

## นิพนธ์ต้นฉบับ

การปรับปรุงคุณสมบัติการดูดซับของไบโอชาร์จากกะลามะพร้าวด้วยวิธีอาร์กอน  
นอนเทอร์มอลพลาสมาความดันบรรยากาศและอบไอน้ำที่อุณหภูมิสูงAdsorption Property Modification of Coconut Shell Biochar using Argon  
Non-thermal Atmospheric Pressure Plasma and Steam at High Temperatureจिरพงษ์ ศรีศักดิ์านุกภาพ<sup>1\*,2</sup>ชัยรัช ฉ่ำเฉลิม<sup>2</sup>ขวัญจรรัส เริงปัญญา<sup>1</sup>ธัญญรัตน์ เชื้อสะอาด<sup>1,3</sup>ธิตี วานิชดิตรัตน์<sup>2</sup>ประดุง สวนพุด<sup>1,2</sup>Jirapong Sornsakdanuphap<sup>1\*,2</sup>Chaithat Chamchalerm<sup>2</sup>Khuanjarat Choengpanya<sup>1</sup>Thanyarat Chuesaard<sup>1,3</sup>Thiti Wanishdilokratn<sup>2</sup>Pradoong Suanpoot<sup>1,2</sup><sup>1</sup>กลุ่มวิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ ร่องกวาง แพร่ 54140<sup>1</sup>Program in Basic Science, Maejo University Phrae Campus, Rong Kwang, Phrae 54140 Thailand<sup>2</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ ร่องกวาง แพร่ 54140<sup>2</sup>Forest Industry Technology, Maejo University Phrae Campus, Rong Kwang, Phrae 54140 Thailand<sup>3</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ ร่องกวาง แพร่ 54140<sup>3</sup>Crop Production Technology, Maejo University Phrae Campus, Rong Kwang, Phrae 54140 Thailand

\*Corresponding Author, E-mail: jirapong\_ss@mju.ac.th

รับต้นฉบับ 17 พฤษภาคม 2567

รับแก้ไข 10 กรกฎาคม 2567

รับลงพิมพ์ 24 กรกฎาคม 2567

## ABSTRACT

Granular biochar from coconut shell waste was produced in a 50 L heat-insulated iron kiln using the methods of argon non-thermal atmospheric pressure plasma and high temperature steam at 700 °C for iodine adsorption improvement. The experiments were divided into 4 groups: control, treated biochar with plasma for 1 hr, treated biochar with 700 °C steam for 1 hr and treated biochar with 700 °C steam for 30 min, following treatment with plasma for 30 min. For estimation of iodine adsorption, 2 g of biochar were tested with 0.0048 M iodine solution (25 mL) using centrifugation with a magnetic bar for 3 min. The iodine solution after centrifugation was measured for absorbance at a wavelength of 350 nm. Based on the results, the biochar treated with 700 °C steam for 1 hr had the highest efficiency (14.38±0.13 mg/g), with the iodine adsorption rate increasing by 3.9 times that of the control experiment. On the other hand, the biochar treated with plasma had the lowest efficiency (2.24±1.20 mg/g), with the iodine adsorption rate decreasing to 0.6 times that for the control experiment.

**Keywords:** Argon non-thermal atmospheric pressure plasma; Treated biochar with steam at high temperature; Coconut shell biochar; Iodine adsorption

## บทคัดย่อ

ถ่านไบโอชาร์แบบเกล็ดจากเศษกะลามะพร้าวถูกผลิตขึ้นโดยใช้เตาเหล็กหุ้มฉนวนความร้อนขนาด 50 ลิตร ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีอาร์กอนนอนเทอร์มอลพลาสมาความดันบรรยากาศและการอบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาแนวทางการพัฒนาการดูดซับไอโอดีน การทดลองแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่ ถ่านจากการทดลองควบคุม ถ่านปรับสภาพด้วยพลาสมา 1 ชั่วโมง ถ่านอบด้วยไอน้ำ 700 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และถ่านอบด้วยไอน้ำ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีตามด้วยการปรับสภาพด้วยพลาสมา 30 นาที เพื่อประเมินการดูดซับไอโอดีน ถ่านปริมาณ 2 กรัม ถูกนำมาปั่นเหวี่ยงกับสารละลายไอโอดีนทดสอบเข้มข้น 0.0048 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 นาที ด้วยเครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็ก จากนั้นนำสารละลายไอโอดีนไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร จากการทดลองพบว่าถ่านไบโอชาร์อบไอน้ำอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นเป็น 3.9 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองควบคุม และมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $14.38 \pm 0.13$  มิลลิกรัมต่อกรัม ในทางตรงกันข้าม ถ่านไบโอชาร์ปรับสภาพด้วยพลาสมามีประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนลดลงเป็น 0.6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองควบคุม และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $2.24 \pm 1.20$  มิลลิกรัมต่อกรัม

**คำสำคัญ:** อาร์กอนนอนเทอร์มอลพลาสมาความดันบรรยากาศ ถ่านอบด้วยไอน้ำอุณหภูมิสูง ถ่านไบโอชาร์จากกะลามะพร้าว การดูดซับไอโอดีน

## คำนำ

ในปัจจุบันการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่าเป็นสิ่งที่มีนัยสำคัญและเริ่มตระหนักมากขึ้น โดยจะเห็นได้จากการใช้นโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) (Alcalde-Calonge *et al.*, 2022) ในการบริหารเศรษฐกิจของประเทศ นโยบายนี้มุ่งเน้นการนำวัสดุเหลือทิ้งทั้งจากภาคการเกษตรกรรม ป่าไม้ อุตสาหกรรม เป็นต้น มาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าและสร้างรายได้เสริมให้กับคนในชุมชน ตัวอย่างการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถเป็นแนวทางในการสร้างรายได้เสริมให้กับชุมชนภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ได้แก่ การแปรรูปวัสดุโครงสร้างที่มีส่วนผสมของคอนกรีตกับเศษผงไม้ (Batool *et al.*, 2021) การใช้ปุ๋ยชีวภาพผสมกับผงแห้งจากเศษอาหารเหลือทิ้ง (Kang *et al.*, 2021) การแปรรูปเศษพลาสติกเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel) (Devi *et al.*, 2021) การแปรรูปไม้ไผ่เป็นถ่านพลังงานทดแทนและถ่านชีวภาพ (biochar, ถ่านไบโอชาร์) เพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน (Chaturvedi *et al.*, 2023) เป็นต้น อย่างไรก็ตามหนึ่งในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับในหลายชุมชนคือการผลิตถ่านไบโอชาร์จากวัสดุเหลือทิ้ง เช่น การผลิตถ่านไบโอชาร์จากกะลามะพร้าว (Chooklin *et al.*, 2023) การผลิตถ่านไบโอชาร์จากกระถิน (Kowitwivat *et al.*, 2019) ซึ่งสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพดินให้ดีขึ้นได้นอกจากนี้แล้วมีรายงานว่ากะลามะพร้าวและไม้ไผ่สามารถนำมาแปรรูปและพัฒนาคุณภาพให้สูงขึ้นจนเป็นถ่านกัมมันต์ได้ (activated charcoal) (Kajomcheappunngam *et al.*, 2003; Mahanim *et al.*, 2011) ซึ่งเป็นแนวทางที่เพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้งได้เป็นอย่างมาก ถ่านกัมมันต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น นำไปเป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง (Sajjad *et al.*, 2021) ใช้ในการกรองสีและกลิ่นในน้ำ (Changjia *et al.*, 2019) กรองอากาศให้บริสุทธิ์

(Maximoff *et al.*, 2022) กรองไวน์ให้บริสุทธิ์ (Cosme *et al.*, 2021) นำไปดูดซับสารพิษหรือโลหะหนัก (Gul *et al.*, 2022) เป็นต้น จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์มีช่องทางที่หลากหลายในการประยุกต์ใช้และสร้างรายได้

