

ผลของพารามิเตอร์ควบคุมก๊าซไอเสียของการคาร์บอนในเซชันชีวมวลร่วมกับ ขดลวดความร้อนต่อการผลิตถ่านบั่วสำหรับการดูดกลืน

ไพโรจน์ จันทร์แก้ว¹ อภิรักษ์ ชัดวิลาส¹ อนุรัตน์ เทวตา¹ จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล¹ และสำรวม โกศลานันท์^{2*}
phairoac@rmutl.ac.th¹, aphirak@rmutl.ac.th¹, a_tevata@rmutl.ac.th¹,
chakkraphan@rmutl.ac.th¹, sumroum_k@rmutt.ac.th^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: September 9, 2024 Revised: December 23, 2024 Accepted: December 25, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ควบคุมก๊าซไอเสียประกอบด้วยอุณหภูมิและความเร็ว
ก๊าซไอเสียของการคาร์บอนในเซชันชีวมวลร่วมกับขดลวดความร้อนต่อการผลิตถ่านบั่ว สำหรับการดูดกลืน เครื่องผลิต
ถ่านดูดกลืนถูกสร้าง สำหรับควบคุมสภาวะขนาด $50 \times 45 \times 35 \text{ cm}^3$ สามารถทดสอบฝักบัว 6 ฝัก ก๊าซไอเสียถูกผลิต
จากเตาเผาขนาด 100 liter และถูกเพิ่มอุณหภูมิ โดยใช้ขดลวดความร้อนและเตาเผาที่มีการติดตั้งพัดลมที่สามารถ
ควบคุมความเร็วอากาศเข้าเตาเผาได้ ในการทดลองใช้ฝักบัวมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 86.19 ± 1.67 มาตรฐานเปียกและ
ผลิตเป็นถ่านจนมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 0 มาตรฐานเปียก โดยใช้ตัวแปรควบคุม คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 200, 250
และ 300°C และความเร็วก๊าซไอเสีย 1.22, 1.74 และ 2.27 m/s พบว่า อุณหภูมิก๊าซไอเสีย 200, 250 และ 300°C
ใช้เวลาผลิตถ่านดูดกลืน 120, 100 และ 60 นาที ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิก๊าซไอเสียคงที่และเพิ่มความเร็วก๊าซไอเสีย
ใช้เวลาผลิตถ่านดูดกลืนเท่ากัน เนื่องจากวัตถุดิบไม่ได้สัมผัสกับก๊าซไอเสียโดยตรง ซึ่งวัตถุดิบจะถูกบรรจุไว้ในตู้วัตถุดิบ
อีกชั้นหนึ่ง สำหรับป้องกันไม่ให้บั่วเกิดการลุกไหม้จนเปลี่ยนสภาพเป็นเถ้า ส่งผลให้ไอเสียไหลเข้ามาในตู้บ่มฝักผิว
ผนังด้านนอกของตู้ใส่วัตถุดิบ ดังนั้นลักษณะการอบแห้งจึงเป็นการอบด้วยการแผ่รังสีความร้อนทำให้ผลการอบแห้ง
ขึ้นอยู่กับตัวแปรอุณหภูมิเพียงตัวแปรเดียว จากนั้นทำการศึกษาค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) และอัตราการใช้
พลังงานจำเพาะ พบว่า เมื่ออุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) มีค่าสูงขึ้น
และทำให้อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งที่สภาวะ 300°C ความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s มี
ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงสุด $1176.32 \pm 21.562 \text{ mg/g}$

คำสำคัญ: ฝักบัว ถ่านดูดกลืน ก๊าซไอเสีย

Flue gas control parameter effects of biomass carbonization with heating coil on the production of lotus charcoal for odor absorption

Phairoach Chunkaew¹, Aphirak Khadwilard¹, Anurat Tevata¹,
Chakkraphan Thawongmyingsakul¹ and Sumroum Kosalanun^{2*}
phairoac@rmutl.ac.th¹, aphirak@rmutl.ac.th¹, a_tevata@rmutl.ac.th¹,
chakkraphan@rmutl.ac.th¹, sumroum_k@rmutt.ac.th^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: September 9, 2024 Revised: December 23, 2024 Accepted: December 25, 2024

Abstract

This research aimed to study the effects of flue gas control parameters including flue gas temperature and flue gas velocity of biomass carbonization with heating coil on the production of lotus charcoal for odor adsorption. The odor absorbing charcoal machine had a drying chamber of $50 \times 45 \times 35 \text{ cm}^3$ which could contain 6 pods. Hot smoke was generated from a 100 liter kiln. Next, the hot smoke was increased temperature by using a heater before entering the drying chamber. At the kiln, a fan was installed for blowing the air to the kiln. The fan could control the speed for adjusting the air to the kiln. Experiment, the lotus had an initial moisture content of $86.19 \pm 1.67 \%$ wet basis and was dried to the final moisture content of 0% wet basis. The control variables were smoke temperatures of 200, 250 and 300°C and smoke velocities of 1.22, 1.74 and 2.27 m/s. It was found that at flue gas temperatures of 200, 250 and 300°C , the production time for odor absorber was 120, 100 and 60 min, respectively, but at constant flue gas temperature and increasing flue gas velocity, the production time for odor absorber was the same because the raw materials did not come into direct contact with the flue gas. The raw materials were packed in another layer of the raw material cabinet to prevent the lotus from burning and turning into ash so the exhaust gas touched the outer wall surface of the raw material cabinet. Therefore, the drying method was a heat radiation drying method and the drying result was to depend on only one temperature variable. An iodine adsorption and a specific energy consumption were studied. It was found that increasing the temperatures and the velocities of hot smoke, the iodine adsorption and the specific energy consumption were increased. At 300°C with the flue gas velocity 2.27 m/s had the maximum iodine adsorption value of $1176.32 \pm 21.562 \text{ mg/g}$.

