

ไบโอชาร์จากจุกไม้คอร์กของลูกแบดมินตันชนิดขนไก่ด้วยกระบวนการ ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

Biochar Production from Shuttlecocks by Hydrothermal Carbonization

บุญญพัฒน์ จินโจ*, นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, วรรัตน์ ปัตตประกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Punyaphat Jinjo, Nurak Gridanurak, Woraratana Pattaraprakorn

Department of Chemical Engineering, Thammasat School of Engineering,

Thammasat University, Pathum Thani 12120

Received 5 September 2023; Received in revised 18 November 2023; Accepted 4 December 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงสภาพจุกไม้คอร์กของลูกแบดมินตันชนิดขนไก่ที่เสียจากกิจกรรมกีฬา ให้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงแข็งหรือไบโอชาร์ ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน โดยศึกษาผลของปัจจัยคือ อุณหภูมิ (180, 200 และ 220 °C), เวลา (30, 60 และ 90 นาที) และอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ (0.05, 0.07 และ 0.10 โดยมวล) พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อร้อยละผลผลิต เวลาเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าพลังงานความร้อน และทั้งสองปัจจัยจะส่งผลร่วมกันต่อร้อยละผลผลิตและค่าพลังงานความร้อน ไบโอชาร์ที่ได้จากการทดลองจะมีปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 28,000-30,000 kJ/kg มีปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง ส่งผลให้อัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C ลดลงเข้าใกล้สัดส่วนอะตอมของถ่านหินกลุ่ม Sporinite และ Cutinite ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงประเภทหุงต้ม โดยมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรมต่อไปคือ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 180-200 °C ระยะเวลา 30 นาที

คำสำคัญ: ไบโอชาร์; ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน; ลูกแบดมินตันชนิดขนไก่; พลังงานเชื้อเพลิง

Abstract

The shuttlecocks discarded from the sports activity were subjected to hydrothermal carbonization under three parameters: temperature (180, 200 and 220 °C), time (30, 60 and 90 min) and solid/water ratio (0.05, 0.07 and 0.10 by wt.). Temperature exhibited a significant effect on yield, time showed a significant effect on higher heating value, while a combination of temperature and time had an effect on both yield and higher heating value. The obtained biochars displayed higher carbon content, with a higher heating value ranging from 28,000 to 30,000 kJ/kg. They exhibited lower hydrogen content, oxygen content, and H/C and O/C atomic ratios, resembling the characteristics of Sporinite and Cutinite coals. This suggests their potential suitability for use as cooking fuel. The optimum conditions for application are within a temperature range 180-200 °C and a time of 30 minutes.

Keywords: Biochar; Hydrothermal carbonization; Shuttlecock; Fuel

1. บทนำ

ในปัจจุบันกีฬาแบดมินตันได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากมีผู้เล่นที่เพิ่มจำนวนมากขึ้น ซึ่งลูกแบดมินตันชนิดขนไก่เป็นอุปกรณ์หลักที่จำเป็นสำหรับการเล่นกีฬาแบดมินตัน คาดว่าตลาดลูกแบดมินตันชนิดขนไก่จะเติบโตอย่างมีนัยสำคัญในทศวรรษหน้า [1] นอกจากนี้ความต้องการอย่างต่อเนื่องจากการแข่งขันระดับชาติและนานาชาติยังช่วยเพิ่มการเติบโตของตลาดลูกแบดมินตันชนิดขนไก่ในปีต่อ ๆ ไป ลูกแบดมินตันชนิดขนไก่ทำมาจากสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ประกอบด้วยขนเป็ดหรือขนห่านจำนวน 16 ขัน [2] ฝังอยู่บนฐานไม้คอร์กกลมที่เป็นชีวมวลโดยใช้ด้ายและกาวขนเหล่านี้เปราะและแตกหักง่าย เนื่องจากการกระทบกับไม้แบดมินตัน เมื่อขนได้รับความเสียหาย จะส่งผลกระทบต่อลูกแบดมินตันชนิดขนไก่ทั้งหมด และทำให้ต้องเปลี่ยนหลายครั้งในระหว่างเกมการแข่งขันหรือการฝึกซ้อม ซึ่งก่อให้เกิดปริมาณขยะเป็นจำนวนมาก ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการจัดการที่เหมาะสม นอกจากการฝังกลบหรือเผาไหม้ร่วมกับขยะอื่น ซึ่งขนส่วนใหญ่จะถูกนำ

ไปบดละเอียด เพื่อผลิตเป็นอาหารสัตว์ ส่วนฐานไม้คอร์กมีองค์ประกอบของคาร์บอน สามารถนำไปบำบัดโดยใช้กระบวนการอื่น ๆ ได้ [3]