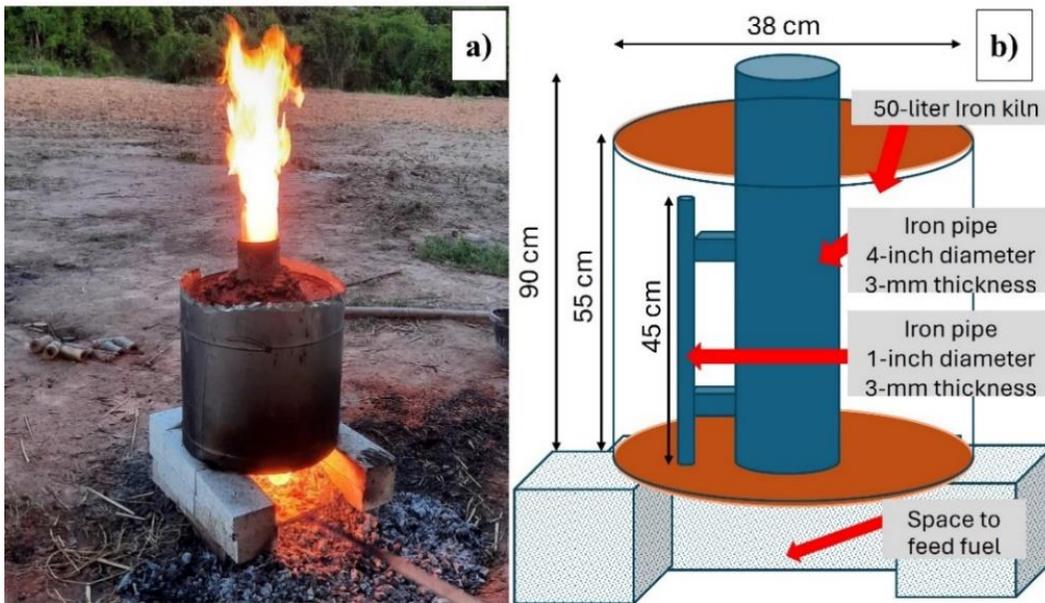
ถ่านกัมมันต์คือถ่านที่ผ่านการกระตุ้นให้เกิดรูพรุนที่อุณหภูมิสูงด้วยการใช้ก๊าซกระตุ้น โดยสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี (Jiwalak *et al.*, 2006) และกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ (Shahcheragh *et al.*, 2023) ภายใต้สภาวะจำกัดอากาศ ซึ่งโดยปกติแล้วปริมาณรูพรุนที่มากขึ้นจะแปรผันไปในทิศทางเดียวกันกับประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Mianowski *et al.*, 2007) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาหาแนวทางการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไบโอชาร์โดยใช้เตาอบไฟฟ้าอุณหภูมิสูงที่มีไอน้ำเป็นสารกระตุ้นรูพรุน วิธีการนี้ช่วยลดการใช้สารเคมีและสะดวกต่อการผลิต อีกทั้งพลังงานไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีราคาไม่แพงและในอนาคตมีแนวโน้มที่จะผลิตจากโซลาร์เซลล์มากขึ้น อีกแนวทางหนึ่งคือการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีนอนเทอร์มอลพลาสมาความดันบรรยากาศมาปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์จากกะลามะพร้าวเหลือทิ้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ ทั้งนี้เนื่องจากนอนเทอร์มอลพลาสมาความดันบรรยากาศสามารถสร้างหมู่ฟังก์ชันต่างๆเพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวของสารได้ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) เป็นต้น (Chen *et al.*, 2023) นอนเทอร์มอลพลาสมาเป็นสภาพพลาสมาที่ยังไม่เข้าสู่สมดุลทางความร้อนโดยที่อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงกว่าไอออนและอนุภาคอื่น ๆ ในพลาสมา (Sornsakdanuphap *et al.*, 2017) ในนอนเทอร์มอลพลาสมามีอนุภาคมากมายที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี เช่น อิเล็กตรอน แรดิคัล อนุภาครีแอกทีฟที่มีธาตุดอกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (RONS) (Yang *et al.*, 2023)

เป็นต้น ซึ่งอนุภาคทั้งหลายเหล่านี้สามารถช่วยสร้างหมูฟงก์ชั้นต่าง ๆ บนพื้นผิวของสารได้ เทคโนโลยีนี้มีความน่าสนใจเพราะเป็นเทคโนโลยีสะอาดที่ไร้สารเคมีตกค้าง สะดวกในการใช้งาน ใช้พลังงานไฟฟ้าไม่มาก และรองรับการขยายการผลิตขนาดใหญ่ได้

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### การเตรียมถ่านไบโอชาร์จากกะลามะพร้าวเหลือทิ้ง

ในการผลิตถ่านไบโอชาร์จากเศษกะลามะพร้าวเหลือทิ้ง ใช้ถังเหล็กขนาด 50 ลิตร หุ้มด้านข้างด้วยเซรามิกไฟเบอร์หนา 1 นิ้ว



**Figure 1** External appearance of heat-insulated 50 L biochar kiln (a) and schematic diagram of internal structure of heat-insulated 50 L biochar kiln (b)

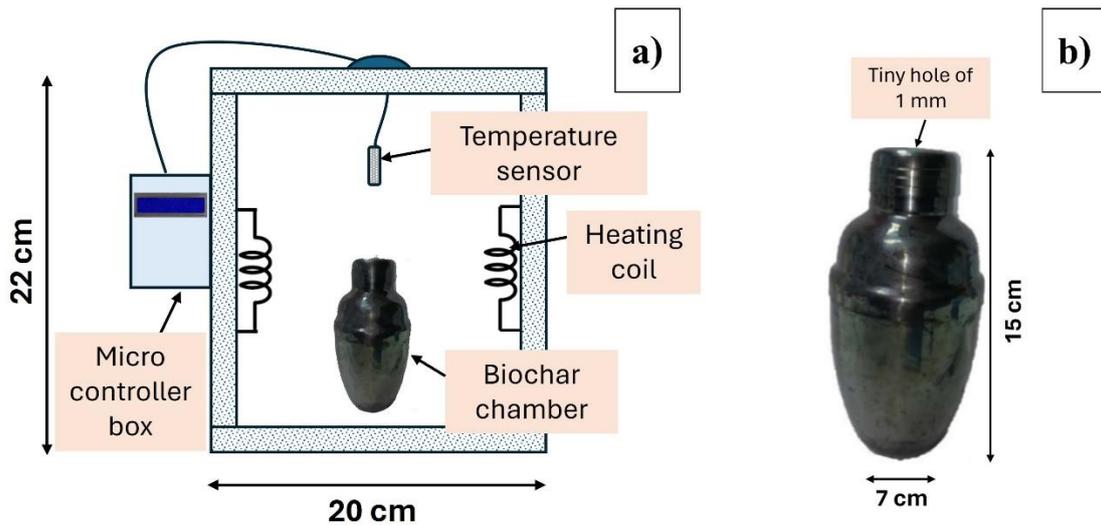
ภายในเตาประกอบด้วยท่อเหล็กขนาด 4 นิ้ว และ 1 นิ้ว ปลายด้านล่างของท่อเหล็กทั้งสองถูกเชื่อมให้ติดกับฐานของถังเหล็ก โดยสามารถเปิดปิดฝาด้านบนเพื่อบรรจุเศษกะลามะพร้าวได้ เมื่อเศษกะลามะพร้าวถูกอบภายใต้สภาวะจำกัดอากาศเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ภายในห้องอบจะเคลื่อนที่ผ่านท่อขนาด 1 นิ้ว มาสู่ฐานป้อนไม้เชื้อเพลิง และถูกเผาไหม้เป็นความร้อนเพิ่มเติม ในช่วงเวลาดังกล่าวนี้ไม่มีการป้อนไม้เชื้อเพลิงที่ฐานเตา หลังจากการเผาไหม้เป็นความร้อนเพิ่มเติมหมดไป ตั้งพักเตาให้เย็นลงเป็นเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นเปิดฝาด้านบนและเก็บถ่านไบโอชาร์ อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตว่าการผลิตถ่านไบโอชาร์มีการป้อนไม้เชื้อเพลิงเป็นระยะ ดังนั้นอุณหภูมิภายในตัวถังจึงมีความไม่สม่ำเสมอและประมาณอยู่ในช่วง 300-500 องศาเซลเซียส ในระหว่างกระบวนการผลิต ในขั้นตอนต่อไปนำถ่านไบโอชาร์มาหุบให้ละเอียดและใช้ตะแกรงกรองขนาด 2 มิลลิเมตร นำเกล็ดถ่านที่กรองได้ไปล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง จากนั้นนำเกล็ดถ่านไปต้มกับน้ำส้มสายชูที่