Keywords: Lotus, Odor absorbing charcoal, Flue gas

1. บทนำ

เนื่องจากจังหวัดตาก บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก มีหนองน้ำที่มีบัวหลวงอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นหนองน้ำสาธารณะขนาดใหญ่ในเขต ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก มีเนื้อที่ 1,000 กว่าไร่ [1] นอกจากนี้ มีพื้นที่บัวหลวงตามหนองน้ำธรรมชาติที่หนองจรเข้ ตำบลยกกระบัตร อำเภอสางเภา จังหวัดตาก มีพื้นที่ 1,200 ไร่ [2] บัวเหล่านั้น เมื่อถึงฤดูการออกดอกก็จะมีดอกบัวอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อดอกบัวบานเต็มที่ก็จะกลายเป็นฝักบัวให้ชาวบ้านได้ลงไปเก็บฝักบัว เพื่อเอาเมล็ดบัวมาขายได้ตลอดทั้งปี พบว่า ยังมีฝักบัวที่เหลือจากชาวบ้านเก็บอยู่เป็นจำนวนมากทำให้ฝักบัวเหล่านั้นแห้งเฉาไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์และเกิดการเน่าเสีย ทำให้มีกลิ่นเหม็นเป็นมลพิษทางอากาศและมลพิษทางสิ่งแวดล้อม การผลิตถ่านดูดกลิ่นจากบัวไม่เพียงช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับพืชน้ำอย่างบัว แต่ยังเป็นกระบวนการที่ส่งเสริมความยั่งยืน โดยใช้วัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมอย่างคุ้มค่า ช่วยลดของเสียและสร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการดูแลคุณภาพอากาศและน้ำ นอกจากนี้ ยังลดของเสียและสร้างรายได้ใหม่ให้ชุมชน ถ่านดูดกลิ่น จากงานวิจัยของ [3] ใช้ผลจากเป็นวัสดุหลัก ซึ่งมีการออกแบบมาใน 2 รูปแบบ คือ ก้อนถ่านจากผลจากจากนั้นนำไปบรรจุในบรรจุภัณฑ์ถุงตาข่ายเป็นถ่านดูดกลิ่นและถ่านจากผลจากผ่าซีก จากนั้น นำไปทดสอบกับกาวแปงเปียกขึ้นรูปเป็นก้อนถ่านดูดกลิ่น เนื่องจากปัญหา คือ ผลไม้มีความเปรี้ยว เมื่อได้รับความร้อนสูงก็จะเกิดการแตกหักและกลายเป็นซี้ได้ง่าย แต่หากเผาเป็นถ่านไม่สมบูรณ์จะมีกลิ่นของผลไม้อยู่ ปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับกลิ่นก็จะน้อย รวมไปถึงบรรจุภัณฑ์ที่เป็นปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำถ่านผลไม้ดูดกลิ่น เช่น [4] การทำถ่านมังคุดดูดกลิ่น จากการทดลองพบว่า หากช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้สูง 300 ถึง 400°C ลักษณะทางกายภาพของมังคุดในระหว่างการเผาไหม้จะกลายเป็นเถ้าถ่านก่อนที่จะกลายเป็นถ่าน ในขณะที่ถ้าช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำกว่า 200°C มังคุดถูกเปลี่ยนเป็นถ่านบางส่วน ดังนั้น เงื่อนไขการทดลอง

ที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านมังคุดดูดกลิ่นด้วยเตาชีวมวลขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัย คือ อุณหภูมิช่วงการเผาไหม้ควรอยู่ระหว่าง 200 ถึง 300 °C โดยลักษณะทางกายภาพของถ่านมังคุดดูดกลิ่นใกล้เคียงกับมังคุดก่อนนำไปเป็นถ่าน และ [5] ได้พัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวทดสอบ โดยใช้สารเคมีได้ค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเท่ากับ 390 mg/g นอกจากนี้ [6] ได้วิจัยไปบัวมาตัดแปลงเป็นคาร์บอนประยุกต์ใช้ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เจือปนไนโตรเจน ดังนั้น จึงมีแนวคิดในการนำฝักบัวมาใช้ประโยชน์โดยการนำมาทำเป็นถ่านดูดกลิ่น เพราะฝักบัวมีเส้นใยมากจะทำให้ไม่เกิดการแตกหักง่ายและเมื่อกลายเป็นถ่านจะมีรูพูนมาก มีรูพรุนที่แตกต่างจากถ่านปกติทั่วไป จึงเหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นถ่านดูดกลิ่น งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียของการคาร์บอนในเข้ชั้นชีวมวลร่วมกับขดลวดความร้อนต่อการผลิตถ่านดูดกลิ่นจากบัว โดยเป้าหมายให้ถ่านดูดกลิ่นจากบัวมีคุณสมบัติตาม [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านดูดซับกลิ่น-ถ่านหิน (มผช. 180/2546)

2. กรอบแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บัวหลวงเป็นดอกไม้ที่คนไทยคุ้นเคยกันเป็นอย่างดี บัวหลวงมีชื่อเรียกกันทั่วไปว่า ปทุมชาติ บัวหลวงเป็นไม้ล้มลุก มีลำต้นใต้ดินแบบเหง้าและไหล ใบเป็นใบเดี่ยวรูปกลม เมื่อยังอ่อนจะลอยปริ่มน้ำ ส่วนใบแก่แผ่ใบจะโผล่พ้นน้ำ รูปใบเกือบกลมขนาดใหญ่ ใบมีสีเขียว ผิวใบมีนวล ก้านใบแข็งและมีหนาม ก้านใบจะติดตรงกลางแผ่นใบ ดอก เป็นดอกเดี่ยวขนาดใหญ่ชูสูงพ้นผิวน้ำ มีทั้งดอกทรงป้อมและแหลม กลีบดอกมีทั้งชนิดกลีบซ้อนและไม่ซ้อน กลีบดอกสีขาว สีชมพูหรือสีเหลืองแล้วแต่ละชนิดพันธุ์ ดอกบัวหลวงเริ่มบานตั้งแต่อ่อนเช้าและหุบลงในช่วงพลบค่ำ พอรุ่งเช้าวันใหม่ เมื่อดอกบัวตูมได้รับแสงอาทิตย์ก็จะบานอีกครั้ง ดอกมีกลิ่นหอม เมื่อเริ่มเป็นผล รูปทรงรี สีเขียวนวล มีจำนวนมากฝังอยู่ในส่วนที่เป็นรูปกรวย เมื่ออ่อนมีสีเหลือง เมื่อผลแก่จะขยายใหญ่ขึ้นมีสีเทาอมเขียวเรียกว่า ฝักบัว [8]

ผลิตภัณฑ์สำหรับถ่านดูดกลิ่นสามารถนำถ่าน มาดให้มีความละเอียดตามต้องการ อาจเติมสมุนไพร ที่มีคุณสมบัติในการดูดกลิ่น เช่น ชา สะเดา บรจุนใน ภาชนะบรรจุหรืออัดเป็นรูปทรงต่าง ๆ อาจแต่งสีหรือ ได้จากการนำผลไม้หรือส่วนต่าง ๆ ของพืช มาเผาในที่ อับอากาศจนกลายเป็นถ่าน โดยยังคงรูปทรงผลไม้หรือ ส่วนต่าง ๆ ของพืชไว้เช่นเดิม ถ่านดูดกลิ่นมีหลากหลาย รูปแบบ แต่ที่กำลังได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน คือ ถ่านผลไม้ มีคุณสมบัติสามารถดูดกลิ่นได้ดี รูปทรง สวยงามและใช้เป็นเครื่องประดับตกแต่ง การผลิตถ่าน ผลไม้เกิดจากการนำภูมิปัญญาท้องถิ่นที่มีการสืบทอด มาตั้งแต่อดีต โดยนำผลไม้ชนิดต่าง ๆ มาเผาจนเป็น ถ่านที่ยังคงรูปทรงผลไม้ไว้เหมือนเดิม

การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number) [9] มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่าน ดูดกลิ่น ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AWWA B604 ซึ่งเป็นวิธี เดียวกันกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัม มันต์ เทียบเคียงได้กับการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน AST M D4607-94 ซึ่งมีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

- อบถ่านที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 3 hr. แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น

- ชั่งและบันทึกน้ำหนักถ่านกัมมันต์ใส่ในขวด รูปชมพู่ขนาด 250 ml ที่มีฝาปิด

- เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (hydroc hloric) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 10 ml แกว่งขวดเบา ๆ เพื่อให้ผงถ่านชุ่มด้วยสารละลาย จากนั้นต้มให้เดือด 30 s เพื่อกำจัดเถ้าและซัลเฟอร์ (sulfur)

- เติมสารละลายไอโอดีน (iodine) ความ เข้มข้น 0.10 normal ปริมาตร 100 ml ปิดฝาและ เขย่าแรง ๆ 30 s

- กรองแยกถ่านกัมมันต์จากสารละลายด้วย กระดาษกรองโดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่ง กรองอิมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งกรองด้วยขวด รูปชมพู่ขนาด 125 ml

- เติมสารละลาย 50 ml

- ค่อย ๆ เปิดบิวเรต (burette) ให้สารละ ายโซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) ความ

เข้มข้น 0.10 normal ลงในขวดรูปชมพู่จนกระทั่งได้ สารละลายสีเหลือง

- เติมน้ำแบ่ง 2 ถึง 3 หยด จนได้สารละลายสี น้ำเงิน

- ค่อย ๆ เปิดบิวเรต (burette) ใส่ขวดรูป ชมพู่ต่อจนได้สารละลายสีไม่มีสีและบันทึกปริมาตร โซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) ที่ใช้

การคำนวณการดูดซับไอโอดีน (iodine) ของ ถ่านดูดกลิ่นจากฝักบัว ดังสมการที่ (1)

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (1)$$

เมื่อ

X คือ ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine), mg/g

DF คือ ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (Dilution-Factor), -

DF คือ $\frac{\text{ปริมาตรไอโอดีนเริ่มต้น} - \text{ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาตรไอโอดีนที่เหลือ}}$

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulfate), ml

M คือ น้ำหนักถ่าน, g

N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulfate), normal, -

N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (iodine), normal, -

$A = 12693 N_2$

$B = 126.93 N_1$

การคำนวณหาความชื้นของถ่านดูดกลิ่นจาก ฝักบัว ดังสมการที่ (2)

$$M_f = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

M_f คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, % Wet Basis

w คือ มวลวัสดุเปียก, g

d คือ มวลวัสดุแห้ง, g

การคำนวณอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) ของถ่านดุกกลั่นจากฝักบัว ดังสมการที่ (3)

$$MR = \frac{M_{f-t}}{M_{f-0}} \quad (3)$$

เมื่อ

- MR คือ อัตราส่วนความชื้น, -
- M_{f-t} คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, % Wet Basis
- M_{f-0} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ, % Wet Basis

การคำนวณอัตราการใช้พลังงานของระบบ อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) [10] ซึ่งเป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุของถ่านดุกกลั่นจากฝักบัว ดังสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{\sum[(2.6 \times 3.6)(E_h + E_f) + (M_w)(LHV)]}{W_{out}} \quad (4)$$

