของตัวกระตุ้นมีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านอย่างชัดเจนในหลายมิติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านความบริสุทธิ์และโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ซึ่งเป็นคุณลักษณะสำคัญของถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพ ถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ความเข้มข้น 40% ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในเชิงสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด (3.74%) ปริมาณสารระเหยลดลงเหลือ 19.59% ปริมาณเถ้าลดลงเหลือ 7.79% และปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นถึง 68.88% เมื่อเทียบกับถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น (52.29%) แสดงให้เห็นว่า KOH มีบทบาทในการขจัดองค์ประกอบที่ไม่ต้องการและเสริมโครงสร้างคาร์บอนให้มีความเสถียรมากขึ้น นอกจากนี้ ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในด้านการดูดซับ โดยค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจาก 128 mg/g (ในถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น) เป็น 253 mg/g และพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 16 m²/g เป็น 124 m²/g สะท้อนถึงการสร้างโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เอื้อต่อการดูดซับสารเคมีในระดับโมเลกุลได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากถ่านชีวมวลชนิดอื่นที่กระตุ้นด้วยสารเคมีประเภทต่าง ๆ ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ให้ผลลัพธ์ในระดับที่น่าพึงพอใจ แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการในด้านความสามารถในการพัฒนาพื้นที่ผิว หากใช้กระบวนการกระตุ้นเพียงขั้นตอนเดียว โดยคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 900-2547) ซึ่งกำหนดให้ค่าการดูดซับไอโอดีนไม่ต่ำกว่า 600 mg/g และพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 1,000 m²/g ดังนั้น จึงควรปรับปรุงกระบวนการกระตุ้นเพิ่มเติม โดยเน้นการปรับเหมาะ อุณหภูมิการกระตุ้น, อัตราส่วนสารเคมีต่อถ่านชาร์ (Impregnation ratio) และพิจารณาใช้ กระบวนการกระตุ้นแบบสองขั้น (Dual activation) เพื่อสร้างรูพรุนให้มีลักษณะเข้าใกล้มาตรฐานระดับอุตสาหกรรมยิ่งขึ้น

ในภาพรวมจะเห็นได้ว่าไม้ไผ่มีศักยภาพสูงในฐานะวัตถุดิบชีวมวลสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อการวิจัยในอนาคต ควรดำเนินการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างของวัสดุอย่างลึกซึ้ง เพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับสมรรถนะการดูดซับโดยใช้เทคนิคขั้นสูง ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) การวิเคราะห์ BET (เพื่อประเมินโครงสร้างรูพรุน) และ สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดแบบฟูเรียร์ (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR) นอกจากนั้นควรเปรียบเทียบตัวกระตุ้นชนิดอื่น เช่น ZnCl₂ หรือ H₃PO₄ เพื่อประเมินประสิทธิภาพสัมพัทธ์ รวมถึงบูรณาการถึงการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อสนับสนุนการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่ยั่งยืนสำหรับการใช้งานระดับชุมชนและอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีและธุรกิจไม้มัชน บ้านจิกแดก ตำบลจิกแดก อำเภอพนมดงรัก จังหวัดสุรินทร์ ที่กรุณาจัดหาถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันแล้ว สำหรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่เอื้อให้การศึกษาครั้งนี้สามารถดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย

ราชภัฏสุรินทร์ สำหรับการสนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์ และทรัพยากรที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการเอื้อเพื่อข้อมูลทางวิชาการตลอดกระบวนการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- ASTM International. (1984). *Standard test method for chemical analysis of wood charcoal* (ASTM D1762-84). ASTM International.
- ASTM International. (1994). *Standard test method for determination of iodine number of activated carbon* (ASTM D4607-94). ASTM International.
- Boroojerdi, S. H., Mohammadi, M. M., & Bahadoran, F. (2025). Facile, low-cost, and environment-friendly method for preparing peanut shell-based activated carbon: Application to dichloromethane removal. *RSC Advances*, 15, 27311. <https://doi.org/10.1039/D5RA02731J>
- Chandra, T. C., Mirna, M. M., Sunarso, J., Sudaryanto, Y., & Ismadji, S. (2009). Activated carbon from durian shell: Preparation and characterization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 40(4), 457-462. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2009.01.002>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2012). A review of recent development in the preparation of activated carbon from agricultural by-products. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 502-509. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.017>
- Gao, J., Wang, H., Liu, X., Zhang, Z., Fan, Z., & Suo, Y. (2025). Regulating CO₂ adsorption performance of lychee seed-based porous carbon materials: Insights into oxygen groups and pore structure. *Environmental Research*, 284, 122245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122245>
- Hameed, B. H., Din, A. T. M., & Ahmad, A. L. (2007). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 819-825. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.049>
- Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393-415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966-2005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>
- Ipeh, M., & Hanim, M. (2020). Effects of KOH concentration and activation temperature on the textural characteristics of activated carbon produced from bamboo. *Materials Today: Proceedings*, 31, 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.292>
- Kibona, J. J., Shim, J., Byun, C. H., & Kim, C. K. (2020). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by chemical activation with KOH. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 48(4), 487-498. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.4.487>
- Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., & Guo, L. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.011>
- Ngernven, Y., & Kamwilaisak, K. (2013). Activated carbon from Thailand's biomass: A review literature. *KKU Engineering Journal*, 40(2), 267-283. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/19107>. (In Thai)

- Phothitontimongkol, T. (2017). Activated carbon from agricultural residues by chemical activation for the application of pollutant removal in water. *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, 8(1), 196-214. (In Thai)
- Ponken, T., Phumuen, P., Phosopa, N., Tagsin, P., Ponhan, W., Phakkhawan, A., & Klangtakai, P. (2023). Activated carbon synthesized from bamboo shoots for supercapacitor application. *Creative Science*, 15(1), 247051. (In Thai)
- Qin, C., Chen, Y., & Gao, J. (2014). Manufacture and characterization of activated carbon from marigold straw (*Tagetes erecta* L.) by H_3PO_4 chemical activation. *Materials Letters*, 135, 123-126. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.06.077>
- Rujira, J. (2013). Preparation of activated carbon from bamboo by chemical activation. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 15(3), 25-31. (In Thai)
- Sangkaew, S., Porka, T., & Puangsin, B. (2011). Physical properties of activated carbon produced from bamboo. *KKU Research Journal*, 16(6), 665-673. (In Thai)
- Spencer, W., Ibane, D., Singh, P., & Nikoloski, A. N. (2024a). Effect of surface area, particle size, and acid washing on the quality of activated carbon derived from lower rank coal by KOH activation. *Sustainability*, 16(14), 5876. <https://doi.org/10.3390/su16145876>
- Spencer, W., Senanayake, G., Altarawneh, M., Ibane, D., & Nikoloski, A. N. (2024b). Review of the effects of coal properties and activation parameters on activated carbon production and quality. *Minerals Engineering*, 212, 108712. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108712>
- Thai Industrial Standards Institute. (2004). *Activated carbon* (TIS 900-2547). Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Thailand. (In Thai)
- Wang, L., Guo, Y., Wang, Y., Zhang, H., Liu, Z., & Zhang, J. (2017). The effect of KOH activation on the pore structure and electrochemical performance of bamboo-based activated carbons for supercapacitors. *Journal of the Electrochemical Society*, 164(6), A1089-A1096. <https://doi.org/10.1149/2.0521706jes>
- Yang, H. M., Zhang, D. H., Chen, Y., Ran, M. J., & Gu, J. C. (2017). Study on the application of KOH to produce activated carbon to realize the utilization of distiller's grains. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 69(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/69/1/012051>
- Youme, P. (2015). Preparation of activated carbons with high surface area from wood charcoal powder by dry chemical activation. *KKU Science Journal*, 43(4), 788-798. (In Thai)
- Zhang, Y., Ma, C., Liu, F., Xu, Y., & Chen, W. (2022). A review on the preparation of bamboo-based activated carbon. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 7(3), 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.02.005>
- Zhao, B., Zhang, J., Wang, C., Li, F., & Li, Y. (2021). A review of preparation of biomass-based activated carbon and their application in antibiotic-contaminated water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106095. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106095>