

## การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากกากทางและทะลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยการกระตุ้นทางกายภาพ

### Development of Activated Carbon from Waste of Oil Palm Frond and Bunch in Bio-oil Production Process by Physical Activation

ภคมน ปินตานา<sup>1\*</sup> นิกราน หอมดวง<sup>2</sup> กิตติกร สาสุจิตต์<sup>3</sup> ณัฐวุฒิ ดุษฎี<sup>4</sup> ปฎิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ<sup>5</sup>

E-mail: p.pintana@gmail.com

#### บทคัดย่อ

ศักยภาพการผลิตวัตถุดิบถ่านจากทางปาล์มและทะลายปาล์มในพื้นที่อำเภอสันทรายสามารถนำไปออกแบบกระบวนการผลิตคือ ผลิตประมาณ 5 kg ต่อรอบ และผลิต 2 รอบต่อวัน กระบวนการที่ได้ออกแบบเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การลดขนาดวัตถุดิบเริ่มต้นซึ่งเป็นถ่านจากกระบวนการไพโรไลซิส เข้าทำปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์แบบหมุนที่มีการให้ความร้อนและป้อนไอน้ำเพื่อกระตุ้นให้เกิดรูพรุนในเนื้อถ่าน เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจึงลดอุณหภูมิถ่านเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการผลิต ผลการทดสอบสภาวะที่เหมาะสม พบว่า ที่อุณหภูมิ 700 °C อัตราการป้อนไอน้ำ 150 cm<sup>3</sup>/min และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 40 min เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์จากทะลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ ในขณะที่อุณหภูมิ 868 °C อัตราการป้อนไอน้ำ 150 cm<sup>3</sup>/min และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 min เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์จากทางใบปาล์ม น้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ กระบวนการกระตุ้นวัตถุดิบถ่านจากทางและทะลายปาล์มน้ำมันทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 515.59 และ 261.21 m<sup>2</sup>/g จากเดิม 189.73 และ 2.08 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากทางใบปาล์มมีคุณสมบัติการมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า และเมื่อนำมาคำนวณต้นทุน พบว่าระบบที่ผลิตขึ้นนี้สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 6 ปี 3 เดือน

**คำสำคัญ:** ถ่านกัมมันต์ การกระตุ้นด้วยไอน้ำ ปาล์มน้ำมัน ของเหลือทิ้งการผลิตน้ำมันชีวภาพ

#### Abstract

Potential to produce charcoal raw materials from palm fields and palm bunches in San Sai District can be used to design the production process, which is to produce approximately 5 kg/cycle and produce 2 cycles/day. The process designed to produce activated carbon in this research consists of reducing the starting material (from pyrolysis process) size. It reacts in a rotary reactor where it is heated and fed with steam to induce porosity in the biomass charcoal. At the end of the process, the charcoal temperature is reduced as the final step in the production. The results of the optimum conditions test showed that at 700 °C, steam feed rate of 150 cm<sup>3</sup>/min, and reaction time of approximately 40 min, it was most suitable to produce activated carbon from the processed oil palm bunch. The temperature of 868 °C, steam feed rate of 150 cm<sup>3</sup>/min, and reaction time of 90 min were most suitable to produce activated carbon from oil palm frond. The activation process of charcoal raw materials from oil palm frond and bunch increased the surface area to 515.59 and 261.21 m<sup>2</sup>/g from 189.73 and 2.08 m<sup>2</sup>/g, respectively. It was found that activated carbon obtained from palm leaf pulp had a higher surface area property. And when it comes to calculating the cost, it is found that the system produced can payback in 6 years 3 months.