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการแปลงสภาพชีวมวลทางเทอร์โมเคมี คือ การไพโรไลซิส (Pyrolysis) การทำให้เป็นแก๊ส (Gasification) ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization) และไฮโดรเทอร์มอลลิควิแฟชัน (Hydrothermal liquefaction) [4] เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของจุกคอร์กจากลูกแบดมินตันชนิดขนไก่ พบว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization) เป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านพลังงาน เนื่องจากมีการใช้อุณหภูมิระดับปานกลาง คือระหว่าง 180-250 °C [5] และมีการใช้ต้นทุนด้านพลังงานในการบำบัดที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งในระหว่างกระบวนการจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การคายน้ำ (Dehydration) ดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) การควบแน่น (Condensation) พอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) และอะโรมาไทเซชัน (Aromatiza-

tion) [6] โดยผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นของแข็งเรียกว่าไบโอชาร์ ซึ่งจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหิน ในแง่ขององค์ประกอบคาร์บอน พันธะเคมี พลังงานความร้อน และผลผลิตพลังงาน ทำให้การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ได้รับความสนใจอย่างมาก ทั้งในแง่ของการเป็นวัสดุที่อุดมไปด้วยคาร์บอน มีศักยภาพในการกักเก็บพลังงาน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [7] โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์เพิ่มมากขึ้น วัตถุประสงค์ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยชีวมวลลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ของเสียทางการเกษตร [8] เศษอาหาร [9, 10] กากตะกอนน้ำเสีย [11, 12] สารตกค้างจากสาหร่ายและสัตว์น้ำ [13] และมูลสัตว์ [14] Libra และคณะ [15] และ Reza และคณะ [16] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเทคนิคและผลกระทบต่อการผลิตไบโอชาร์ และยังกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ในการปรับปรุงดิน Kambo และคณะ [17] และ Zhao และคณะ [18] ได้ศึกษาถึงลักษณะของการผลิตไบโอชาร์และประโยชน์ของไบโอชาร์ที่มาจากขยะชีวมวลในฐานะเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่สะอาดจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การผลิตไบโอชาร์จากจุกไม้คอร์กเหลือทิ้งของลูกแบดมินตันชนิดขนไก่ให้เป็นแหล่งพลังงาน ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน เพื่อช่วยลดการจัดการของเสียร่วมกับวิธีการอื่น ๆ ให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักหรือไบโอชาร์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและค่าพลังงานความร้อนที่เหมาะสม ภายใต้

การกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ โดยจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอชาร์ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการดำเนินวิจัย

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำลูกแบดมินตันมาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนออกจากกัน ได้แก่ ส่วนขนและส่วนหัว ซึ่งนำส่วนหัวที่เป็นจุกไม้คอร์กมาปั่นบดละเอียดให้ได้ขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน โดยเอาวัตถุดิบผสมกับน้ำปราศจากไอออนให้ได้อัตราส่วน (0.05, 0.07 และ 0.10) บรรจุลงในถ้วยปฏิกรณ์ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วประกอบเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์รับความดันให้แน่นสนิท (Figure 1) เพื่อให้แน่ใจว่าสภาพแวดล้อมปราศจากอากาศ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ Parr instrument รุ่น 4848 reactor controller โดยกำหนดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (180, 200 และ 220 °C) เมื่ออุณหภูมิถึงเป้าหมาย เริ่มจับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (30, 60 และ 90 นาที) จากนั้นปิดเตาความร้อนเมื่อเวลาครบตามกำหนด แล้วปล่อยให้เครื่องปฏิกรณ์เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มากรองแยกส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวออกจากกัน นำผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของแข็งหรือไบโอชาร์ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

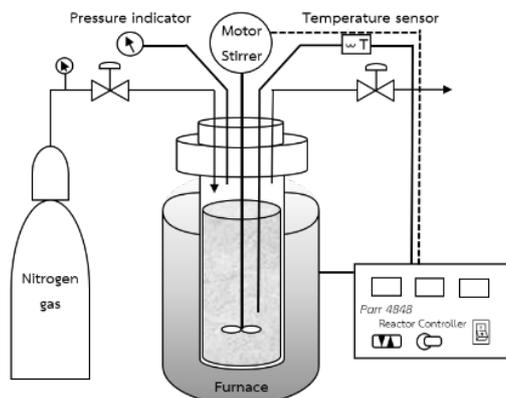


Figure 1 Hydrothermal carbonization reactor.

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองใช้รูปแบบแฟคทอเรียล (Factorial) และกำหนดปัจจัยที่ทำการศึกษารวม 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่ 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิ (180, 200 และ 220 °C), เวลา (30, 60 และ 90 นาที) และอัตราส่วน (0.05, 0.07 และ 0.10 โดยมวล) จึงได้จำนวนการทดลองออกมาทั้งหมด 27 การทดลอง (Table 1)

2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอชาร์

2.3.1 วิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน (Higher heating value: HHV) โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter รุ่น IKA C6000 ISOPERIBOL นำสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์บรรจุลงในลูกบอมบ์ จากนั้นนำลูกบอมบ์ใส่ไปในเครื่องบอมบ์ และกรอกปริมาณน้ำหนักสารตัวอย่าง เครื่องจะทำการวิเคราะห์และให้ผลออกมาในหน่วย kJ/kg

2.3.2 วิเคราะห์หาปริมาณธาตุ CHN โดยใช้เครื่อง CHN Analyzer รุ่น LECO CHN628 โดยนำสารตัวอย่างบรรจุลงใน Tin foil cup และชั่งน้ำหนักสารตัวอย่าง จากนั้นทำการปิดปาก แล้วนำไปใส่ใน Autosampler เพื่อทำการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์จะออกมาในหน่วยปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก

การคำนวณหาร้อยละผลผลิต (Yield)

$$\% \text{ Yield} = (M_b / M_{mm}) * 100 \quad (1)$$

โดยที่ % Yield คือ ร้อยละผลผลิต (%)