เมื่อ

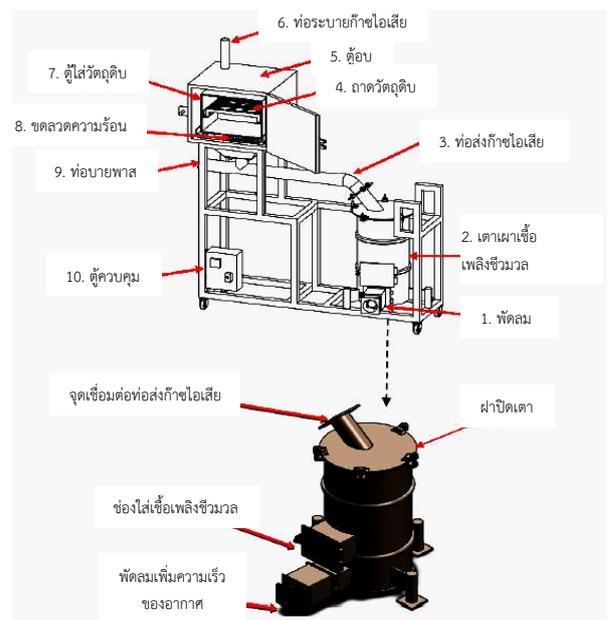
- SEC คือ อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ, MJ/kg
- E_h คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของชุดลดความร้อน, kWh
- E_f คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของพัดลมตั้งแต่เริ่มจนถึงเวลาใด ๆ, kWh
- M_w คือ มวลของไม้, kg
- LHV คือ ค่าความร้อนต่ำ, kJ/kg
- 2.6 คือ ค่าคงที่สำหรับเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นฐานเดียวกับไม้, -
- 3.6 คือ ค่าคงที่สำหรับเปลี่ยนหน่วยจาก kWh เป็น MJ
- W_{out} คือ ปริมาณน้ำที่ออก, kg

3. วิธีการวิจัย

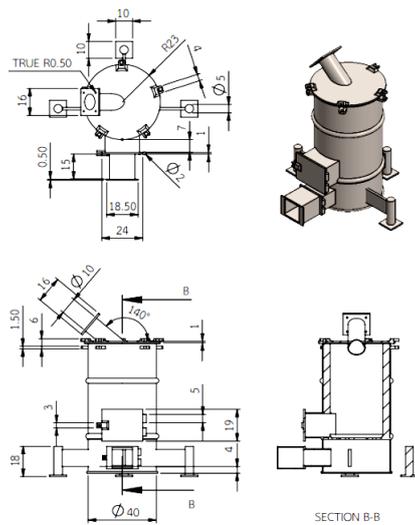
3.1 การสร้างเครื่องผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัวโดยใช้ก๊าซไอเสีย

เครื่องผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัว โดยใช้ก๊าซไอเสียมีส่วนประกอบหลัก ๆ พัดลม สำหรับใช้ควบคุม

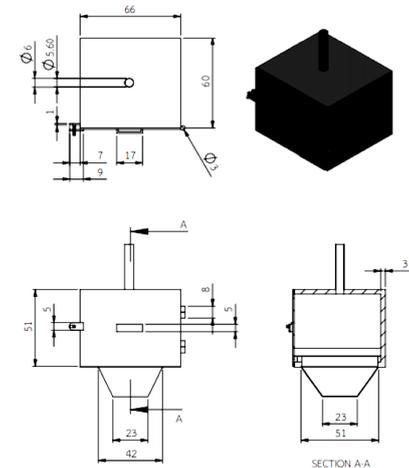
ความเร็วก๊าซไอเสีย สำหรับใช้ทดสอบเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลมีหน้าที่สร้างก๊าซไอเสียให้ได้อุณหภูมิระดับหนึ่ง ซึ่งการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลให้เปิดฝาช่องใส่เชื้อเพลิง หลังจากนั้นทำการปิดฝาช่องใส่เชื้อเพลิง ท่อส่งก๊าซไอเสีย ถาดวัตถุดิบ ตู้อบ ท่อระบายก๊าซไอเสีย ตู้ใส่วัตถุดิบซึ่งเป็นฝักบัวชั้นใน ชุดลดความร้อนเป็นอุปกรณ์ช่วยเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซไอเสียให้ได้สภาวะที่ต้องการ สำหรับท่อบายพาส (bypass) ใช้ระบายก๊าซไอเสียทิ้งขณะที่อุณหภูมิที่ออกจากเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวลสูงเกินสภาวะที่ใช้งาน ตู้ควบคุมใช้ปรับตั้ง ควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของก๊าซไอเสีย ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิก๊าซไอเสีย 3 ระดับ คือ 200, 250 และ 300 °C โดยใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิการทำงานของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (magnetic contactor) สำหรับตัดและต่อกระแสไฟฟ้าให้ชุดลดความร้อนทำงาน และสามารถปรับความเร็วก๊าซไอเสียได้ 3 ระดับ คือ สูง กลางและต่ำ โดยใช้ดริมเมอร์ (dremmer) ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (motor) ที่ขับพัดลม ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัว โดยใช้ก๊าซไอเสีย ดังรูปที่ 1 และวงจรไฟฟ้าของเครื่องผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัว โดยใช้ก๊าซไอเสีย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เครื่องผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัวโดยใช้ก๊าซไอเสีย

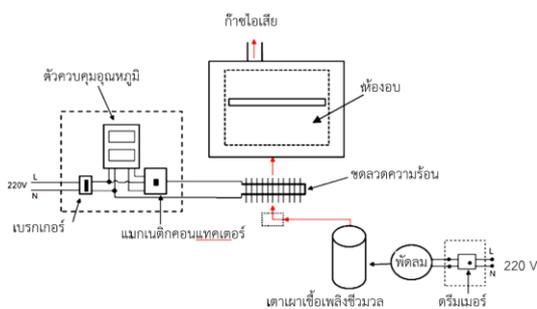


รายละเอียดเตาเผา



รายละเอียดตุ๋น

รูปที่ 1 เครื่องผลิตถ่านตุ๋นจากข้าวโดยใช้ก๊าซไอเสีย (ต่อ)



รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานและวงจรไฟฟ้าของเครื่องผลิตถ่านตุ๋นจากข้าวโดยใช้ก๊าซไอเสียและตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิเครื่องวัดกิโลวัตต์ฮาวมิเตอร์

3.2 ศึกษาผลตัวแปรควบคุมโดยแปรค่าอุณหภูมิและความเร็วของก๊าซไอเสียต่อคุณสมบัติของถ่านตุ๋นจากข้าวและอัตราการใช้พลังงานจำเพาะ

ตัวแปรที่ศึกษา โดยควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ 200, 250 และ 300 °C และความเร็วของก๊าซไอเสียที่ 1.22, 1.74 และ 2.27 m/s โดยทำการทดสอบอยู่ 9 การทดสอบ ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ รวมทั้งหมด 27 การทดสอบ

3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ ฝักข้าวสดจำนวน 6 ฝัก หาได้จากหนองน้ำบริเวณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ใช้ฝักข้าวสดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 56.5 mm มีค่าความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 86.19±1.67 (Wet Basis) ตั้งรูปที่ 3 เชื้อเพลิงชีวมวล ใช้ไม้ยูคาลิปตัส (eucalyptus) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 60 ถึง 80 mm และมีความยาว 25 mm โดยไม้ยูคาลิปตัส (eucalyptus) มีค่าความร้อนสูง คือ 17.6 MJ/kg [11] ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ฝักข้าวสด

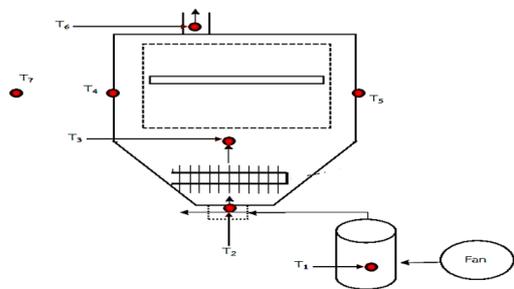


รูปที่ 4 ไม้ยูคาลิปตัส (eucalyptus)

3.4 เครื่องมือตรวจวัดสำหรับเก็บข้อมูล

1. เครื่องวัดอุณหภูมิรุ่น TM-1947SD แบบ 4 ช่อง (channels) แสดงผลอุณหภูมิบนหน้าจอพร้อมกันทั้ง 4 ช่อง (channels) ใช้งานกับเทอร์โมคัปเปิลประเภท K (thermocouple Type K) ฟังก์ชันบันทึกข้อมูลด้วยการ์ด SD (SD card) (รองรับ SD card 1-16 GB) ตำแหน่งการติดตั้ง ดังรูปที่ 5
2. เครื่องชั่งดิจิตอล (digital) สำหรับชั่งน้ำหนักผักบวบและไม้ยูคาลิปตัส 1500 g × 0.1 g, 3000 g × 0.2 g ยี่ห้อ LGCN-1530
3. เครื่องวัดความเร็วรุ่น AMF028 ตรวจวัดความเร็วของอากาศก่อนเข้าเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล
4. เครื่องวัดกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh meter) ใช้ตรวจวัดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า
5. เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (infra red) รุ่น LEGA LT-760GX (with thermocouple Type K) ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิในเตาชีวมวล

เนื่องจากเป้าหมาย คือ การควบคุมอุณหภูมิในตู้อบ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ศึกษา ดังนั้นผลการตรวจวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งอื่นจึงไม่ได้แสดงผลในบทความนี้



โดย T_1 คือ อุณหภูมิเตาชีวมวล, T_2 คือ อุณหภูมิก่อนเข้าตู้อบ, T_3 คือ อุณหภูมิในตู้อบ, T_4 คือ อุณหภูมิผนังตู้อบด้านซ้าย, T_5 คือ อุณหภูมิผนังตู้อบด้านขวา, T_6 คือ อุณหภูมิหลังออกตู้อบ, T_7 คือ อุณหภูมิบรรยากาศภายนอก

รูปที่ 5 ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของเครื่องผลิตถ่าน ดูดกลืนจากบวบโดยใช้ก๊าซไอเสียของการคาร์บอนเนชันชีวมวลร่วมกับขดลวดความร้อน

3.5 ขั้นตอนการทดสอบและเก็บข้อมูล

จุดไฟที่เตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล เปิดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ สำหรับควบคุมอุณหภูมิที่ก๊าซไอเสียตามที่ต้องการ โดยเปิดให้ระบบทำงานประมาณ 30 ถึง 40 min และเก็บข้อมูลทุก ๆ 30 min จนผักบวบสดกลายเป็นถ่านหลังจากหยุดเครื่องแล้วให้เปิดตู้อบแห้งให้นำถ่านดูดกลืนจากผักบวบไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 hr. สำหรับตรวจสอบความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบและนำถ่านดูดกลืนจากผักบวบไปหาคุณสมบัติของถ่านดูดกลืนจากบวบ โดยการวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine number)

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

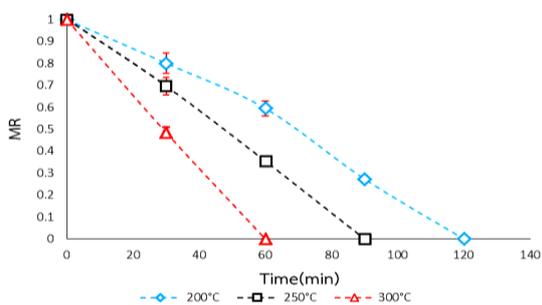
คำนวณอัตราส่วนความชื้นตาม ดังสมการที่ (3) คำนวณค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) ตาม ดังสมการที่ (1) และคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานจำเพาะตาม ดังสมการที่ (4)