**Keywords:** Activated Carbon, Steam Activated, Biomass, Palm Oil, Bio-oil production waste

<sup>1-4</sup> อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

<sup>5</sup> อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยแม่โจ้

## ความเป็นมาของปัญหา

วัสดุชีวมวลที่เกิดขึ้นในพื้นที่แปลงปลูกประกอบด้วย ทางปาล์ม ใบปาล์ม ซึ่งเกษตรกรส่วนมากก็ทิ้งในพื้นที่ ซึ่งไม่ได้ก่อให้เกิดรายได้และยังมีแนวโน้มถูกกำจัดโดยการเผาซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเพื่อพิจารณาวัสดุเหลือทิ้งในพื้นที่ปลูกปาล์ม น้ำมันโดยใช้ค่าอัตราส่วนการเกิดของวัสดุชีวมวลที่เกิดขึ้นในพื้นที่ปลูกปาล์ม น้ำมัน คือ ลำต้น 1 เท่าของผลผลิต และ ใบและทางปาล์ม 1.41 เท่าของผลผลิต โดยปี พ.ศ. 2560 มีศักยภาพสูงถึง 21,816,255 ตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561) ซึ่งในส่วนนี้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในปริมาณที่น้อยมาก เช่น การใช้เป็นอาหารสัตว์ และการใช้เป็นปุ๋ย เป็นต้น การจัดการและการเพิ่มคุณภาพชีวมวลปาล์ม น้ำมันเป็นพลังงานทดแทนเพื่อการพัฒนาเกษตรและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน ได้มีกระบวนการเพิ่มคุณค่าเศษวัสดุปาล์ม น้ำมันเหลือศูนย์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งจากกระบวนการนี้จะยังมีของเหลือทิ้งคือขากของกากที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากทางและทะลายปาล์ม น้ำมัน ซึ่งมีลักษณะเป็นถ่าน ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสนั้นสภาวะใกล้เคียงกับการคาร์บอนไนเซชัน ซึ่งเป็นการทำถ่านเช่นเดียวกันและเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ทั่วไปอยู่แล้ว ดังนั้นจึงทำให้มีแนวคิดสร้างกระบวนการผลิตแบบ Zero waste สามารถนำไปใช้งานเชิงพลังงานด้วยการนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ มีคุณสมบัติในการดูดซับสูง ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยยังมีการนำเข้าเพื่อใช้งานในด้านอุตสาหกรรมอยู่เป็นจำนวนมาก โดยข้อมูลจากกรมศุลกากรในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยนำเข้าถ่านกัมมันต์คิดเป็นมูลค่า 204,881,304 บาท และในปี พ.ศ. 2549 มีการนำเข้าเพิ่มมูลค่าขึ้นเป็น 263,223,505 บาท (สอฝหะ ยาชะรัต, 2553) ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการเพิ่มมูลค่าให้กับถ่านที่เป็นกากเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากทางและทะลายปาล์ม น้ำมัน เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในชุมชน โดยการทดสอบต้นแบบ และประเมินการทำงานของเครื่องเพื่อขยายผลเชิงพาณิชย์ต่อไป

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษา วิเคราะห์คุณสมบัติ และพัฒนากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากทางและทะลายปาล์ม น้ำมันที่เหมาะสมกับชุมชน
2. เพื่อผลิตและประเมินระยะเวลาการคั่วถ่านในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากทางและทะลายปาล์ม น้ำมันของชุมชน

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. ประเภทของการวิจัย

การวิจัยเชิงทดลอง

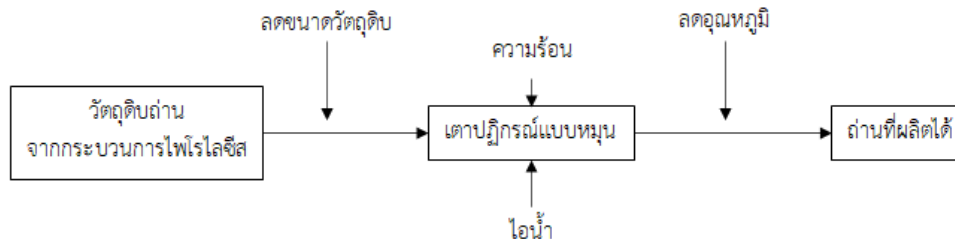
### 2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรคือ กากทางและทะลายปาล์ม น้ำมันเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ ซึ่งผลิตจากชีวมวลกากและทะลายปาล์ม ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ครั้งละ 500 กิโลกรัม โดยได้ใช้กลุ่มตัวอย่างจากการสุ่มเพื่อการทดลอง โดยเลือกระดับความคลาดเคลื่อนที่ 10% ของ Taro Yamane คือ

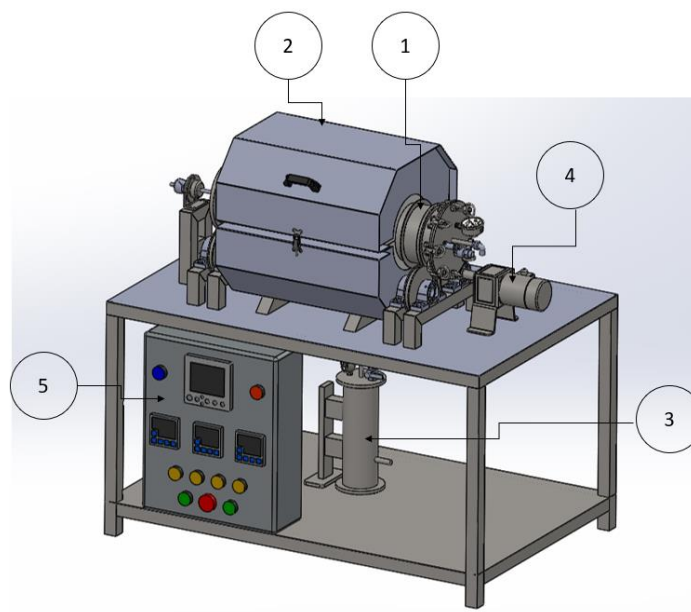
- 2.1 กากทางปาล์ม จำนวน 85 กิโลกรัม
- 2.2 กากทะลายปาล์ม จำนวน 85 กิโลกรัม