M_b คือ น้ำหนักของไบโอชาร์ (กรัม)

M_{mm} คือ น้ำหนักของวัตถุดิบ (กรัม)

การคำนวณหาผลผลิตพลังงาน (Energy yield)

$$\% \text{ Energy yield} = \% \text{ Yield} * (HHV_b / HHV_{mm}) \quad (2)$$

โดยที่ % Energy yield คือ ผลผลิตพลังงาน (%)

% Yield คือ ร้อยละผลผลิต (%)

HHV_b คือ ค่าพลังงานความร้อนของไบโอชาร์ (kJ/kg)

HHV_{mm} คือ ค่าพลังงานความร้อนของวัตถุดิบ (kJ/kg)

การคำนวณหาสัดส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และ ออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C)

$$H/C = (W_H / 1) / (W_C / 12) \quad (3)$$

$$O/C = (W_O / 16) / (W_C / 12) \quad (4)$$

โดยที่ H/C คือ ส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน

O/C คือ ส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอน

W_H , W_O , W_C คือ ร้อยละปริมาณไฮโดรเจน, ออกซิเจน และคาร์บอน (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับ

2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเชิงวิศวกรรม เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อผลลัพธ์ที่ทำการศึกษา ก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูลได้ทดสอบการกระจายตัว ความเป็นอิสระ และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้นั้นมีคุณภาพและความน่าเชื่อถือหรือไม่ จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนต่อไป โดยใช้โปรแกรม Minitab รุ่น 21 [19]

3. ผลการวิจัย

3.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัตถุดิบ พบว่ามีค่าพลังงานความร้อน (Higher heating value, HHV) อยู่ที่ 22,127 kJ/kg (Table 1) ซึ่งใกล้เคียงกับชีวมวลอื่น ๆ ได้แก่ Wheat straw, Coconut husk, Loblolly pine และ Tobacco stalk ที่มีค่าพลังงานความร้อนอยู่ระหว่าง 20,000-25,000 kJ/kg [20] ส่วนองค์ประกอบประมาณ (Proximate analysis) มีค่า Volatile matter = 75%, Fixed carbon = 20% และ

Ash content = 4-5% [21] ถึงแม้ว่า Fixed carbon จะมีค่าต่ำ ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับการนำมาทำการศึกษาเพื่อแปลงสภาพเป็นไบโอชาร์ แต่เนื่องจากไม้คอร์กมีความหนาแน่นต่ำ (270-320 kg/m³) คือต่ำกว่าไม้ปกติ (กลุ่มไม้ Walnut, Mahogany และ Oak ที่มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 600-900 kg/m³) อยู่ 2-3 เท่า [22] ทำให้มีความสามารถในการที่จะนำมาทำการศึกษาได้ และมีการหาปริมาณคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในการที่จะประยุกต์เป็นไบโอชาร์ พบว่ามีปริมาณคาร์บอนอยู่ที่ 51.18% และมีปริมาณไฮโดรเจนอยู่ที่ 6.56% โดยมีอัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C อยู่ที่ 1.54 และ 0.51 ตามลำดับ (Table 1) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับถ่านหินพีท (Peat), ลิกไนต์ (Lignite) และ บิทูมินัส (Bituminous) ที่มีค่าอัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C อยู่ระหว่าง 0.7-1.4 และ 0.1-0.5 ตามลำดับ [20] พบว่าหากสามารถกำจัดไฮโดรเจน และออกซิเจนออกไปได้ จะสามารถแปลงสภาพวัตถุดิบให้เป็นไบโอชาร์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานด้านพลังงานเชื้อเพลิงต่อไป

Table 1 Chemical properties of raw material and biochar.

Properties	Raw material	Biochar (Mean)
Carbon (%wt)	51.18	65.21
Hydrogen (%wt)	6.56	7.45
Oxygen (%wt)	34.54	25.64
Nitrogen (%wt)	6.76	1.61
H/C Atomic ratio	1.54	1.38
O/C Atomic ratio	0.51	0.30
Higher heating value (kJ/kg)	22,127	28,780

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติวิศวกรรม

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วน ที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต ค่าพลังงานความร้อน และผลผลิต

พลังงาน โดยเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมต่อไป จากข้อมูลผลการทดลองภายใต้สภาวะต่าง ๆ (Table 2) พบว่าปริมาณร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์มีค่าสูงสุดคือ

77.48% อยู่ในการทดลองที่ 8 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 90 นาที และค่าต่ำสุดอยู่ในการทดลองที่ 22 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 60 นาที โดยมีร้อยละผลผลิตคือ 59.05% ในขณะที่ค่าพลังงานความ

ร้อนมีค่ามากที่สุดคือ 30,167 kJ/kg อยู่ในการทดลองที่ 27 ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 90 นาที ส่วนค่าผลผลิตพลังงานมีค่ามากที่สุดคือ 99.66% ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 90 นาที

Table 2 Experimental design and response.