เพื่อชะลอการสูญเสียความร้อน ช่วยกระจายความร้อนให้สม่ำเสมอและเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาอุณหภูมิสูงในห้องอบภายในตัวถัง ลักษณะภายนอกและรายละเอียดโครงสร้างแสดงดังใน Figure 1(a) และ 1(b) ตามลำดับ เพื่อให้ความร้อนจากไม้เชื้อเพลิงเข้าสู่ฐานเตาอย่างมีประสิทธิภาพและลดเวลาในการผลิตถ่านไบโอชาร์ ฐานป้อนไม้เชื้อเพลิงประกอบขึ้นมาจากอิฐฉนวนความร้อนทนไฟ ดังแสดงใน Figure 1(a)

ผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 10 มิลลิลิตร ต่อ 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดขี้เถ้าที่อาจติดตามรูพรุนของถ่านล้างน้ำสะอาดอีก 2 ครั้ง แล้วนำไปผึ่งให้แห้งในที่ร่มเป็นเวลา 2 วัน

#### การใช้เตาอบไฟฟ้าอุณหภูมิสูง

ในงานวิจัยนี้ ใช้เตาอบไฟฟ้าที่ประกอบขึ้นจากอิฐฉนวนทนไฟ โดยภายในเตาฝังด้วยลวดความร้อนที่มีกำลังวัตต์ประมาณ 1,500 วัตต์ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิถูกสอดไว้ที่ด้านบนของเตา อุณหภูมิภายในเตาถูกควบคุมด้วยกล่องไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงใน Figure 2(a) เกล็ดถ่านไบโอชาร์จากกะลามะพร้าวถูกนำมาใส่ในแฮมเบอร์สแตนเลสที่เจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตร เพื่อลดแรงดันที่เกิดขึ้นภายในดังแสดงใน Figure 2(b) โดยในการอบแต่ละครั้งใส่ถ่าน 12 กรัม และน้ำสะอาดให้มีความสูงเท่ากับความสูงของถ่านในแฮมเบอร์สแตนเลส อุณหภูมิที่ใช้ในการอบเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส

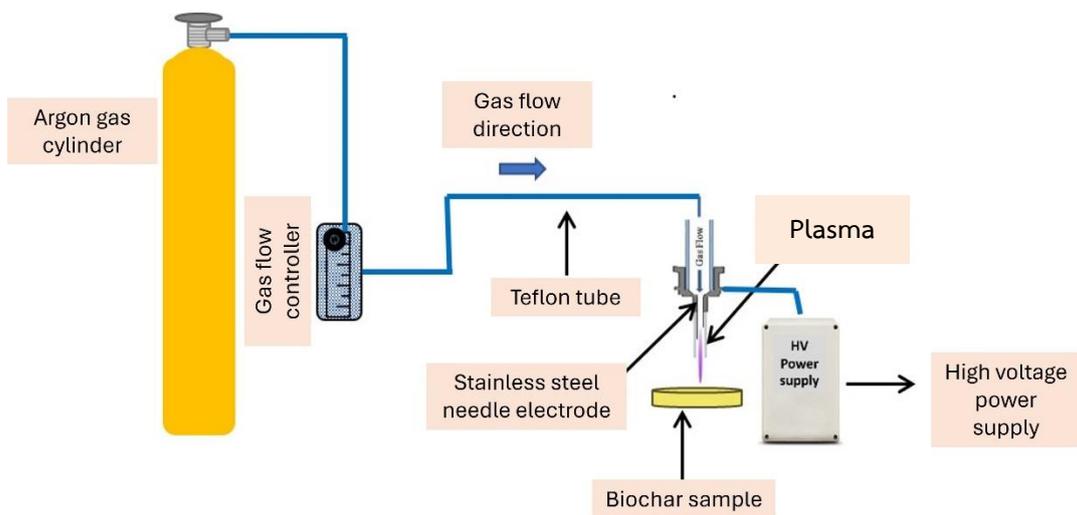


**Figure 2** Schematic diagram of internal structure of high temperature controllable electric furnace. Electrical power and internal volume of 1,500 W and 15,400 cm<sup>3</sup> (20 cm width x 22 cm height x 35 cm front to rear depth), respectively (a). Photograph of stainless-steel chamber (7 cm diameter x 15 cm height) for biochar activation (b)

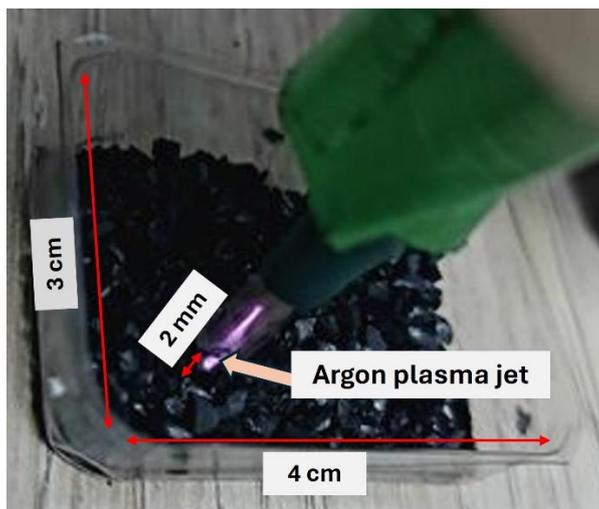
**การใช้อาร์กอนนอนเทอร์มอลพลาสมาความดันบรรยากาศ**

ในการสร้างนอนเทอร์มอลพลาสมาความดันบรรยากาศ ใช้แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.99% เป็นแก๊สตั้งต้น กำหนดอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนประมาณ 0.3 ลิตรต่อนาที ความถี่และความต่างศักย์ไฟฟ้ารูปไซน์ที่ใช้ในการผลิตพลาสมา

มีค่าประมาณ 1 เมกะเฮิรตซ์ และ 1-4 กิโลโวลต์ ตามลำดับ แผนผังการติดตั้งระบบพลาสมาแสดงดังใน Figure 3 ถ่านไบโอชาร์ถูกใส่ในภาตพลาสมาตึกขนาด 3x4x1 เซนติเมตร (กว้างxยาวxสูง) โดยปลายหลอดแก้วควอตซ์อยู่ห่างจากระดับผิวถ่านประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Figure 4 ปรับสภาพด้วยพลาสมาเป็นเวลา 1 นาทีที่ต่อจุด และปลายหลอดแก้วควอตซ์เคลื่อนที่แบบสุ่มไปทั่วผิวหน้าของถ่าน



**Figure 3** Schematic diagram of argon non-thermal atmospheric pressure plasma jet for biochar activation



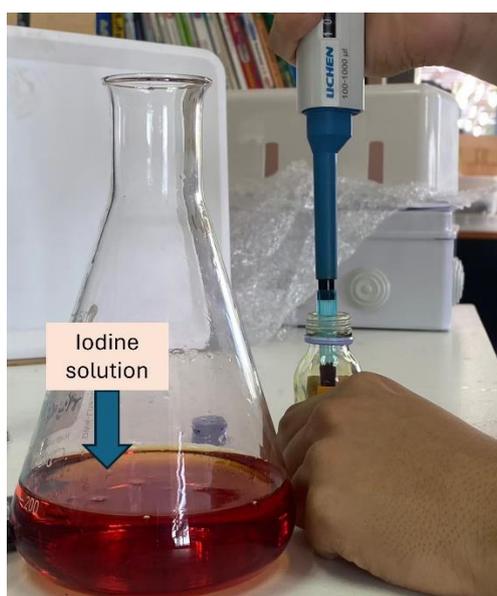
**Figure 4** Photograph of coconut shell granular biochar treated with argon non-thermal atmospheric pressure plasma jet