### 3. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

ประเมินชีวมวลทางปาล์ม น้ำมัน และทะลายปาล์ม น้ำมัน เหลือทิ้ง โดยใช้ข้อมูลทุติยภูมิจากการค้นคว้าเอกสาร กรณีพื้นที่อำเภอสนทราย ข้อมูลปี 2562 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564) มาออกแบบกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ รวมทั้งการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การกระตุ้นด้วยไอน้ำในเตาปฏิกรณ์แบบ fixed bed นั้น ใช้พลังงานสูง (ปานฉัตร กลัดเจริญ, 2554) เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาในการกระตุ้นนาน เพื่อให้ไอน้ำทำปฏิกิริยากับถ่านวัตถุดิบได้อย่างทั่วถึง และสามารถทำได้ครั้งละจำนวนไม่มาก ดังนั้นในการออกแบบกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ได้นั้นจึงต้องพิจารณาระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งตั้งสมมติฐานงานวิจัยว่าหากเตาปฏิกรณ์หมุนเพื่อให้วัตถุดิบสัมผัสกับไอน้ำได้อย่างทั่วถึงตลอดเวลา จะสามารถลดระยะเวลาในการกระตุ้นได้ ซึ่งจะส่งผลดีต่อการผลิต และต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตด้วย ดังนั้นจึงได้ออกแบบกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใช้เครื่องผลิตถ่านกัมมันต์ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่อุปกรณ์หมายเลข 1 คือ เตาปฏิกรณ์ที่ใช้บรรจุวัตถุดิบถ่านจากกระบวนการไพโรไลซิส หมายเลข 2 คือ ผนังที่เป็นฉนวนเพื่อกันความร้อน โดยมีการฝังฮีตเตอร์บริเวณด้านในที่สัมผัสกับเตาปฏิกรณ์ เพื่อให้ความร้อนแก่กระบวนการกระตุ้น หมายเลข 3 คือ หม้อไอน้ำ ที่ใช้ผลิตไอน้ำเพื่อป้อนให้กับกระบวนการกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ หมายเลข 4 มอเตอร์ ใช้ขับเคลื่อนเตาปฏิกรณ์เพื่อให้เพิ่มการสัมผัสกันระหว่างวัตถุดิบถ่าน และไอน้ำ และหมายเลข 5 ตัวควบคุม สำหรับควบคุมค่าตัวแปรอุณหภูมิ อัตราการป้อนไอน้ำ และเวลาในการทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์



ภาพที่ 2 เครื่องผลิตถ่านกัมมันต์

- 3.1 มวลของน้ำที่ใช้ในการกระตุ้น วัดปริมาณโดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล
- 3.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น วัดโดยเทอร์โมคัปเปิ้ล
- 3.3 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นตลอดกระบวนการ วัดโดยใช้แคลมป์มิเตอร์

#### 4. การเก็บรวบรวมข้อมูล

นำถ่านที่ต้องการกระตุ้นด้วยความร้อนและไอน้ำซึ่งนำมาดเป็นผงขนาดไม่เกิน 60 mesh ป้อนเข้ากระบอกลอยสแตนเลสที่เป็นห้องเผาไหม้ โดยการคลายจุดล๊อคฝาด้านล่างที่ต่อกับระบบป้อนไอน้ำ เมื่อป้อนถ่านเสร็จ ทำการปิดฝาและหมุนจุดล๊อคให้ครบ ทำการตั้งระบบควบคุม ซึ่งสามารถตั้งค่าอุณหภูมิ ความเร็วรอบของการหมุนกระบอกลอยสแตนเลสที่เป็นห้องเผาไหม้ และระยะเวลาในการทำงานของเครื่องเพื่อให้เครื่องทำงานได้อัตโนมัติ รวมทั้งปรับตั้งค่าชุดหม้อไอน้ำโดยการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ โดยการป้อนไอน้ำสามารถปรับได้ทั่วควบคุม ทั้งนี้การป้อนไอน้ำยังไม่ใช้ระบบอัตโนมัติ ทดสอบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เพื่อสรุปสภาพการใช้งานเครื่องผลิตถ่านกัมมันต์สำหรับวัตถุดิบกากทางและทะเลสาบปาล์มน้ำมันเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยทดสอบหาสภาวะควบคุมการผลิตที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบ CCD โดยใช้เพื่อลดจำนวนการทดลองและเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (ปิยะวดี ศรีวิชัย และชุมพพร รหัสิตา, 2564) ในที่นี้มีการจัด 3 ปัจจัย อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ อัตราการไหลของไอน้ำที่ป้อน และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยแต่ละตัวแปรมีการแปรค่า 5 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยแต่ละระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลองตามวิธี Central composite design