Experiment order	Temp (°C)	Time (min)	Ratio	Yield (%)	Higher heating value (kJ/kg)	Energy yield (%)
1	180	30	0.10	73.62	28,473	94.74
2	180	30	0.07	75.91	28,522	97.85
3	180	30	0.05	77.36	28,176	98.50
4	180	60	0.10	73.43	28,087	93.21
5	180	60	0.07	75.37	28,099	95.72
6	180	60	0.05	68.19	28,293	87.19
7	180	90	0.10	74.22	29,713	99.66
8	180	90	0.07	77.48	28,069	98.29
9	180	90	0.05	71.48	28,984	93.63
10	200	30	0.10	75.38	28,770	98.02
11	200	30	0.07	66.97	28,988	87.74
12	200	30	0.05	68.96	29,051	90.54
13	200	60	0.10	68.90	29,691	92.45
14	200	60	0.07	73.43	28,796	95.56
15	200	60	0.05	67.81	29,330	89.88
16	200	90	0.10	67.73	29,584	90.56
17	200	90	0.07	69.87	29,567	93.37
18	200	90	0.05	71.75	28,874	93.63
19	220	30	0.10	66.53	26,990	81.15
20	220	30	0.07	62.85	27,192	77.24
21	220	30	0.05	59.15	27,293	72.96
22	220	60	0.10	59.05	27,521	73.45
23	220	60	0.07	66.35	29,502	88.46
24	220	60	0.05	65.78	29,639	88.11
25	220	90	0.10	70.96	30,073	96.44
26	220	90	0.07	60.81	29,637	81.45
27	220	90	0.05	66.39	30,167	90.51

Table 3 ANOVA for response general factorial model.

Sources	Yields					HHV				
	DF	Adj SS	Adj MS	F-Values	P-Values	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	18	569.51	31.64	1.80	0.199	18	18478546	1026586	3.60	0.035
Linear	6	467.69	77.95	4.44	0.028	6	9433638	1572273	5.51	0.015
Temp	2	447.05	223.52	12.74	0.003	2	2330763	1165381	4.09	0.060
Time	2	8.90	4.45	0.25	0.782	2	6985870	3492935	12.25	0.004
Ratio	2	11.74	5.87	0.33	0.725	2	117006	58503	0.21	0.819
2-Way Interactions	12	101.82	8.49	0.48	0.876	12	9044908	753742	2.64	0.088
Temp*Time	4	24.90	6.23	0.35	0.834	4	6194802	1548700	5.43	0.021
Temp*Ratio	4	21.82	5.46	0.31	0.863	4	1532158	383039	1.34	0.334
Time*Ratio	4	55.10	13.78	0.79	0.566	4	1317949	329487	1.16	0.398
Error	8	140.37	17.55			8	2281301	285163		
Total	26	709.89				26	20759847			

3.2.1 อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต (Yield)

Table 3 แสดงค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต โดยพบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อร้อยละผลผลิตของไบโอชาร์ เนื่องจากมีค่าทดสอบ P-value = 0.003 ซึ่งน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้ ($\alpha = 0.05$) ส่วนปัจจัยของเวลาและอัตราส่วนมีค่าทดสอบ P-value เท่ากับ 0.782 และ 0.725 ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองปัจจัยมีค่าทดสอบมากกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้ จึงอธิบายได้ว่าปัจจัยของเวลาและอัตราส่วนไม่ค่อยมีผลกระทบโดยตรงต่อร้อยละผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ

Figure 2a. แสดงให้เห็นอิทธิพลของตัวแปรทุกตัวต่อร้อยละผลผลิต ปัจจัยแรกคืออุณหภูมิพบว่ากราฟมีลักษณะลดลงเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้น อธิบายได้ว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 180 °C มีปริมาณร้อยละผลผลิตมากกว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 220 °C อย่างเห็นได้ชัด เป็นผลมาจากสารประกอบต่าง ๆ ในชีวมวลจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และอะโรมาไทเซชันที่ต่ำ

อีกทั้งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 200°C ลิกโนเซลลูโลสจะเริ่มถูกไฮโดรไลซ์ ทำให้พันธะของโมเลกุลแตกออกเพื่อสร้างสารประกอบชั้นกลางที่มีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้กลายเป็นของเหลวและแก๊ส ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือไบโอชาร์จึงลดจำนวนน้อยลง [23] ในส่วนของเวลาและอัตราส่วนพบว่ากราฟมีลักษณะค่อนข้างคงที่ เมื่อเวลาและอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น อธิบายได้ว่าเวลาและอัตราส่วนในการทำปฏิกิริยาไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อร้อยละผลผลิตอย่างเห็นได้ชัด

การวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต (Figure 2b.) พบว่าลักษณะเส้นกราฟของอุณหภูมิตั้งกับปัจจัยต่าง ๆ คืออุณหภูมิตั้งกับเวลา และอุณหภูมิตั้งกับอัตราส่วน มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าเป็นปัจจัยร่วมที่มีผลโดยตรงต่อร้อยละผลผลิตอย่างเห็นได้ชัด ส่วนปัจจัยร่วมระหว่างเวลากับอัตราส่วน ลักษณะของเส้นกราฟมีการจัดเรียงตัวในระนาบแนวนอนค่อนข้างคงที่ เมื่อเวลาและอัตราส่วนเพิ่มมากขึ้น แสดงถึงการเป็นปัจจัยร่วมที่ไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อร้อยละผลผลิตอย่างเห็นได้ชัด

การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis) ของร้อยละผลผลิตกับปัจจัยต่าง ๆ ในการทดลอง พบว่าปัจจัยของเวลาและอัตราส่วนไม่มีนัยสำคัญต่อร้อยละผลผลิต ถ้าหากตัดทั้งสองปัจจัยออกไปจากการวิเคราะห์ จะทำให้ค่า R^2 มีค่าที่ต่ำมาก โดยลดลงจากเดิม

80.23% เหลือ 35.75% ดังนั้นจึงควรที่จะยังคงปัจจัยของเวลาไว้ด้วย เนื่องจากเวลาส่งผลร่วมกับปัจจัยของอุณหภูมิต่อร้อยละผลผลิตที่ได้ โดยจะทำให้ค่า R^2 ที่ได้มีค่าเท่ากับ 62.37% (Table 4)

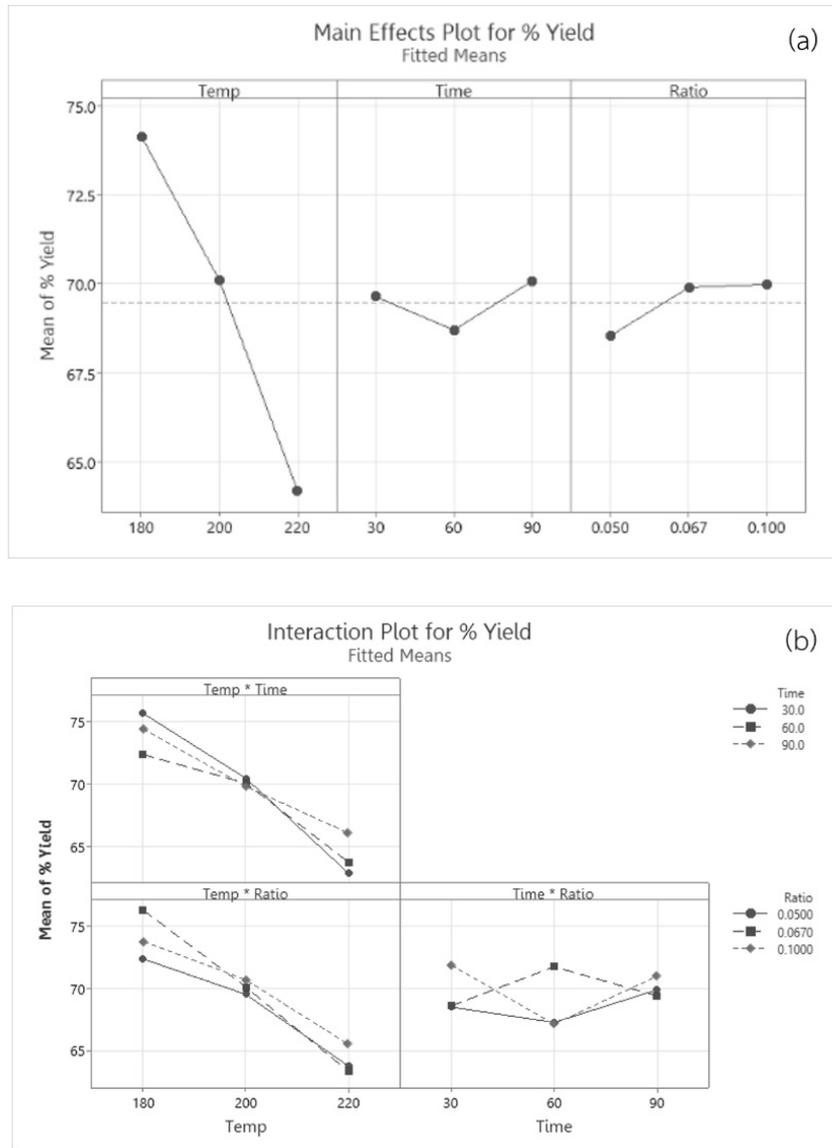


Figure 2 Effect of parameters for yield. (a) main effect, (b) interaction effect.

Table 4 Model summary of regression.

Responses	Models	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
Yield	General factorial	4.189	80.23%	35.73%	0.00%
	Analysis	3.336	62.37%	59.24%	51.85%
HHV	General factorial	534.006	89.01%	64.29%	0.00%

3.2.2 อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อน (Higher heating value)

Table 3 แสดงค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อน โดยพบว่าปัจจัยของเวลามีค่าทดสอบ p -value = 0.004 ซึ่งมีค่าทดสอบน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้ ($\alpha = 0.05$) ส่วนปัจจัยของอุณหภูมิและอัตราส่วนมีค่าทดสอบ p -value เท่ากับ 0.060 และ 0.819 ซึ่งพบว่าทั้งสองปัจจัยมีค่าทดสอบมากกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนดไว้ จึงสรุปได้ว่าปัจจัยของเวลามีผลกระทบโดยตรงต่อค่าพลังงานความร้อน ส่วนปัจจัยของอุณหภูมิและอัตราส่วนไม่ค่อยมีผลกระทบต่อค่าพลังงานความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ

Figure 3a. แสดงถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อน ปัจจัยแรกคืออุณหภูมิพบว่ากราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดจะพบว่า ค่าพลังงานความร้อนสูงสุดคือ 29,200 kJ/kg และค่าพลังงานความร้อนต่ำสุดคือ 28,500 kJ/kg ซึ่งทั้งสองค่ามีความแตกต่างกันไม่มาก (โดยมีผลต่างอยู่ที่ 2.4%) ปัจจัยต่อมาคือเวลาพบว่ากราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลายาวนานขึ้น แสดงว่าเวลามีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานความร้อนอย่างเห็นได้ชัด ส่วนปัจจัยของอัตราส่วนเส้นกราฟมีลักษณะลดลงและเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่าค่าพลังงานความร้อนสูงสุดคือ 28,850 kJ/

kg และค่าพลังงานความร้อนต่ำสุดคือ 28,780 kJ/kg ซึ่งทั้งสองค่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย (โดยมีผลต่างอยู่ที่ 0.3%) ทำให้สรุปได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมิและอัตราส่วนไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อค่าพลังงานความร้อนอย่างชัดเจน

การวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อน (Figure 3b.) พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างเวลามีผลต่อค่าพลังงานความร้อนอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะปัจจัยร่วมระหว่างเวลากับอุณหภูมิเป็นปัจจัยร่วมสำคัญที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนเมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นและระยะเวลาที่ยาวนานมากขึ้น ค่าพลังงานความร้อนของไบโอชาร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 22,127 kJ/kg (ของวัตถุดิบ) เป็น 30,167 kJ/kg ภายใต้อุณหภูมิในการทดลอง 220 °C เป็นเวลา 90 นาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานความร้อนของถ่านหิน Anthracite และ Bituminous [24] ส่วนปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วน เป็นปัจจัยร่วมที่ไม่ค่อยมีผลต่อค่าพลังงานความร้อนอย่างเห็นได้ชัด

การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis) ของค่าพลังงานความร้อนกับปัจจัยต่าง ๆ ในการทดลอง พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิและอัตราส่วนไม่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้สามารถตัดทั้งสองปัจจัยดังกล่าวออกจากการวิเคราะห์ไปได้ ซึ่งจะทำให้ค่า R^2 มีค่าลดลงจาก 89.01% เป็น 64.29% (Table 4)

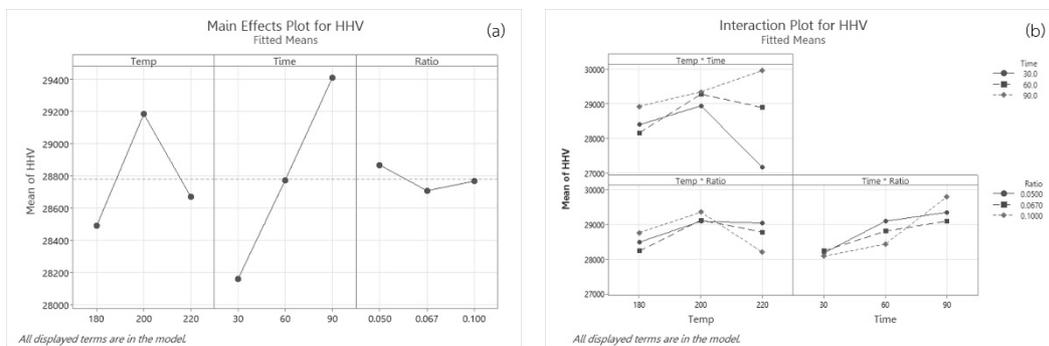


Figure 3 Effect of parameters for HHV. (a) main effect, (b) interaction effect.

3.3 การวิเคราะห์ความเป็นถ่านหิน และความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน

คุณสมบัติของไบโอชาร์ที่ได้จากการทดลองผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน จะมีค่าพลังงานความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น มีปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับวัตถุดิบ มีปริมาณคาร์บอนสูงซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก บ่งบอกถึงความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านพลังงานเชื้อเพลิง โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันค่อนข้างซับซ้อน และเป็นปฏิกิริยาแบบคายพลังงาน ที่เกี่ยวข้องกับกลไกไฮโดรไลซิส การคายน้ำ ดีคาร์บอกซิ

เลชัน การควบแน่น พอลิเมอร์ไรเซชัน และอะโรมาไทเซชัน ภายใต้อุณหภูมิระดับปานกลางและความดันสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นเป็น 220 °C อัตราส่วนอะตอมของ H/C และ O/C จะลดต่ำลงจาก 1.54 และ 0.51 เป็น 1.34 และ 0.22 ตามลำดับเมื่อเทียบกับวัตถุดิบ ซึ่งเข้าใกล้บริเวณที่เป็นสัดส่วนอะตอมของถ่านหินประเภท Sporinite และ Cutinite ซึ่งเป็นถ่านหินที่มีรูพรุนแบบหลวมๆ (Pores และ Sponge) ทั้งแบบ Micropores และ Mesopores ลักษณะเช่นนี้จึงเหมาะกับการต้มหุง [25] (Figure 4)

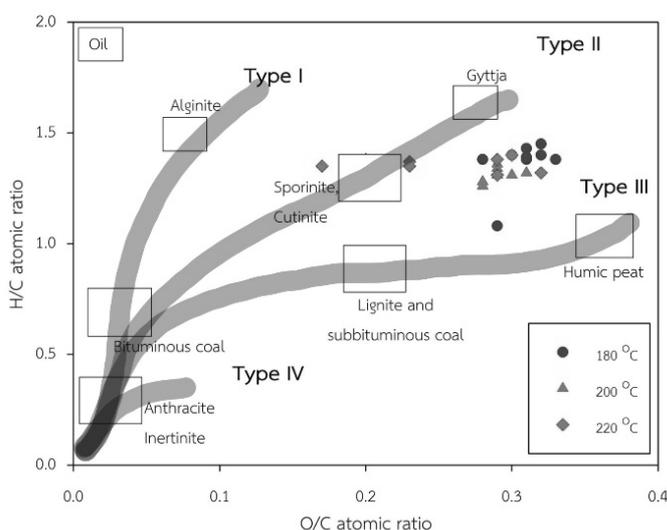


Figure 4 Van Krevelen diagram. (Modified from Clara and Marco, 2021) [25]