### การประเมินค่าอัตราการดูดซับของถ่าน

#### การเตรียมสารละลายไอโอดีนทดสอบ

ในการประเมินคุณสมบัติการดูดซับของถ่านเพื่อลดเวลาการประเมินและมีความเหมาะสมกับชุมชนงานวิจัยนี้ใช้สารละลายไอโอดีนเพื่อทดสอบคุณสมบัติการดูดซับไอโอดีนของถ่านเนื่องจากไอโอดีนมีคุณสมบัติเป็นสารต้นแบบของสารที่มีกลิ่นและสี ถ่านที่ใช้ทดสอบแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ถ่านไบโอชาร์ (การทดลองควบคุม) กลุ่มที่ 2 ถ่านไบโอชาร์อบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700

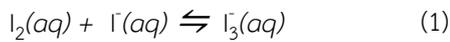
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กลุ่มที่ 3 ถ่านไบโอชาร์ปรับสภาพด้วยพลาสมาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กลุ่มที่ 4 ถ่านไบโอชาร์อบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตามด้วยปรับสภาพด้วยพลาสมาเป็นเวลา 30 นาที สารละลายไอโอดีนทดสอบเตรียมได้จากทิงเจอร์ไอโอดีน (ไอโอดีน ( $I_2$ ) เข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยมวลต่อปริมาตร+โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยมวลต่อปริมาตร) 20 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร สารละลายไอโอดีนทดสอบมีสีส้มแกมน้ำตาล ดังแสดงใน Figure 5 และมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.0048 โมลาร์



**Figure 5** Photograph of brownish orange iodine solution for adsorption test of biochar (control), 700 °C treated biochar with steam for 1 hour, treated biochar with plasma for 1 hour and 700 °C treated biochar with steam for 30 minutes following treated biochar with plasma for 30 minutes

**การวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของไตรไอโอดด์และไอโอดีน**

นำเกล็ดถ่านไบโอชาร์ที่ได้จากแต่ละกลุ่มจำนวน 2 กรัม มาปั่นเหวี่ยงกับสารละลายไอโอดีนทดสอบปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็ก ดังแสดงใน Figure 6 การปั่นเหวี่ยงในแต่ละครั้งใช้เวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทดสอบการดูดซับไตรไอโอดด์ ( $I_3$ ) ของถ่านซึ่งเกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ไอโอดีน ( $I_2$ ) และไอโอดด์ ( $I^-$ ) ดังแสดงในสมการที่ (1) หลังจากการปั่นเหวี่ยง นำเกล็ดถ่านไบโอชาร์ที่ผสมอยู่กับสารละลายไอโอดีนมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร จากนั้นนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance, *abs*) โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer

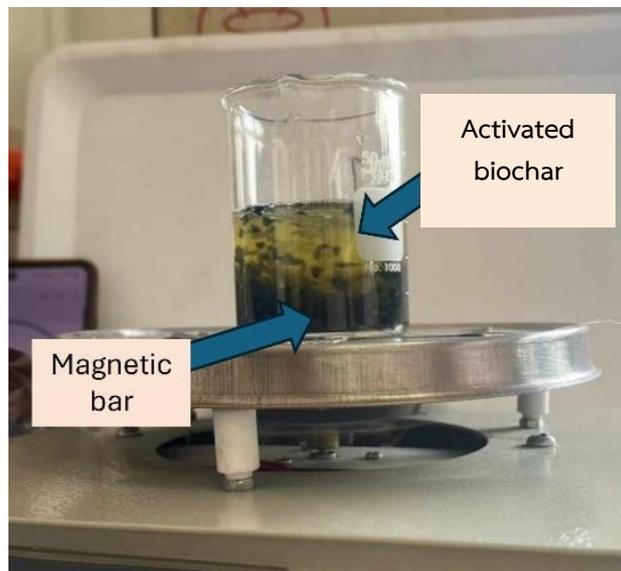


เนื่องจากสารละลายไอโอดีนทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ มีค่าความเข้มข้นน้อยกว่า 0.01 โมลาร์ ดังนั้นค่า Absorbance (*abs*) ที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าความเข้มข้น

ของสารที่ดูดกลืนแสงและเป็นไปตามกฎของ Beer-Lambert (Oshina and Spigulis, 2021) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$A = \epsilon lc \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) ตัวแปร *A* แสดงถึงค่าของ Absorbance (*abs*) ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย  $\epsilon$  แสดงถึงค่าของ molar absorptivity มีหน่วยเป็น โมลาร์<sup>-1</sup> เซนติเมตร<sup>-1</sup> ตัวแปร *l* แสดงถึงค่าของ Optical path length มีหน่วยเป็น เซนติเมตร และ *c* แสดงถึงค่าของความเข้มข้นสารที่ดูดกลืนแสง มีหน่วยเป็น โมลาร์ และเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนทดสอบน้อยกว่า 0.01 โมลาร์ ค่า  $\epsilon$  ในการศึกษาจะถูกประมาณเป็นค่าคงที่ กราฟตัวอย่างการดูดกลืนแสงที่วัดโดยใช้เครื่อง spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 500 นาโนเมตร ของสารละลายไอโอดีนทดสอบที่ถูกทำให้เจือจาง 20 เท่า (20-fold dilution) แสดงดังใน Figure 7 โดยค่าการดูดกลืนแสง (*abs*) จำเพาะ ที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร และ 460 นาโนเมตร แสดงถึงการดูดกลืนแสงของไตรไอโอดด์ ( $I_3^-$ ) และ ไอโอดีน ( $I_2$ ) ตามลำดับ (Du et al., 2021)



**Figure 6** Coconut shell activated granular biochar (2 g) centrifuged with 0.0048 M iodine solution (25 mL) for 3 minutes

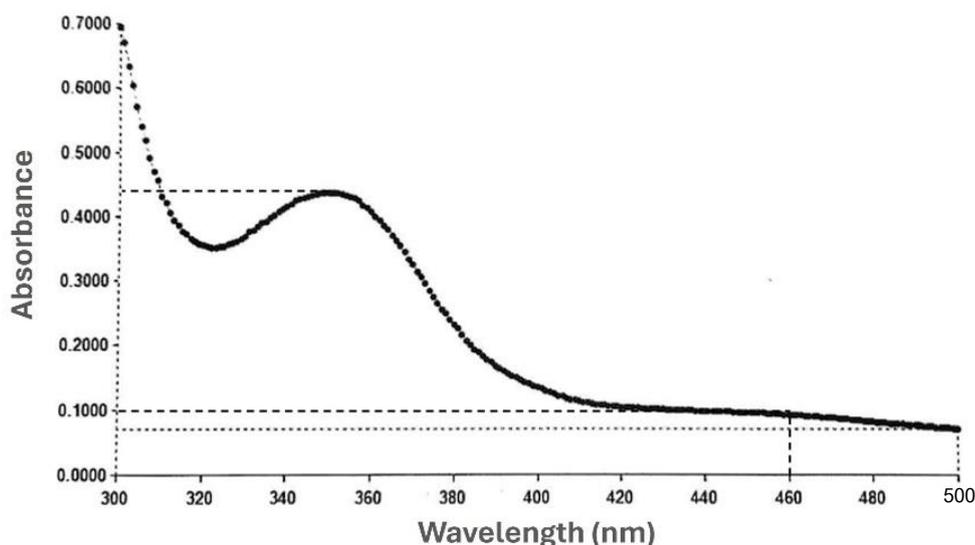


Figure 7 Example of absorbance spectra measured using spectrophotometer in spectral range 300–500 nm obtained from 20-fold dilution of 0.0048 M test iodine solution