ปัจจัย	$-\alpha$ (-1.68)	-1	0	1	$\alpha$ (1.68)
$X_1$ = Furnace temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	532	600	700	800	868
$X_2$ = Vapor flow rate ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	66	100	150	200	234
$X_3$ = reaction time (min)	39.6	60	90	120	140.4

## 5. การวิเคราะห์ข้อมูล

คุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 900-2547 ซึ่งทดสอบตามมาตรฐานของ American Water Works Association (ปริญทร เต็มญารศิลป์, 2551)

5.1 การวิเคราะห์แบบประมาณตาม ASTM E870-82 (ความชื้น สารระเหย คาร์บอน และเถ้า) (ปานฉัตร กลัดเจริญ, 2554; Chandra, et al., 2009)

5.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยวิธี Physisorption (ช่วง P/P<sub>0</sub>: 0.05-0.3, 80-100 จุด) (Sun, et al., 2010; Chandra, et al., 2009; Tham, et al., 2011; ลลิตา นิตศนจารกุล, 2544; สราวุธ ศรีคุณ, 2550; ไชยยันต์ ไชยยะ และ คณะ, 2551; ปานฉัตร กลัดเจริญ, 2554)

5.3 การวิเคราะห์ความหนาแน่น ด้วยเครื่องมือ True density analyzer, AccuPye II 1340, Micromeritics, U.S.A. ทดสอบ ณ อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  °C (ปริญทร เต็มญารศิลป์, 2551)

5.4 การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนด้วยกระบวนการ Titrimetric method based on ASTM D4607 (ลลิตา นิตศนจารกุล, 2544; ปานฉัตร กลัดเจริญ, 2554)

5.5 การประเมินระยะเวลาการคืบหน้า (ศิริวรรณ, 2553)

## ผลการวิจัย

ผลประเมินศักยภาพการผลิตสำหรับใช้ออกแบบกำลังการผลิตของระบบผลิตถ่านกัมมันต์ พบว่า ผลผลิตทางปาล์มน้ำมัน 1,900 kgต่อไร่ต่อปี ทะลายปาล์มน้ำมัน 140 kgต่อไร่ต่อปี กรณีสถานที่อำเภอสนทราย ข้อมูลปี 2562 ระบุว่าพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน 8 ไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564) ใน 1 ปี จะมีทางปาล์ม 15,200 kg มีทะลายปาล์ม 1,120 kg คิดเฉลี่ยมีทางและทะลายปาล์มที่ต้องกำจัด 44.7 kg/day เมื่อลดความชื้นให้เหลือ 15% จะได้วัตถุดิบในการทำถ่านจากกระบวนการไพโรไลซิสประมาณ 39.3 kg/day เมื่อผ่านกระบวนการจะได้ถ่านประมาณ 10.6 kg/day (อุณหภูมิไพโรไลซิส 400 °C เวลาไพโรไลซิส 2 h) (อิศเรศ, 2565) เครื่องกระตุ้นด้วยความร้อนและไอน้ำในการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถป้อนวัตถุดิบได้ครั้งละ 5 kg ซึ่งวางแผนให้สามารถทำงานได้อย่างน้อย 2 รอบต่อวัน สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้ต่อเนื่องในพื้นที่ตลอดปี

ตารางที่ 2 ผลคุณสมบัติของการทดสอบการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านทะลายปาล์มน้ำมัน