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพทางพลังงานของไบโอชาร์ เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรม จึงได้มีการนำผลผลิตพลังงานมาวิเคราะห์ร่วมด้วย ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาที่สัมพันธ์กันระหว่างร้อยละผลผลิตและค่าพลังงานความร้อน โดยอ้างอิงข้อมูลจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองประกอบ ซึ่งพบว่าผลผลิตพลังงานจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองสูงขึ้น โดยเวลา

มีผลเพียงเล็กน้อยและไม่ได้มีผลกระทบอย่างชัดเจน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดลองมีอยู่อย่างจำกัด และความแตกต่างของระยะเวลาไม่มากพอที่จะสังเกตเห็นได้จากการทดลอง ผลผลิตพลังงานส่วนใหญ่มีค่าสูงในช่วงอุณหภูมิ 180 °C โดยมีค่ามากที่สุดคือ 99.66% ที่เวลา 90 นาที และมีค่าน้อยสุดคือ 72.96% อยู่ในช่วงของอุณหภูมิ 220 °C ที่เวลา 30 นาที โดยอัตราส่วนไม่ได้มีผลกระทบต่อผลผลิตพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ (Figure 5)

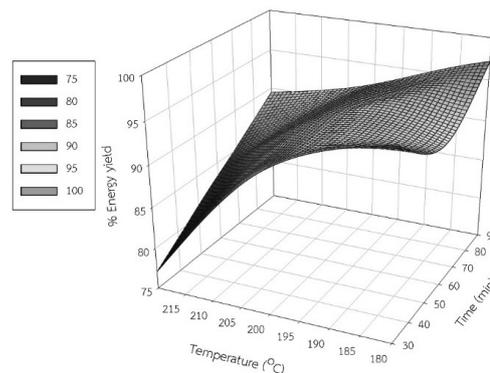


Figure 5 Response of energy yield in biochar.

โดยสรุปอุณหภูมิถือเป็นปัจจัยหลักสำคัญของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต และเวลาเป็นปัจจัยหลักสำคัญที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อน โดยทั้งสองปัจจัยเป็นปัจจัยร่วมสำคัญที่มีผล

ต่อร้อยละผลผลิตและค่าพลังงานความร้อนด้วยเช่นกัน ในการจะนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรมเพื่อเป็นพลังงานเชื้อเพลิง ควรคำนึงต้นทุนของการใช้พลังงานด้านอื่น ๆ ร่วมด้วย เพื่อให้ได้ไบโอชาร์ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไปคือช่วงอุณหภูมิระหว่าง 180-200 °C ระยะเวลาประมาณ 30 นาที โดยอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำไม่ได้มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองเกี่ยวกับการแปลงสภาพจุกคอร์กลูกแบดมินตันชนิดขนไก่เพื่อเป็นไบโอชาร์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน พบว่าหาก

จะนำมาทำการทดลองต้องใช้ปริมาณที่มากกว่าชีวมวลทั่วไปอยู่ 2-3 เท่า โดยไบโอชาร์ที่ได้จะมีปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าพลังงานความร้อนที่สูงขึ้น มีค่ามากที่สุดคือ 30,167 kJ/kg มีปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลง โดยมีอัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C ที่ต่ำสุดอยู่ระหว่าง 1.34-1.37 และ 0.17-0.23 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้สัดส่วนอะตอมของถ่านหินประเภท Sporinite และ Cutinite ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์เป็นพลังงานเชื้อเพลิงประเภทหุงต้ม โดยมีสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรมต่อไปคืออุณหภูมิช่วงระหว่าง 180-200 °C ระยะเวลา 30 นาที

5. ข้อเสนอแนะ

ส่วนขนของลูกแบดมินตันชนิดขนไก่ไม่ได้นำมาทำการศึกษา เนื่องจากมีปริมาณ Fix carbon, Volatile matter และ Ash content ที่ต่ำมาก ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังทำการทดลองได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