#### การประเมินค่าอัตราการดูดซับไอโอดีนของถ่าน

ในการประเมินค่าอัตราการดูดซับไอโอดีนของถ่านไบโอชาร์ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม เริ่มต้นจากการคำนวณหาค่าจำนวนโมลที่เกิดขึ้นของไตรไอโอดด์เมื่อมีการทำเจือจางสารละลายไอโอดีนทดสอบ 10 เท่า (10-fold dilution) เหตุผลในการทำเจือจาง 10 เท่า เพราะค่าการดูดกลืนแสงหลังการปั่นเหวี่ยงถ่านไบโอชาร์ส่วนใหญ่ลดลงมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-1.5 ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงในช่วงนี้สมมูลกับการทำเจือจาง 10 เท่า อีกทั้งในกรณีของถ่านที่มีประสิทธิภาพการดูดซับไม่ดี จะต้องทำการเจือจาง 10 เท่าของสารละลายไอโอดีนหลังการปั่นเหวี่ยงก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยจำนวนโมลของไตรไอโอดด์ ( $n_{I_3}$ ) เมื่อมีการทำเจือจางสารละลายไอโอดีนทดสอบ 10 เท่า คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\frac{n_{I_3}}{\left(\frac{n_{I_2}}{dil} - n_{I_3}\right)} = \frac{\epsilon_2 \text{ abs}_1}{\epsilon_1 \text{ abs}_2} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3)  $\epsilon_1$  คือ Molar absorptivity ของ  $I_3$  ที่ 350 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 25,800 โมลาร์<sup>-1</sup> เซนติเมตร<sup>-1</sup>  $\epsilon_2$  คือ Molar absorptivity ของ  $I_2$  ที่ 460 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 730 โมลาร์<sup>-1</sup> เซนติเมตร<sup>-1</sup> (Yang et al., 2018)  $\text{abs}_1$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ  $I_3$  ที่ 350 นาโนเมตร  $\text{abs}_2$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ  $I_2$  ที่ 460 นาโนเมตร  $n_{I_2}$  คือ จำนวนโมลตั้งต้นของไอโอดีน มีค่าประมาณ 0.002 โมล ซึ่งคำนวณได้จากจำนวนโมลทั้งหมดของไอโอดีนที่อยู่ในทิงเจอร์ไอโอดีน (ไอโอดีน ( $I_2$ ) เข้มข้น 2.5% โดยมวลต่อปริมาตร+โพแทสเซียมไอโอดด์ (KI) เข้มข้น 2.5% โดย

มวลต่อปริมาตร) ปริมาตร 20 มิลลิเมตร เนื่องจากโพแทสเซียมไอโอดด์ (KI) เป็นสารประกอบไอออนิกที่ละลายน้ำได้ดี เพื่อสะดวกต่อการคำนวณจึงประมาณจำนวนโมลของไอโอดด์ ( $I^-$ ) เท่ากับจำนวนโมลของ KI ดังนั้นจากความเข้มข้นทิงเจอร์ไอโอดีนข้างต้น จำนวนโมลตั้งต้นของไอโอดด์ ( $n_{I^-}$ ) มีค่าประมาณ 0.003 โมล (กำหนดให้มวลโมเลกุลของไอโอดีนมีค่าเท่ากับ 253 กรัมต่อโมล และมวลโมเลกุลของไอโอดด์มีค่าเท่ากับ 166 กรัมต่อโมล) ความเข้มข้นตั้งต้นของสารละลายไอโอดีนทดสอบมีค่า  $0.002/0.42 \approx 0.0048$  โมลาร์ และค่า  $dil$  คือจำนวนเท่าของการทำเจือจางซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10

หลังจากคำนวณได้ค่า  $n_{I_3}$  แล้ว ในขั้นตอนต่อไปนำค่าดังกล่าวแทนค่าลงในสมการแสดงค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมี เพื่อคำนวณหาค่าคงที่สมดุล ( $k_{eq}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (4) โดย  $V_t$  คือปริมาตรของสารละลายไอโอดีนทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.42 ลิตร

$$k_{eq} = \frac{[I_3]}{[I_2][I^-]} = \frac{(V_t)(n_{I_3})}{\left(\frac{n_{I_2}}{dil} - n_{I_3}\right)\left(\frac{n_{I^-}}{dil} - n_{I_3}\right)} \quad (4)$$

เมื่อคำนวณได้ค่า  $k_{eq}$  แล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือการหาจำนวนโมลของ  $I_2$   $I^-$  และ  $I_3$  ที่ภาวะสมดุลของสารละลายไอโอดีนทดสอบปริมาตร 0.42 ลิตร โดยแทนค่า  $k_{eq}$  ที่ได้สมการที่ (4) ลงในสมการที่ (5) เพื่อคำนวณหาค่า  $n_{I_3}^{0.42}$

$$k_{eq} = \frac{(V_t)(n_{I_3}^{0.42})}{\left(n_{I_2} - n_{I_3}^{0.42}\right)\left(n_{I^-} - n_{I_3}^{0.42}\right)} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5)  $n_{I_3}^{0.42}$  คือ จำนวนโมลของ  $I_3^-$  ที่ภาวะสมดุลของสารละลายไอโอดีนทดสอบปริมาตร 0.42 ลิตร และมีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่า  $10 n_{I_3^-} < n_{I_3}^{0.42}$  ทั้งนี้เป็นเพราะการทำเจือจาง (dilution) ส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมี ดังสมการที่ (1) เกิดการย้อนกลับมากขึ้นเพื่อปรับเข้าสู่ตำแหน่งสมดุลใหม่โดยการทำให้เจือจางไม่เปลี่ยนแปลงค่า  $K_{eq}$  หลังจากได้ค่า  $n_{I_3}^{0.42}$  แล้ว ในขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณหาค่า  $n_{I_2}^{0.025}$   $n_{I^-}^{0.025}$  และ  $n_{I_3^-}^{0.025}$  ทั้งสามค่าข้างต้นนี้คือ จำนวนโมลของ  $I_2$   $I^-$  และ  $I_3^-$  ที่ภาวะสมดุลของสารละลายไอโอดีนทดสอบปริมาตร 25 มิลลิลิตรก่อนการปั่นเหวี่ยง โดยวิธีการคำนวณค่าของ  $n_{I_2}^{0.025}$

$n_{I^-}^{0.025}$  และ  $n_{I_3^-}^{0.025}$  แสดงดังใน Figure 8 เมื่อมีการปั่นเหวี่ยง ไตรไอโอดด์จะถูกถ่านไปไอโอดีนดูดซับไว้ ส่งผลให้จำนวนโมลของไตรไอโอดด์ลดลง ดังนั้นระบบจะปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่โดยการทำให้ปฏิกิริยากันระหว่างไอโอดีนและไอโอดด์ไปข้างหน้ามากขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (1) กำหนดให้จำนวนโมลที่หายไปของไอโอดีนและไอโอดด์ในระหว่างการปั่นเหวี่ยงมีค่าเท่ากับ  $y$  ทั้งนี้ค่า  $y$  สามารถคำนวณหาได้โดยแทนค่าจำนวนโมลของ  $I_2$   $I^-$  และ  $I_3^-$  ที่ภาวะสมดุลของสารละลายไอโอดีนทดสอบปริมาตร 25 มิลลิลิตรหลังการปั่นเหวี่ยง ดังแสดงใน Figure 8 ลงในสมการที่ (6)