การทดลอง	Furnace temperature (°C)	Vapor flow rate (cm <sup>3</sup> /min)	reaction time (min)	ความชื้น (%)	สารระเหย (%)	เถ้า (%)	คาร์บอนคงตัว (%)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	การดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm <sup>3</sup> )
วัตถุดิบถ่านทะลายปาล์มน้ำมัน				5.48	37.43	15.44	41.65	2.08	1071.26	1.40
Factorial point	600	100	60	3.54	33.32	23.13	40.00	NA	1042.20	1.45
	600	100	120	3.87	41.93	16.95	37.25	NA	926.69	1.54
	600	200	60	3.56	42.77	16.94	36.74	NA	947.74	1.59
	600	200	120	3.77	40.80	18.81	36.62	NA	933.44	1.50
	800	100	60	2.77	36.45	19.03	41.75	NA	927.77	1.52
	800	100	120	3.17	36.59	17.44	42.79	NA	1017.82	1.55
	800	200	60	2.17	47.63	19.06	31.14	NA	1044.33	1.51
	800	200	120	3.50	37.05	19.68	39.77	NA	897.52	1.51
Star point	532	150	90	5.10	29.77	18.58	46.55	2.10	1011.81	1.43
	700	66	90	4.75	39.32	16.94	38.99	NA	937.82	1.50
	700	150	39.6	3.98	38.92	17.87	39.23	261.21	764.58	1.60
	868	150	90	3.67	35.70	18.39	42.24	24.10	1066.04	1.41
	700	234	90	3.86	38.26	19.15	38.72	NA	890.49	1.54
	700	150	140.4	2.96	38.19	19.14	39.71	NA	955.10	1.48
Center point	700	150	90	3.04	40.02	15.07	41.87	NA	1021.53	1.52
	700	150	90	2.05	30.24	15.43	52.28	3.83	990.65	1.37
	700	150	90	3.83	43.57	20.04	32.57	2.64	1056.67	1.41

ตารางที่ 3 ผลคุณสมบัติของการทดสอบการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านทางใบปาล์มน้ำมัน

การทดลอง	Furnace temperature (°C)	Vapor flow rate (cm <sup>3</sup> /min)	reaction time (min)	ความชื้น (%)	สารระเหย (%)	เถ้า (%)	คาร์บอนคงตัว (%)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	การดูดซับไอโอดีน (mg/g)	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm <sup>3</sup> )
วัตถุดิบถ่านทางใบปาล์มน้ำมัน				5.03	37.39	7.80	49.78	189.73	1038.44	1.42
Factorial point	600	100	60	1.18	29.68	8.48	60.66	305.45	1029.43	1.36
	600	100	120	1.20	24.67	9.01	65.13	334.59	1051.68	1.48
	600	200	60	1.33	29.06	7.72	61.88	383.02	1067.41	1.35
	600	200	120	1.32	34.61	7.65	56.42	404.79	1049.27	1.50
	800	100	60	1.84	29.12	10.40	58.64	480.72	992.91	1.44
	800	100	120	1.18	29.55	9.21	60.06	505.52	1034.24	1.51
	800	200	60	0.92	29.33	8.18	61.56	491.02	1017.30	1.44
	800	200	120	1.00	29.78	9.36	59.85	519.13	1005.17	1.51
Star point	532	150	90	1.11	34.72	9.06	55.12	NA	1038.36	1.46
	700	66	90	1.15	31.63	8.56	58.65	313.76	990.92	1.50
	700	150	39.6	1.22	31.09	10.40	57.28	445.48	1009.35	1.44
	868	150	90	1.59	26.06	9.48	62.87	515.59	1084.28	1.42
	700	234	90	0.96	28.84	10.71	59.48	499.26	1030.72	1.50
	700	150	140.4	1.02	31.59	9.55	57.83	456.48	1001.99	1.50
Center point	700	150	90	1.32	24.49	8.31	65.88	370.28	990.27	1.43
	700	150	90	1.19	30.95	10.79	57.06	354.28	1011.38	1.40
	700	150	90	0.84	31.34	7.93	59.88	361.49	1006.24	1.41

ผลการทดลองกระตุ้นถ่านจากวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ของทะเลปาล์มที่สภาวะตามกำหนดทั้ง 17 การทดลอง พบว่าถ่านที่ผลิตได้มีความชื้นลดลงทุกสภาวะการทดสอบเมื่อเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น ในขณะที่สารระเหยที่บางการทดลองกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและค่าคาร์บอนคงตัวมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้กระตุ้น ณ อุณหภูมิ 700 °C อัตราการป้อนไอน้ำ 150 cm<sup>3</sup>/min และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 39.6 min ทำให้เกิดพื้นที่ผิวของรูพรุนเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ 261.21 m<sup>2</sup>/g ในขณะที่ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านที่ทำการกระตุ้นบางสภาวะนั้นมีค่าลดลงจากวัตถุดิบ ซึ่งโดยรวมแล้วมีค่าใกล้เคียงกับวัตถุดิบ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบพื้นที่ผิวมีผลเป็น NA คือ ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากเนื่องจากเมื่อนำไปผงถ่านจากการทดลอง แห่สารละลายอะซิโตน พบว่ายังมีคราบเหลืองของคาร์บอนอยู่จึงไม่สามารถทดสอบเพื่อหาพื้นที่ผิวดังวิธี Physisorption ได้