7. References

- [1] Liang, H., 2021, A visit to the township that produces 60 million badminton shuttlecocks a year, Available Source: <http://en.people.cn/n3/2021/0811/c90000-9882629.html>, April 10, 2022.
- [2] Whittemore, F., 2018, Badminton Equipment Regulations, Available Source: <https://www.sportsrec.com/5590266/badminton-equipment-regulations>, May 10, 2022.
- [3] Sen, U., Martins, M., Santos, Ev, Lemos, M., Lemos, F. and Pereira, H., 2022, Slow Pyrolysis of Quercus cerris Cork: Characterization of Biochars and Pyrolysis Volatiles, *Environments*. 10(1).
- [4] Thallada, B. and Ashok, P., *Advances in Thermochemical Conversion of Biomass - Introduction, in Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass*, Elsevier USA. p. 3-30.
- [5] Phillip, S., 1999, Organic chemical reactions in supercritical water, *Chemical reviews*. 99(2).
- [6] Tanveer, A., Hyun, K., Arun, G., Saidatul, J. and Rajan, J., 2018, Synthesis and characterization of carbon microspheres from rubber wood by hydrothermal carbonization, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 94(5): 1374-1383.
- [7] Hoekman, K., Broch, A., Robbins, C., Zielinska, B. and Felix, L., 2012, Hydrothermal carbonization (HTC) of selected woody and herbaceous biomass feedstocks, *Biomass Convers. Biorefin.* 3(2): 113-126.
- [8] Stefan, A., Andre, P., Steffen, T., Horst, S., Michael, F. and Gerd, W., 2013, Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil, *Geoderma*. 202-203: 183-191.
- [9] Erdogan, E., Atila, B., Mumme, J., Reza, T., Toptas, A., Elibol, M. and Yanik, J., 2015, Characterization of products from hydrothermal carbonization of orange pomace including anaerobic digestibility of process liquor, *Bioresour Technol.* 196: 35-42.
- [10] Parshetti, G., Chowdhury, S. and Balasubramanian, R., 2014, Hydrothermal conversion of urban food waste to chars for removal of textile dyes from contaminated waters, *Bioresour Technol.* 161: 310-9.
- [11] Parshetti, G., Liu, Z., Jain, A., Srinivasan, M. and Balasubramanian, R., 2013, Hydrothermal carbonization of sewage sludge for energy production with coal, *Fuel*. 111: 201-210.

- [12] Alatalo, S., Repo, E., Makila, E., Salonen, J., Vakkilainen, E. and Sillanpaa, M., 2013, Adsorption behavior of hydrothermally treated municipal sludge & pulp and paper industry sludge, *Bioresour Technol.* 147: 71-76.
- [13] Du, Z., Hu, B., Shi, A., Ma, X., Cheng, Y., Chen, P., Liu, Y., Lin, X. and Ruan, R., 2012, Cultivation of a microalga *Chlorella vulgaris* using recycled aqueous phase nutrients from hydrothermal carbonization process, *Bioresour Technol.* 126: 354-7.
- [14] Heilmann, S., Molde, J., Timler, J., Wood, B., Mikula, A., Vozhdayev, G., Colosky, E., Spokas, K. and Valentas, K., 2014, Phosphorus reclamation through hydrothermal carbonization of animal manures, *Environ. Sci. Technol.* 48(17): 10323-9.
- [15] Judy, L., Kyoung, R., Claudia, K., Axel, F., Nicole, B., York, N., Maria-Magdalena, T., Christoph, F., Oliver, B., Jürgen, K. and Karl-Heinz, E., 2011, Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis, *Biofuels.* 2(1): 71-106.
- [16] Reza, T., Andert, J., Wirth, B., Busch, D., Pielert, J., Lynam, J. and Mumme, J., 2014, Hydrothermal Carbonization of Biomass for Energy and Crop Production, *Applied Bioenergy.* 1(1).
- [17] Harpreet, K. and Animesh, D., 2015, A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 45: 359-378.
- [18] Peitao, Z., Yafei, S., Shifu, G., Zhenqian, C. and Kunio, Y., 2014, Clean solid biofuel production from high moisture content waste biomass employing hydrothermal treatment, *Appl. Energy.* 131: 345-367.
- [19] Minitab, LLC. (n.d.), Minitab Statistical Software (Version 21) [Computer software], Available Source: <https://www.minitab.com/en-us/products/minitab/free-trial/>.
- [20] Lachos-Perez, D., Torres-Mayanga, P., Abaide, E. R., Zobot, G. L. and Castilhos, F., 2022, Hydrothermal carbonization and Liquefaction: differences, progress, challenges, and opportunities, *Bioresour Technol.* 343.
- [21] Montero, I., Miranda, T., Sepulveda, F. J., Arranz, J. I. and Nogales, S., 2014, Analysis of Pelletizing of Granulometric Separation Powder from Cork Industries, *Materials (Basel).* 7(9): 6686-6700.
- [22] John, M., 2018, Density of wood in kg/m³, g/cm³, lb/ft³ - the ultimate guide, Available Source: <https://www.engineeringclicks.com/density-of-wood/>, July 25, 2023.
- [23] Kang, K., Nanda, S., Sun, G., Qiu, L., Gu, Y., Zhang, T., Zhu, M. and Sun, R., 2019, Microwave-assisted hydrothermal carbonization of corn stalk for solid biofuel production: Optimization of process parameters and characterization of hydrochar, *Energy.* 186.
- [24] Sattasathuchana, S., Parnthong, J., Youngian, S., Faungnawakij, K., Rangsun-

vigit, P., Kitiyanan, B., Khunphonoi, R., Wanichsombat, A., Grisdanurak, N. and Khemthong, P., 2023, Energy efficiency of bio-coal derived from hydrothermal carbonized biomass: Assessment as sustainable solid fuel for municipal bio-power plant, *Appl. Therm. Eng.* 221.

[25] Clara, G. and Marco, R., 2021, Coal petrology analysis and implications in depositional environments from upper Cretaceous to Miocene: a study case in the Eastern Cordillera of Colombia, *Int. J. Coal. Sci. Technol.* 8(5): 869-896.