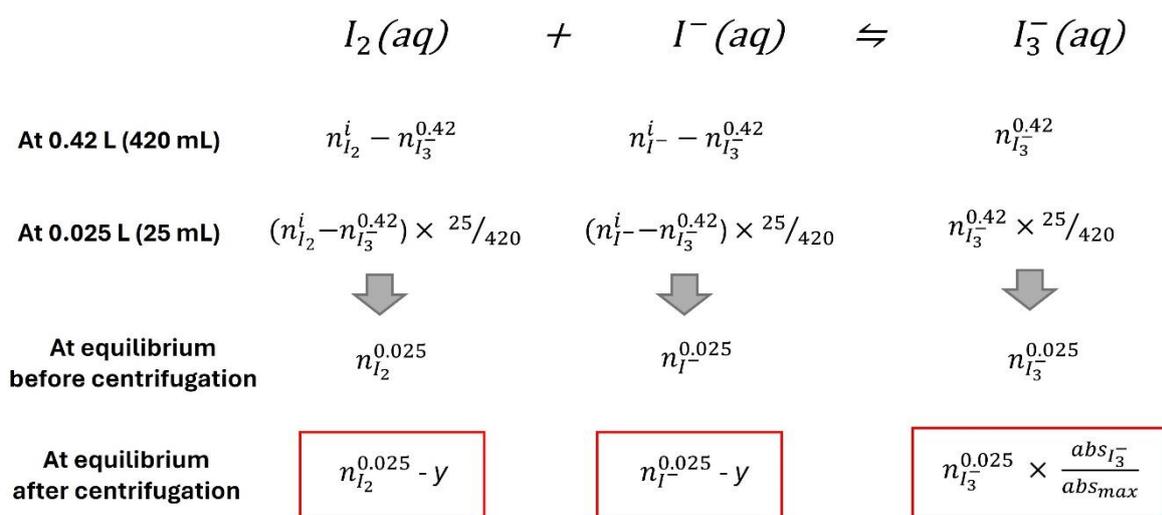


Figure 8 Schematic diagram illustrating number of moles of  $I_2$ ,  $I^-$  and  $I_3^-$  at equilibrium before and after centrifugation

$$K_{eq} = \frac{(V_c)(n_{I_3^-}^{0.025}) \left(\frac{abs_{I_3^-}}{abs_{max}}\right)}{(n_{I_2}^{0.025} - y)(n_{I^-}^{0.025} - y)} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) ค่า  $V_c$  คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนทดสอบที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยง มีค่าเท่ากับ 0.025 ลิตร  $abs_{I_3^-}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของไตรไอโอดด์ที่วัดได้หลังการปั่นเหวี่ยง  $abs_{max}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของไตรไอโอดด์ของสารละลายไอโอดีนทดสอบ 0.0048 โมลาร์ ค่า  $abs_{max}$  ที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 12.5 อย่างไรก็ตามค่า  $abs_{max}$  สามารถคำนวณเชิงประจักษ์ได้จากผลคูณของจำนวนเท่าในการทำเจือจางกับค่าการดูดกลืนแสงของไตรไอโอดด์ที่วัดได้หลังการทำเจือจาง อีกทั้งค่าการดูดกลืนแสงของไตรไอโอดด์ของสารละลายไอโอดีนหลังการปั่นเหวี่ยงที่ยังมีความเข้มข้นสูงหรือใกล้เคียงกับ 0.0048 โมลาร์ สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันกับวิธีข้างต้น หลังจากคำนวณหาค่าของ  $y$  แล้ว สามารถนำค่า  $y$  มาคำนวณหาค่าของจำนวนโมลไอโอดีนที่ภาวะสมดุลหลังการปั่นเหวี่ยง ( $n_{I_2}^{0.025} - y$ ) จากนั้น

นำมาแทนค่าในสมการที่ (7) เพื่อคำนวณหาอัตราการดูดซับไอโอดีนของถ่าน ( $R$ ) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม โดยตัวแปร  $M$  ในสมการที่ (7) คือมวลของถ่านไปไอโอดีนที่ใช้ทดสอบระหว่างการปั่นเหวี่ยงมีหน่วยเป็นกรัม ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดค่า  $M$  เท่ากับ 2 กรัม

$R$  (mg/g)

$$= \frac{\left[\left(\frac{V_c}{V_i}\right)(n_{I_2}^i) - (n_{I_3^-}^{0.025}) \left(\frac{abs_{I_3^-}}{abs_{max}}\right) - (n_{I_2}^{0.025} - y)\right] \times 253 \times 1,000}{M} \quad (7)$$

### ผลและวิจารณ์

#### การประเมินประสิทธิภาพการดูดซับไอโอดีนของถ่านไปไอโอดีน

ในการคำนวณหาค่า  $K_{eq}$  ของสมการที่ (1) ค่า  $abs_{I_2}$  และ  $abs_{I^-}$  วัดได้จากเครื่อง spectrophotometer เท่ากับ

1.362 และ 0.176 ตามลำดับ โดยค่าการดูดกลืนแสงทั้งสองค่าข้างต้นวัดจากสารละลายไอโอดีนทดสอบ 0.0048 โมลาร์ ที่ทำการเจือจาง 10 เท่า (10-fold dilution) หลังจากแทนค่า  $abs_1$  และ  $abs_2$  ลงในสมการที่ (3)  $n_{I_3}$  มีค่าเท่ากับ 0.000036 โมล และ  $k_{eq}$  มีค่าเท่ากับ 312 โมลาร์<sup>-1</sup> เมื่อพิจารณาสารละลายไอโอดีนทดสอบปริมาตร 25 มิลลิลิตรก่อนการปั่นเหวี่ยง พบว่าจำนวนโมลของ  $I_2$ ,  $I^-$  และ  $I_3^-$  ที่ภาวะสมดุล มีค่าเท่ากับ 0.000048 0.000107 และ 0.0000714 โมล ตามลำดับ โดยจำนวนโมลเริ่มต้นของไอโอดีนก่อนการปั่นเหวี่ยงมีค่าเท่ากับ 0.000119 โมล

ในการประเมินประสิทธิภาพการดูดซับไอโอดีน ถ่านไบโอชาร์ 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ( $G_c$ ) ถ่านไบโอชาร์

(การทดลองควบคุม) กลุ่มที่ 2 ( $G_s$ ) ถ่านไบโอชาร์อบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กลุ่มที่ 3 ( $G_p$ ) ถ่านไบโอชาร์ปรับสภาพด้วยพลาสมาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กลุ่มที่ 4 ( $G_{s+p}$ ) ถ่านไบโอชาร์อบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตามด้วยปรับสภาพด้วยพลาสมา 30 นาที ถูกนำมาปั่นเหวี่ยงกับสารละลายไอโอดีนทดสอบ สารละลายไอโอดีนที่ได้หลังปั่นเหวี่ยงถูกนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงของ  $I_3^-$  ที่ 350 นาโนเมตร ( $abs_{I_3^-}$ ) ดังแสดงใน Table 1 ค่า  $abs_{I_3^-}$  ของ  $G_c$ ,  $G_s$ ,  $G_p$  และ  $G_{s+p}$  มีค่าเท่ากับ  $8.74 \pm 2.35$ ,  $0.43 \pm 0.23$ ,  $10.02 \pm 2.04$  และ  $0.99 \pm 0.65$  ตามลำดับ

**Table 1** Absorbance peak ( $abs_{I_3^-}$ ) measured using spectrophotometer at 350 nm representing remaining triiodide ( $I_3^-$ ) after granular biochar in test iodine solution centrifugation

Replications	Biochar (control) ( $G_c$ )	700 °C-treated biochar with steam ( $G_s$ )	Treated biochar with plasma ( $G_p$ )	700 °C-treated biochar with steam + treated biochar with plasma ( $G_{s+p}$ )
1	6.66	0.25	7.67	0.55
2	11.29	0.37	11.18	1.74
3	8.29	0.69	11.23	0.68
<b>Average</b>	<b>8.74</b>	<b>0.43</b>	<b>10.02</b>	<b>0.99</b>
<b>Standard deviation</b>	<b>2.35</b>	<b>0.23</b>	<b>2.04</b>	<b>0.65</b>

สีของสารละลายไอโอดีนหลังการปั่นเหวี่ยงของ  $G_c$ ,  $G_s$ ,  $G_p$  และ  $G_{s+p}$  แสดงดังใน Figure 9 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองใน Table 1 ดังนั้นจากการทดลองนี้  $G_s$  มีประสิทธิภาพในการดูดซับไตรไอโอดด์ได้มากที่สุด ในทาง