ผลการทดลองกระตุ้นถ่านจากวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ของทางใบปาล์มที่สภาวะตามกำหนดทั้ง 17 การทดลอง พบว่าถ่านที่ผลิตได้มีความชื้นลดลงทุกสภาวะการทดสอบเมื่อเทียบกับวัตถุดิบตั้งต้น ในขณะที่สารระเหยมีแนวโน้มลดลงและค่าคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติความเป็นถ่านกัมมันต์คือ การหาพื้นที่ผิว และการดูดซับไอโอดีน ซึ่งเป็นค่าหลักในการประเมินสภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้พบว่า สภาวะที่ใช้กระตุ้น ที่การทดลองที่ 8 และ 12 ทำให้เกิดพื้นที่ผิวของรูพรุนเพิ่มขึ้นมากใกล้เคียงกัน คือ 519.13 m<sup>2</sup>/g และ 515.59 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามพลังงานพบว่า สภาวะที่ 12 อุณหภูมิการกระตุ้น 868 °C อัตราการป้อนไอน้ำ 150 cm<sup>3</sup>/min และเวลาในการใช้งาน 90 min เหมาะสมที่สุด

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ไอน้ำของวัตถุดิบถ่านทะเลปาล์มและถ่านทางใบปาล์มน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถหาค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดยการวัดกระแสไฟฟ้าในช่วงการแปรผันอุณหภูมิที่ 532- 868°C โดยใช้อัตราการไหลของน้ำที่ 66-234 cm<sup>3</sup>/min จากนั้นทำการตรวจสอบการใช้พลังงานโดยการวัดกระแสไฟฟ้าในช่วงการดำเนินการคือ 40-140 min ทำการหาค่าไฟฟ้าทั้งระบบไฟฟ้าเฟสเดียวและค่าไฟฟ้า 3 เฟส คำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้ารวมของกระแสไฟฟ้าที่วัดนำมาหาค่าไฟฟ้าโดยใช้หน่วยละ 3.61 บาท (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2565) ส่วนการใช้น้ำจะแปรผลตามอัตราการป้อนและเวลาการทดลอง คำนวณราคาจากน้ำสะอาดที่นำมาใช้คือน้ำดื่มในราคาหน่วยละ 0.5 บาท อ้างอิงราคาจากตู้กดน้ำอัตโนมัติ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระยะเวลาต้นทุน



### 1. ต้นทุนคงที่

1.1 ต้นทุนการสร้างระบบผลิตถ่านกัมมันต์ขนาด 5 กิโลกรัม รวมค่าวัสดุและค่าจ้างเหมาในการประกอบระบบ (ไม่รวมค่าแก้ไขปรับปรุงอื่นๆ ระหว่างการวิจัย) ราคารวม 250,000 บาท ต่อปี ไม่คิดมูลค่าซาก

1.2 ต้นทุนเครื่องมือในการลดขนาดวัตถุดิบ 15,000 บาท ไม่คิดมูลค่าซาก

### 2. ต้นทุนผันแปร

2.1 ต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อการอบการผลิตเฉลี่ย (ประเมินจากกระบวนการที่สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้) คือ 4.42 บาทต่อครั้ง ซึ่งเมื่อคิดเป็นต้นทุนต่อกิโลกรัมคือ  $4.42/5 = 0.88$  บาท

2.2 ต้นทุนค่าน้ำต่อการอบการผลิตเฉลี่ย (ประเมินจากกระบวนการที่สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้) คือ 6.75 บาทต่อครั้ง ซึ่งเมื่อคิดเป็นต้นทุนต่อกิโลกรัมคือ  $6.75/5 = 1.35$  บาท

2.3 ต้นทุนค่าแรงงาน (ประเมินจากรอบการผลิตได้ นละ 2 รอบ) คือ 300 บาทต่อวัน ซึ่งเมื่อคิดเป็นต้นทุนต่อกิโลกรัมคือ  $300/10 = 30$  บาท

2.4 ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องผลิตถ่านกัมมันต์และเครื่องมือในการลดขนาดวัตถุดิบ เฉลี่ยรอบละ 50 บาท (ประเมินจากรอบการผลิตได้ วันละ 2 รอบ) คือ 100 บาทต่อวัน ซึ่งเมื่อคิดเป็นต้นทุนต่อกิโลกรัมคือ  $100/10 = 10$  บาท

### 3. รายได้

รายได้ที่เกิดจากการจำหน่ายถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ กำหนดราคาขายที่ขั้นต่ำต่อกิโลกรัมละ 100 บาท (ประเมินจากคุณสมบัติที่วิเคราะห์ได้เทียบกับค่ามาตรฐานและราคาขายตามท้องตลาด) ประเมินกำไรที่เกิดขึ้นจากการผลิตจากการนำรายได้หักจากต้นทุนผันแปรคือ  $100 - 0.88 - 1.35 - 30 - 10 = 57.77$  บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็น 115.54 บาทต่อวัน ดังนั้นคิดระยะเวลาคืนทุน  $265,000/115.54 = 2,294$  วัน คิดเป็นระยะเวลาประมาณ 6 ปี 3 เดือน