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

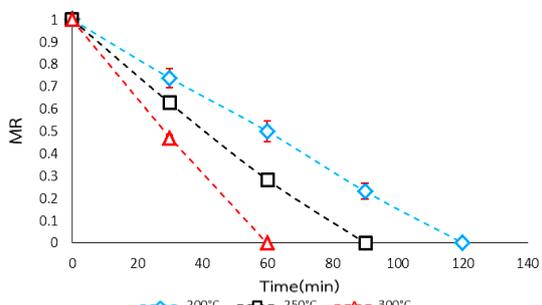
4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของถ่านดูดกลืนจากผักบวบ

การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของถ่านดูดกลืนจากผักบวบที่อบเป็นถ่าน ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาที่ใช้ในการอบผลของอุณหภูมิ พบว่า เมื่อในช่วงเวลา 0 ถึง 30 min ที่อุณหภูมิ 300°C มีอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงมากที่สุด เนื่องจากเป็นอุณหภูมิสูงที่สุดที่ใช้ในการทดลองจึงทำให้น้ำระเหยออกจะผักบวบได้มาก ใช้เวลา 60 min ที่อุณหภูมิ 250°C ใช้เวลา 90 min และที่อุณหภูมิ 200°C ใช้เวลา 120 min ดังนั้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการลดของอัตราส่วนความชื้นลดลง ซึ่งผลของอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งถ่านอัดแท่ง [12] ส่วนความเร็วก๊าซไอเสีย เมื่อเพิ่มขึ้นมีผลให้อัตราส่วนความชื้นลดลงไวขึ้น โดยสามารถเปรียบเทียบความชันของเส้นกราฟในช่วง 30 นาที แรกของความเร็วก๊าซไอเสีย 1.22 m/s และ 2.27 m/s ซึ่งอยู่ในช่วงที่บวบยังมีความชื้นสูง แต่หากพิจารณาไปจนถึงความชื้นสุดท้ายไม่มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการลดของอัตราส่วนความชื้น ดังรูปที่

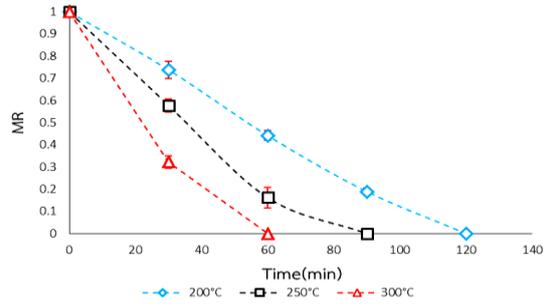
6 ถึง รูปที่ 8 เนื่องจากขีดจำกัดของดริมเมอร์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (motor) ที่ขับพัดลม จึงทำให้ช่วงความเร็วที่ใช้ต่างกันไม่มากพอและช่วงการเก็บข้อมูลก็ห่างกัน 30 นาที และวัตถุบิไม่ได้สัมผัสกับก๊าซไอเสียโดยตรง เนื่องจากถูกออกแบบไว้ในห้องอบอีกชั้นหนึ่ง สำหรับป้องกันไม่ให้เกิดการลุกไหม้จนเปลี่ยนสภาพเป็นถ่าน ส่งผลให้ไอเสียไหลเข้ามาในตู้อบจะสัมผัสผิวผนังด้านนอกของตู้ใส่วัตถุบิ ดังนั้นลักษณะการอบแห้งจึงเป็นการอบด้วยการแผ่รังสีความร้อนทำให้ผลการอบแห้งขึ้นอยู่กับตัวแปรอุณหภูมิเพียงตัวแปรเดียว ซึ่งอุณหภูมิก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นส่งผลให้ใช้เวลาผลิตถ่านดุกกลิ้ง ดังนั้นลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไอเสียไปยังวัตถุบิจึงเป็นลักษณะการแผ่รังสีความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิเป็นตัวแปรหลัก ซึ่งใช้เวลาสั้นลงเมื่ออุณหภูมิก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของวัตถุบิ (MR) ที่ช่วงเวลาใด ๆ ของอุณหภูมิ 200, 250 และ 300°C โดยใช้ความเร็วก๊าซไอเสีย 1.22 m/s



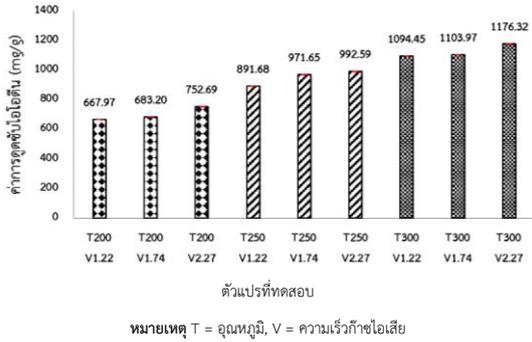
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของวัตถุบิ (MR) ที่ช่วงเวลาใด ๆ ของอุณหภูมิ 200, 250 และ 300°C โดยใช้ความเร็วก๊าซไอเสีย 1.74 m/s



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของวัตถุบิ (MR) ที่ช่วงเวลาใด ๆ ของอุณหภูมิ 200, 250 และ 300°C โดยใช้ความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s

4.2 ผลการทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) ของถ่านดุกกลิ้งจากฝักบัว