ตรงกันข้าม  $G_p$  มีประสิทธิภาพในการดูดซับไตรไอโอดด์ได้น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสีของสารละลายไอโอดีนปรากฏสีจางที่สุดและเข้มที่สุด ดังแสดงใน Figure 9(2) และ Figure 9(3) ตามลำดับ



**Figure 9** Appearance of iodine solution centrifuged for 3 minutes with 2 g of granular biochar (1), 700 °C-treated biochar with steam (2), treated biochar with plasma (3) and 700 °C treated biochar with steam + treated biochar with plasma, with 25 mL of test iodine solution

ในการศึกษานี้ การดูดซับไอโอดีนประเมินจากปริมาณไอโอดีนที่หายไปทั้งหมดเทียบกับปริมาณไอโอดีนตั้งต้นก่อนการบ่มเหวียง โดยใช้แบบจำลองที่กำหนดให้ปริมาณไอโอดีนที่หายไปเป็นเพราะถูกทำปฏิกิริยาให้กลายเป็นไตรไอโอดด์ที่ภาวะสมดุลและส่วนหนึ่งหายไปเพราะไตรไอโอดด์ถูกถ่านดูดซับไว้ โดยไม่พิจารณาการระเหิดและการทำปฏิกิริยาในรูปแบบอื่นของไอโอดีน จากการประเมินอัตราการดูดซับไอโอดีน ( $R$ ) พบว่า อัตราการดูดซับไอโอดีนของ  $G_c$ ,  $G_s$ ,  $G_p$  และ  $G_{s+p}$  มีค่าเท่ากับ  $3.68 \pm 1.38$ ,  $14.38 \pm 0.13$ ,  $2.24 \pm 1.20$  และ  $13.51 \pm 0.38$  มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงใน

Figure 10 ภายใต้อุณหภูมิการบ่มเหวียงกับสารละลายไอโอดีนทดสอบเป็นเวลา 3 นาที จากผลการทดลองนี้พบว่า การอบถ่านไปโอชาร์ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไอโอดีนเป็น 3.9 เท่าเมื่อเทียบกับ  $G_c$  ในทางตรงกันข้ามถ่านไปโอชาร์ปรับสภาพด้วยพลาสมาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ลดประสิทธิภาพการดูดซับไอโอดีนเป็น 0.6 เท่าเมื่อเทียบกับ  $G_c$  และการปรับสภาพถ่านไปโอชาร์ที่อบไอน้ำอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ด้วยพลาสมาเป็นเวลา 30 นาที ลดประสิทธิภาพการดูดซับไอโอดีนเป็น 0.94 เท่าเมื่อเทียบกับ  $G_s$

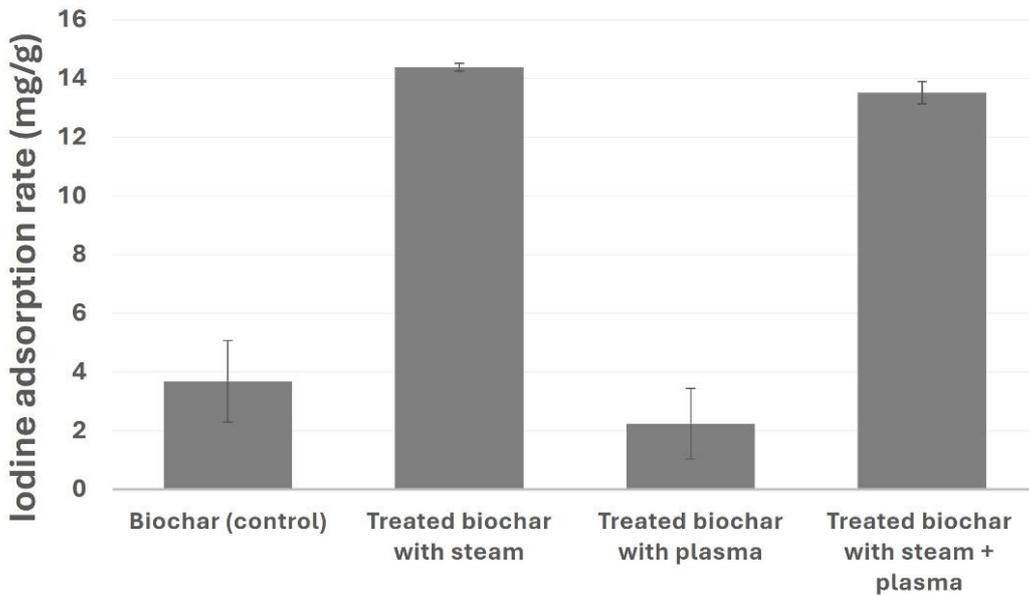


Figure 10 Bar chart of iodine adsorption rate versus types of activated granular biochar

จากผลการทดลองเห็นได้ชัดว่าถ่านไปโอชาร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกระบวนการอบด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับปริมาณไอโอดีนได้เป็นอย่างมาก ทั้งนี้เป็นเพราะที่อุณหภูมิสูง 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำกลายเป็นไอน้ำที่เป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนในถ่าน ส่งผลให้โครงสร้างของถ่านไปโอชาร์ถูกปรับเปลี่ยนให้มีโครงสร้างผสมแบบ  $sp^2$ - $sp^3$  มากขึ้น ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้เป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน (Chae *et al.*, 2021) ดังนั้นด้วยปริมาณรูพรุนที่มากขึ้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ่านไปโอชาร์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยพลาสมามีประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะพลาสมาสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น  $-OH$ ,  $-COOH$ ,  $=CO$  เป็นต้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ทำให้เกิดพื้นผิวออกไซด์ (oxide surface) บนผิวถ่าน หรือทำให้เกิดพื้นผิวที่มีขั้วที่ชอบน้ำ (hydrophilic surface) (Jo *et al.*, 2023) ดังนั้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนลดลงเนื่องจากสภาพเชิง

ขั้วแบบลบบนพื้นผิวออกไซด์มีแรงผลักกันกับประจุลบบนไตรไอโอดด์ อย่างไรก็ตามพื้นผิวถ่านที่ปรับสภาพด้วยพลาสมามีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวกหรือสีย้อมเช่น ตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) โรดามีนบี เป็นต้น (Zhou *et al.*, 2021; Bidaei *et al.*, 2020)

### สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาประสิทธิภาพการดูดซับไอโอดีนของถ่านไปโอชาร์จากเศษกะลามะพร้าวเหลือทิ้งในชุมชน โดยใช้เทคโนโลยีเตาอบไฟฟ้าอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีไอน้ำเป็นสารกระตุ้นภายใต้สภาวะจำกัดอากาศ และเทคโนโลยีอาร์กอนนอนเทอร์มอลพลาสมาความดันบรรยากาศ จากการทดลองพบว่าถ่านไปโอชาร์อบไอน้ำอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นเป็น 3.9 เท่าเมื่อเทียบกับถ่านไปโอชาร์ในการทดลองควบคุม และมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $14.38 \pm 0.13$  มิลลิกรัมต่อกรัม ในทางตรงกันข้าม ถ่านไปโอชาร์ที่ปรับสภาพ

ด้วยพลาสมาที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนลดลงเป็น 0.6 เท่าเมื่อเทียบกับถ่านไบโอชาร์ในการทดลองควบคุมและมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $2.24 \pm 1.20$  มิลลิกรัมต่อกรัม การลดลงนี้เป็นผลมาจากพลาสมาสร้างพื้นผิวออกไซด์ที่ลดประสิทธิภาพการดูดซับไตรไอบีโอดีตของถ่าน การดูดซับไอโอดีนประเมินด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยงถ่านไบโอชาร์ในสารละลายไอโอดีนทดสอบ 0.0048 โมลาร์ เป็นเวลา 3 นาที ในการศึกษาพบว่าถ่านไบโอชาร์ที่ผลิตจากเตาเหล็กหุ้มฉนวนความร้อนขนาด 50 ลิตรสามารถนำมาต่อยอดด้วยการอบไอน้ำที่อุณหภูมิสูงให้เป็นถ่านกัมมันต์ได้ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีอินเทอร์มอลพลาสมาความดันบรรยากาศสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ได้และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำมาประยุกต์ใช้ดูดซับสารประเภทโลหะหนัก สีย้อม ตลอดจนสารประเภทอื่นที่มีประจุบวกหรือแสดงสภาพขั้ว