## อภิปรายผล

ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นถ่านจากวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ของทะเลสาบปาล์มที่สภาวะอุณหภูมิการกระตุ้น  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  อัตราการป้อนไอน้ำ  $150\text{ cm}^3/\text{min}$  และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 40 min พบว่าถ่านที่ผลิตได้มีค่าการดูดซับไอโอดีนพบว่าเกินเกณฑ์มาตรฐานของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาลักษณะของถ่านที่ผ่านการกระตุ้นพบว่า ถ่านจากวัตถุดิบปาล์มที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสอุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  เวลาไพโรไลซิส 2h นั้นมีปริมาณทาร์อยู่มาก เนื่องจากในกระบวนการวิเคราะห์พื้นที่ผิวเมื่อนำไปผึ่งถ่านไปแช่สารละลายอะซิโตน พบว่ายังมีคราบเหลืองของทาร์ปนอยู่ซึ่งไม่สามารถทดสอบเพื่อหาพื้นที่ผิวได้ จึงทำให้ทราบว่ากระบวนการกระตุ้นด้วยสภาวะที่กำหนดไม่สามารถกำจัดทาร์ที่ปนอยู่ออกได้ ทำให้ไม่สามารถสร้างรูพรุนให้เพิ่มขึ้นได้เพียงพอให้ผ่านมาตรฐานของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามการกระตุ้นนี้ก็สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวจากถ่านวัตถุดิบได้ถึง 125 เท่า ในขณะที่สภาวะการกระตุ้นที่อุณหภูมิ  $868\text{ }^{\circ}\text{C}$  อัตราการป้อนไอน้ำ  $150\text{ cm}^3/\text{min}$  และเวลาในการใช้งาน 90 นาที เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ของทางใบปาล์ม พบว่าถ่านที่ผลิตได้มีค่าการดูดซับไอโอดีนพบว่าเกินเกณฑ์มาตรฐานของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ดังแสดงในตารางที่ 4 ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น  $515.589\text{ m}^2/\text{g}$  ซึ่งปริมาณพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Pallares et al. (2018) และ Rahman and Chin (2019) ซึ่งกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบถ่านจากฟางข้าวบาร์เล่ ฟางข้าว ด้วยความร้อนและไอน้ำเช่นกัน แต่ในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้นน้อยกว่า อย่างไรก็ตามคุณสมบัติด้านความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ทั้งสองยังมีค่าเกินช่วงเกณฑ์มาตรฐานถ่านกัมมันต์ชนิดผง แต่ค่าความหนาแน่นสูงจะบ่งบอกความสามารถในการดูดซับได้ดี (ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์, 2562)

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติถ่านจากกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ของทะเลสาบปาล์ม

รายการทดสอบ	ปริมาณที่พบในวัตถุดิบในการทดลอง	ปริมาณตามที่เกณฑ์มาตรฐานกำหนด ชนิดผง	ปริมาณที่พบในถ่านจากการทดลอง	หน่วย
พื้นที่ผิว	2.08	-	261.21	$\text{m}^2/\text{g}$
ค่าความหนาแน่นปรากฏ	1.40	0.20-0.75	1.60	$\text{g}/\text{cm}^3$
ค่าความชื้น	4.50	-	3.98	%
ค่าเถ้า	20.01	-	-	%
ค่าคาร์บอนคงตัว	58.94	-	-	%
ค่าสารระเหย	16.55	-	-	%
ค่าการดูดซับไอโอดีน	1,079.63	ไม่น้อยกว่า 600	764.58	$\text{mg}/\text{g}$

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติถ่านจากกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ของทางใบปาล์ม

รายการทดสอบ	ปริมาณที่พบใน วัตถุดิบในการ ทดลอง	ปริมาณตามที่เกณฑ์มาตรฐาน กำหนด ชนิดผง (ปรีนทร เต็มถาวรศิลป์, 2551)	ปริมาณที่พบในถ่าน จากการทดลอง	หน่วย
พื้นที่ผิว	189.73	-	515.59	m <sup>2</sup> /g
ค่าความหนาแน่นปรากฏ	1.42	0.20-0.75	1.42	g/cm <sup>3</sup>
ค่าความชื้น	5.028	-	1.59	%
ค่าเถ้า	10.10	-	-	%
ค่าคาร์บอนคงตัว	71.47	-	-	%
ค่าสารระเหย	14.78	-	-	%
ค่าการดูดซับไอโอดีน	1,002.98	ไม่น้อยกว่า 600	1084.28	mg/g

### สรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบสภาวะที่เหมาะสม พบว่า ที่อุณหภูมิ 700 °C อัตราการป้อนไอน้ำ 150 cm<sup>3</sup>/min และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 40 min เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์จากทะเลสาบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ ในขณะที่อุณหภูมิ 868 °C อัตราการป้อนไอน้ำ 150 cm<sup>3</sup>/min และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 min เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์จากทางใบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ ทั้งนี้พิจารณาคุณสมบัติโดยรวมพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากทางใบปาล์มมีคุณสมบัติที่ดีกว่า และเมื่อนำมาคำนวณต้นทุนแล้วพบว่าระบบที่ผลิตขึ้นนี้สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 6 ปี 3 เดือน

### ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. หากต้องการผลิตเพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ควรมีการทดสอบด้วยการวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ต่อไป และสามารถชี้แจงการนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้
2. ในการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ ประเมินต้นทุนวัตถุดิบคือ 0 บาท ไม่คิดต้นทุนในการผลิตถ่านก่อนการกระตุ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของชุดโครงการ การจัดการและการเพิ่มคุณภาพชีวมวลปาล์มน้ำมันเป็นพลังงานทดแทนเพื่อการพัฒนาเกษตรและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ปี 2564 โดยเป็นโครงการย่อย “การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากกากทางและทะเลสาบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ” ที่นำเอากากทางและทะเลสาบปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากโครงการย่อย “การเพิ่มคุณค่าเศษวัสดุปาล์มน้ำมันเหลือศูนย์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสนำร่องระดับชุมชน” ซึ่งเป็นเศษเหลือทิ้งที่ไม่มีมูลค่า มาดำเนินการต่อ ดังนั้นหากกระบวนการผลิตเน้นผลิตถ่านกัมมันต์ไม่มีการผลิตน้ำมันชีวภาพ ควรพิจารณาต้นทุนในการผลิตถ่านก่อนการกระตุ้นเพิ่มเติม

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วสามารถนำไปออกแบบระบบการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดและต้นทุนที่เหมาะสมกับการผลิตได้มากขึ้น จะทำให้มีระยะเวลาคืนทุนในการนำไปใช้งานน้อยลง

### เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2561). ศักยภาพพลังงานชีวมวล. <[http://biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html)> (สืบค้นเมื่อ 1 มิถุนายน 2564).
- ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์. (2562). ถ่านกัมมันต์. กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ. <[http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss\\_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf](http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf)> (สืบค้นเมื่อ 24 ธันวาคม 2565).
- ไชยยันต์ ไชยยะ และ คณะ. (2551). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดยางพาราโดยใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำ. โครงการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- ปรีนทร เต็มถาวรศิลป์. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จาก ไม้ตอง และ ไม้พม่าจู้. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอินทรีย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ปานฉัตร กลัดเจริญ. (2554). การผลิตและทดสอบถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการแยกสลายไผ่รวกด้วยความร้อน. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ปิยะวดี ศรีวิชัย และ ชูมาพร รณสีดา. (2564). การใช้ประโยชน์โปรแกรมดีไซน์เอ็กเปอร์ทเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร. *PBRU SCIENCE JOURNAL*, 18(2). 34-43.
- ลลิตา นิตศนจารกุล. (2544). การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริวรรณ ว่องวีรุฒ. (2553). จุดคุ้มทุน สิ่งที SMEs ควรรู้. *Executive Journal*, 203-210.
- สรารุณ ศรีคุณ. (2550). การศึกษาการดูดซับสีย้อมและไอออนโลหะตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สื้อฝ้าย ยะระรัต. (2553). การกำจัดโลหะตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุธรรมชาติ. โครงการวิจัยหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2564). ปาล์มน้ำมัน. <<http://mis-app.oae.go.th>> (สืบค้นเมื่อ 1 มิถุนายน 2564).
- อิสเรศ สายปัญญา. (2565). การพัฒนาเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสำหรับผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- 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, 457-462.
- Pallares, J., Gonzalez-Cencerrado, A., Arauzo, I. 2018. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. *Biomass and bioenergy*, 115, 64-73.
- Rahman, H. A., Chin, S. X. 2019. Physical and chemical properties of the rice straw activated carbon produced from carbonization and KOH activation processes. *Sains Malaysiana*, 48(2), 385-391.
- Sun, K., Jiang, J. C. 2010. Preparation and characterization of activated carbon from rubber-seed shell by physical activation with steam. *Biomass & Bioenergy*, 34, 539-544.
- Tham, Y.J., Latif, P.A., Abullah, A.M., Shamala-Devi, A., Taufiq-Yap, Y.H. 2011. Performances of toluene removal by activated carbon derived from durian shell. *Bioresource Technology*, 102, 724-728.