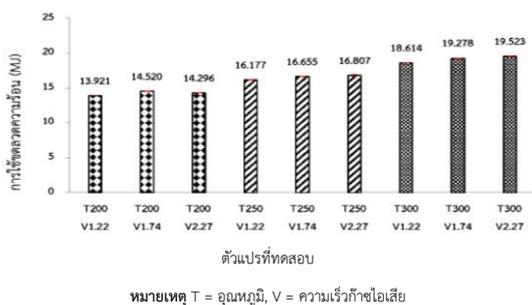
จากการทดลองการหาค่าการดูดซับค่าไอโอดีน (iodine) ของถ่าน พบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) ที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อให้ความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) มีค่าเพิ่มขึ้นและที่ความเร็วก๊าซไอเสียเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้น ผลของอุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) เพิ่มขึ้น สภาวะที่มีค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงสุด คือ ที่อุณหภูมิ 300°C และความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s ดังรูปที่ 9 เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความเร็วสูง ดังนั้น อัตราความร้อนที่ส่งไปยังฝักบัวจึงสูงตามส่งผลให้น้ำเปลี่ยนจากเฟสเหลวเป็นเฟสไอได้ไว ซึ่งส่งผลโดยตรงกับถ่านบิเกิดรูพรุนในโครงสร้าง จึงทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสอดคล้องกับงานวิจัย [13] การผลิตถ่านจากกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุด ด้วยวิธีใช้ไอน้ำความร้อนสูงและวิธีชุบด้วยซิงค์คลอไรด์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการดูดซับไอโอดีนสูงขึ้นตามด้วยเช่นกัน



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) เทียบกับตัวแปรที่ทดสอบ

4.3 การใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน

การใช้ขดลวดความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิให้มีความคงที่ หลังจากที่ได้รับก๊าซไอเสียจากเตาเผาชีวมวล ซึ่งได้อุณหภูมิไม่คงที่จึงจำเป็นต้องใช้ขดลวดความร้อน ซึ่งการใช้ขดลวดความร้อนถ้าต้องการอุณหภูมิที่สูงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อนจะสูงขึ้นตาม เนื่องจากอุณหภูมิสูงต้องการความร้อนมาก จึงทำให้มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อนมากและที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อให้ความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นนั้นค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 10

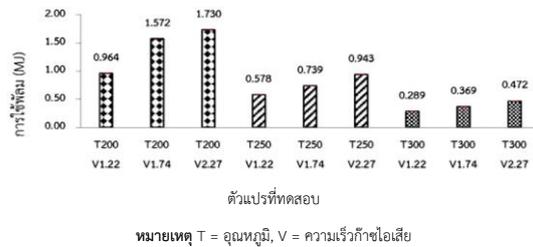


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบการใช้ขดลวดความร้อนกับตัวแปรที่ทดสอบ

4.4 การใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลม

การใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลม พบว่า ผลที่ทำให้การใช้ไฟฟ้าของพัดลมเพิ่มขึ้นนั้น คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบของแต่ละอุณหภูมิที่ 200°C มีค่าการใช้

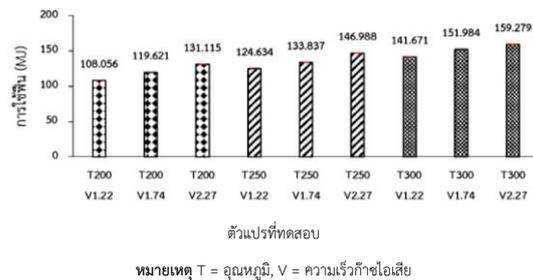
พลังงานไฟฟ้าของพัดลมมาก เนื่องจากมีระยะเวลาที่ใช้ในการอบมากที่สุดที่ 120 min และผลของความเร็วก๊าซไอเสียที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ค่าการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบการใช้พัดลมกับตัวแปรที่ทดสอบ

4.5 การใช้ฟืน

การใช้ฟืนเพื่อผลิตก๊าซไอเสีย หมายถึง ก๊าซไอเสียสำหรับใช้กับฝักบัว ซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้ปริมาณฟืนที่ไม่เท่ากัน โดยปริมาณการใช้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสองชนิด คือ อุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียที่ใช้ในการอบ เช่น ถ้าต้องการอุณหภูมิที่สูงจะใช้ปริมาณฟืนที่มากขึ้นและหากใช้ความเร็วก๊าซไอเสียมากขึ้นจะทำให้ฟืนนั้นหมดไวขึ้น จึงต้องใช้ปริมาณฟืนที่มากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 12

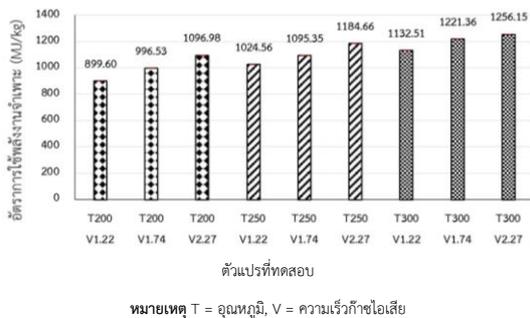


รูปที่ 12 การเปรียบเทียบการใช้ฟืนกับตัวแปรที่ทดสอบ

4.6 อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ

อัตราการใช้พลังงานจำเพาะในการ ศึกษาผลตัวแปรควบคุมในการผลิตถ่านดุกกลั่นจากบัว พบว่า

เมื่ออุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC) สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอัตราการใช้พลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น ผลกระทบหลัก คือ การใช้พลังงานพื้น รองลงมา คือ การใช้ขดลวดความร้อนและน้อยที่สุด คือ การใช้พลังงานพัดลม ดังรูปที่ 13 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเครื่องอบแห้งที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง โดยอบแห้งเนื้อหมูแดดเดียวที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65 °C และความเร็วมวลภายในห้องอบแห้ง 1.0, 3.0 และ 6.0 m/s พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือความเร็วมวลส่งผลให้อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น [14]