### คำนิยาม

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติสำหรับการอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

### REFERENCES

- Alcalde-Calonge, A., Saez-Martínez, F.J., Ruiz-Palomino, P. 2022. Evolution of research on circular economy and related trends and topics: A thirteen-year review. **Ecological Informatics**, 70: 101716. doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101716
- Batool, F., Islam, K., Cakiroglu, C., Shahriar, A. 2021. Effectiveness of wood waste sawdust to produce medium-to low-strength concrete materials. **Journal of Building Engineering**, 44: 103237. doi.org/10.1016/j.job.2021.103237
- Bidaei, M.R., Yarahmadi, R., Azadfallah, M. 2020. Effect of surface modification of activated carbon by cold plasma on the adsorption capacity of Rhodamine B. **Iran Occupational Health**, 17: 15.
- Chae, J.S., Kang, W., Roh, K.C. 2021.  $sp^2$ - $sp^3$  Hybrid porous carbon materials applied for supercapacitors. **Energies**, 14: 5990. doi.org/10.3390/en14195990
- Changjia, J., Shuang, C., Qing, H., Ping, L., Qikai, Z., Jianhui, S., Mingrui, L. 2019. Study on application of activated carbon in water treatment. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, 237: 022049. doi:10.1088/1755-1315/237/2/022049
- Chaturvedi, K., Singhwane, A., Dhangar, M., Mili, M., Gorhae, N., Naik, A., Prashant, N., Srivastava, A.K., Verma, S. 2023. Bamboo for producing charcoal and biochar for versatile applications. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 14: 15159-15185. doi.org/10.1007/s13399-022-03715-3
- Chen, X., Magniez, K., Zhang, P., Kujawski, W., Chen, Z., Dumée, L.F. 2023. A “green” stirring plasma functionalization strategy for controllable oxygen-containing functional groups on octamethyl POSS microstructure. **Nanomaterials**, 13(20): 2770. doi.org/10.3390/nano13202770
- Chooklin, C.S., Sagulsawasdipan, K., Klompong, N., Pechkaw, W., Promkere, S., Tokjeentong, P. 2023. Production of biochar from coconut shells and the potential to affect soil quality improvement for cultivation of eggplant. **Journal of Graduate Research Development and Innovation**, 1(1): 42-52. (in Thai)
- Cosme, F., Ines, A., Silva, D., Filipe-Ribeiro, L., Abrunhosa, L., Nunes, F.M. 2021. Elimination of ochratoxin a from white and red wines: critical characteristics of activated carbons and impact on wine quality. **LWT - Food Science and Technology**, 140: 110838. doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110838
- Devi, D.S., Kumar, R., Rajak, U. 2021. Plastic waste as a biofuel feedstock- a conceptual study. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 1116: 012029. doi: 10.1088/1757-899X/1116/1/012029
- Du, C., Liu, B., Hu, J., Li, H. 2021. Determination of iodine number of activated carbon by the method of ultraviolet-visible spectroscopy. **Materials Letters**, 285: 129137. doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129137
- Gul, A., Ma'amor, A., Khaligh, N.G., Julkapli, N.M. 2022. Recent advancements in the applications of activated carbon for the heavy metals and dyes removal. **Chemical Engineering Research and Design**, 186: 276-299. doi.org/10.1016/j.cherd.2022.07.051

- Jiwalak, N., Tangsathitkulchai, C., Tangsathitkulchai, M. 2006. Activated carbon from lignite coal by chemical activation with potassium hydroxide. **Suranaree Journal of Science and Technology**, 13(3): 207-218. (in Thai)
- Jo, W., Lim, Y., Kwon, S., Bahk, J., Kim, J., Shin, T., Kim, Y. 2023. Non-thermal atmospheric pressure plasma treatment increases hydrophilicity and promotes cell growth on titanium alloys in vitro. **Scientific Reports**, 13(2023): 14792. doi.org/10.1038/s41598-023-41905-9
- Kajorncheappunngam, S., Polchai, N., Channachai, P., Boontang, M. 2003. Production of activated carbon from coconut shell for heavy metal and dye removal. **KKU Engineering Journal**, 30(4): 295-303. (in Thai)
- Kang, S., Shaffique, S., Kim, L., Kwon, E., Kim, S., Lee, Y., Kalsoom, K., Khan, M.A., Lee, I. 2021. Effects of organic fertilizer mixed with food waste dry powder on the growth of Chinese cabbage seedlings. **Environments**, 8(8): 86. doi.org/10.3390/environments8080086
- Kowitwiwat, A., Sampanpanish, P., Pituya, P. 2019. Leftover *Acacia* wood biomass for remediation of contaminated soil. **Environmental Journal**, 23(4): 1-9. (in Thai)
- Mahanim, S.M.A., Asma, I.W., Rafidah, J., Puad, E., Shaharuddin, H., 2011. Production of activated carbon from industrial bamboo wastes. **Journal of Tropical Forest Science**, 23(4): 417-424.
- Maximoff, S.N., Mittal, R., Kaushik, A., Dhau, J.S. 2022. Performance evaluation of activated carbon sorbents for indoor air purification during normal and wildfire events. **Chemosphere**, 304(2022): 135314. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135314
- Mianowski, A., Owczarek, M., Marecka, A. 2007. Surface area of activated carbon determined by the iodine adsorption number. **Energy Sources**, 29(9): 839-850. doi: 10.1080/00908310500430901
- Oshina, I., Spigulis, J. 2021. Beer-Lambert law for optical tissue diagnostics: Current state of the art and the main limitations. **Journal of Biomedical Optics**, 26(10): 1-17. doi: 10.1117/1.JBO.26.10.100901
- Sajjad, M., Sarwar, R., Ali, T., Khan, L., Mahmood, S.U. 2021. Cosmetic uses of activated charcoal. **International Journal of Community Medicine and Public Health**, 8(9): 4572-4574. doi.org/10.18203/2394-6040.ijcmph20213569
- Shahcheragh, S.K., Mohagheghi, M.M.B., Shirpay, A. 2023. Effect of physical and chemical activation methods on the structure, optical absorbance, band gap and urbach energy of porous activated carbon. **SN Applied Sciences**, 5: 313. doi.org/10.1007/s42452-023-05559-6
- Sornsakdanuphap, J., Suanpoot, P., Kim, Y.J., Choi, E.H. 2017. Electron temperature and density of non-thermal atmospheric pressure argon plasma jet by convective wave packet model. **Journal of the Korean Physical Society**, 70(11): 979-989. doi: 10.3938/jkps.70.979
- Yang, Y., Wang, Y., Wei, S., Wang, X., Zhang, J. 2023. Effects and mechanisms of non-thermal plasma-mediated Ros and its applications in animal husbandry and biomedicine. **International Journal of Molecular Sciences**, 24: 15889. doi.org/10.3390/ijms242115889
- Yang, X., Wei, H., Li, K., He, Q., Xie, J., Zhang, J. 2018. Iodine-enhanced ultrasound degradation of sulfamethazine in water. **Ultrasonics – Sonochemistry**, 42: 759-767. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.045
- Zhou, R., Wang, X., Zhou, R., Weerasinghe, J., Zhang, T., Xin, Y., Wang, H., Cullen, P., Wang, H., Ostrikov, K. 2021. Non-thermal plasma enhances performances of biochar in wastewater treatment and energy storage applications. **Frontiers of Chemical Science and Engineering**, 16: 475-483. doi.org/10.1007/s11705-021-2070-x