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานจำเพาะกับตัวแปรที่ทดสอบ

5. สรุป

การผลิตถ่านตุ๊กตกลินจากฝักบัว โดยใช้ผลตัวแปรควบคุม 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิและความเร็วของก๊าซไอเสีย จากการทดสอบผลตัวแปรควบคุมในการผลิตถ่านตุ๊กตกลินจากฝักบัว โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 °C ความเร็วของก๊าซไอเสีย 1.22, 1.74 และ 2.27 m/s พบว่า

- เมื่ออุณหภูมิก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการลดของอัตราส่วนความชื้นลดลง ซึ่งอุณหภูมิก๊าซไอเสีย 200, 250 และ 300 °C ใช้เวลาผลิตถ่านตุ๊กตกลิน 120, 100 และ 60 นาที ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิกึ่งที่และเพิ่มความเร็วใช้เวลาผลิตถ่านตุ๊กตกลินเท่ากันเนื่องจากวัตถุดิบไม่ได้สัมผัสกับก๊าซไอเสียโดยตรง

- เมื่ออุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นทำให้ค่าไอโอดีนมีค่าสูงขึ้น

- เมื่ออุณหภูมิและความเร็วก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราการใช้พลังงานจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเมื่อคำนวณสัดส่วนการใช้พลังงานพลังงานไฟฟ้าของขดลวดความร้อน พลังงานไฟฟ้าของพัดลมและการใช้พื้นที่สภาวะที่ได้ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงสุดที่ 300 °C ความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s ได้สัดส่วนร้อยละ 10.89, 0.26 และ 88.84 ตามลำดับ

- ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงสุดที่ 300 °C ความเร็วก๊าซไอเสีย 2.27 m/s มีค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) สูงถึง 1176.32±21.562 mg/g ซึ่งมีค่าสูงใกล้เคียงกับผงถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทศาจังหวัดระนอง ที่ใช้อุณหภูมิ 600 °C ใช้เวลา 2 hr. ได้ค่าการดูดซับไอโอดีน (iodine) 1,247 mg/g [15]

- งานครั้งต่อไป ควรวิจัยการผลิตถ่านตุ๊กตกลินจากส่วนประกอบอื่น ๆ ของบัว เช่น ดอก ใบและก้านใบ เป็นต้น และควรทดสอบโดยให้ส่วนประกอบบัวสัมผัสกับก๊าซไอเสียโดยตรง ทั้งนี้ก็ต้องหาจุดสภาวะที่ถ่านบัวเกิดเป็นถ่านหากก๊าซไอเสียมีปริมาณออกซิเจนเจือปนจนเพียงพอที่จะเกิดการลุกไหม้ของถ่านบัวได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการจัดเก็บข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mai Ngam Subdistrict Municipality. Nong Bua Public Park of Nong Luang. [Internet]. [28 November 2024]; Available from: Online., <https://www.maingam.go.th/trv-otp-detail?page=4&id=730> (In Thai)
- [2] Boonyang K. Developing grassroot economy by creating value of royal lotus of communities in Yokkrabat Subdistrict, Samngao District, Tak Province. *Academy Journal of Northern*. 2023;10 (2):27-43.

- [3] Pianjing P, Punyakhom P, Prapreud W, Kitprathang N, Phromsat Ph, Wites J. Development of odor absorbed charcoal lump product from nipa palm fruit. Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology). 2023;18(2):14-29. (In Thai)
- [4] Kengkhetwit C. Investigation of the effect of burning temperature range on physical changes and iodine value in mangosteen odor adsorbing charcoal. [master's thesis]. Bangkok: Mahanakorn University of Technology; 2014. (In Thai)
- [5] Sinsaard A. Development of activated charcoal from a coconut shell kiln. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal. 2017;10(2):95-108. (In Thai)
- [6] Li Q, Liu S, Wang L, Chen F, Shao J, Hu X. Efficient nitrogen doped porous carbonaceous CO₂ adsorbents based on lotus leaf. Journal of Environmental Sciences. 2021;103:268-78.
- [7] Thai Industrial Standards Institute. Community Product Standard for Odor-Absorbing Charcoal (M P Ch. 180/2003) [Internet]. 2013 [24 July 2024]; Available from: <https://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/standard1.php> (In Thai)
- [8] Buaklee A. Design and fabrication of lotus leaves cutting machine. [master's thesis]. Pathum Thani: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2018. (In Thai)
- [9] Rattanapan S, Pengchaem P, Kongsun P. Preparation and characterization of mangosteen peel activated carbon. ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports (AJSTR). 2014;17(3):13-21. (In Thai)
- [10] Chunkaew P, Tavata A, Khadwilard A, Sriudom Y. Bananas drying performance with a developed hot air dryer using waste heat from charcoal production process. RMUTP Research Journal. 2018;12(1):147-58. (In Thai)
- [11] Chunkaew P, Khadwilard A, Thawonngamyingsakul C. Drying bananas with a modified hot air dryer using waste heat from a 200 liter kiln. Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal). 2017;10(3):1-12.
- [12] Congpupa P, Tapie O, Saadchom P. Effect of drying temperatures on charcoal briquettes drying using a combined solar energy and far-infrared radiation dryer, and a far-infrared radiation dryer. RMUTP Research Journal Sciences and Technology. 2016;10(1):77-93. (In Thai)
- [13] Niamsewak P. Comparison of adsorption capacity of activated carbon obtained from different production methods and materials. Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal. 2010;2(2):11-18. (In Thai)
- [14] Somsila P, Buntham E, Homjumba T. Development of a dryer using biomass as fuel. PSRU Journal of Industrial Technology and Engineering. 2022;4(1):107-24.
- [15] Yoomee P. Preparation of high surface area activated charcoal from wood charcoal powder using a dry chemical activation process. KKU Science Journal. 2015;43(4):788-98.