PROCEEDINGS

การประชุมวิชาการระดับชาติ

กรุงเก่าวิจัย ครั้งที่ 7

2024 7th EEAAT & ARU CON.

โดยสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
และภาคีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาไทย

19 - 20 ธันวาคม 2567

ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

ภาคบรรยาย | ภาคโปสเตอร์

2024 7th EEAAT & ARU CON

PROCEEDINGS

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ
"กรุงเก่าวิจัย" ครั้งที่ 7
(2024 7th EEAAT & ARU CON.)

โดย สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
และภาคีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาไทย

วันที่ 19 – 20 ธันวาคม พ.ศ. 2567
ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

สารบัญ

บทความวิจัยภาคบรรยาย

ลำดับที่	รหัสบทความ	กลุ่มวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม (ST)	หน้า
10	ST-080	ระบบพยากรณ์ราคาทองโดยวิธีการเรียนรู้ด้วยเครือข่ายหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว *ณิชวรรณ ธำรงค์ศักดิ์ วชิรวิชญ์ สิริปิยพัทธ์ อชิต สันติกาญจน์ และวิชุกร คันธินทระ*	561
11	ST-081	การหาผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์กำลังสองสามตัวแปร $x^2+7y^2=71z^2$ *เกศรินทร์ ไหล่แท้ เพียงพิศ อิ่มคง และวันชัย ตาปัญโญ*	569
12	ST-084	แอพพลิเคชันระบบจัดเก็บค่าเช่าล็อคจำหน่ายสินค้าตลาดคนดอย อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย *ปิยพนธ์ หนันชัย อธิคม ศิริ และภูมิพงษ์ ดวงตั้ง*	578
13	ST-085	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูล *สาคเรศ พิกุลทอง พงศกร ฉ่ำผล และยุภาวดี สำราญฤทธิ์*	587
14	ST-090	ชุดตรวจสอบและควบคุมไฟถนนระยะไกล และการแจ้งเตือนสถานะผ่านสมาร์ทโฟน *มานะ ทะนะอัน สุรสิทธิ์ แสนทอน กัญญพัชร บุญครอบ และสิทธิพงษ์ เพ็งประเดิม*	597
15	ST-091	การพัฒนาเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดสำหรับฟางข้าว *นิธิพัฒน์ อิ่วสกุล เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์ ชวัญฤทัย วงศ์กำแหงหาญ และดวงฤทัย นิคมรัฐ*	607
16	ST-100	เครื่องนับจำนวนผลมะนาวจากการคัดแยกขนาด สีและน้ำหนักโดยอาศัยแรงเหวี่ยงควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ *โชคชรัตน์ ฤทธิ์เย็น ธีรศักดิ์ จันทร์เชื้อ สาธิต ยอดพิบุตร และอภิสิทธิ์ สิมมา*	616
17	ST-104	การพัฒนาแพลตฟอร์มสำหรับเกษตรอัจฉริยะขนาดใหญ่ กรณีศึกษาเกษตรกรรมในจังหวัดสุโขทัย *ภากร จูเหลิง สมศักดิ์ มิตะถา และศวัสกร ไชยสุนทร*	628
18	ST-105	การออกแบบคอนเทินต์เพื่อประชาสัมพันธ์ศูนย์เรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียง อำเภอเก้าเลี้ยว จังหวัดนครสวรรค์ *ธวัช หะยิ้ม รัชญา อยู่โสภิชา พงษ์พันธ์ พรหมสูตร และชลธิชา อยู่กระโทก*	640

การพัฒนาเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดสำหรับฟางข้าว

Development of a Fixed-Bed Torrefaction Furnace for Rice Straw

นิธิพัฒน์ อิ่วสกุล[1] เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์[2*] ขวัญฤทัย วงศ์กำแหงหาญ[3] และ ดวงฤทัย นิคมรัฐ[4]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
[3]สาขาวิชาการตลาด คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[4]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[1]Email: nitipat.e@rmutp.ac.th; [2*]Email: chalermpol.r@rmutsb.ac.th; [3]Email: kwanmtai.v@rm.dtp.ac.th; [4]Email: duongruthai.n@rmutp.ac.th
*Corresponding Author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดสำหรับฟางข้าวขนาดเล็ก เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับฟางข้าว เครื่องถูกออกแบบให้มีชิ้นส่วนน้อยเพื่อความสะดวกในการบำรุงรักษา เหมาะสำหรับการใช้งานในครัวเรือนหรือชุมชน โดยทำงานที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของฟางข้าวให้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ดีขึ้น ภายใต้การทำงานแบบอับอากาศที่ความดันบรรยากาศ เครื่องต้นแบบขนาด 25 ลิตร สามารถบรรจุฟางข้าวได้ 1500 กรัม ใช้ตัวทำความร้อน 220 โวลต์ 700 วัตต์ 2 ชุด ใช้เวลาในการทอรีแฟคชั่น 130 นาที และใช้พลังงานไฟฟ้า 2.0 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าฟางข้าวหลังทอรีแฟคชั่นมีน้ำหนักลดลงเหลือ 600 กรัม (ลดลง 40%) นอกจากนี้ ยังส่งผลให้พลังงานของเชื้อเพลิงที่ได้เพิ่มขึ้น 15% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเดิม ในกระบวนการทำงานเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของชีวมวล รวมถึงการผลิตสารระเหยและแก๊สภายในระบบเตา โดยชุดตัวทำความร้อนทั้งด้านบนและด้านล่างทำงานอิสระกัน เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้มีความเหมาะสมและสม่ำเสมอ ในสภาวะอับอากาศภายใต้ความดันบรรยากาศ ซึ่งสร้างความปลอดภัยให้กับผู้ใช้งาน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในภาคการเกษตรอุตสาหกรรมจึงไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้ฟางข้าว แต่ยังสนับสนุนความยั่งยืนและลดขยะในอุตสาหกรรมเกษตรกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแสดงถึงการควบคุมอุณหภูมิและการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพในเชิงพาณิชย์ในอนาคต

คำสำคัญ : ฟางข้าว//ทอรีแฟคชั่น//ฟิกซ์เบด

Abstract

This research aims to develop a fixed-bed torrefaction machine specifically designed for small-scale rice straw processing, with the objective of increasing the value of rice straw. The machine is designed with fewer components to facilitate maintenance, making it suitable for household or community use. It operates at temperatures not lower than 300 degrees Celsius to enhance the characteristics of rice straw, improving it as a biomass fuel under anaerobic conditions at atmospheric pressure. The 25-liter prototype can accommodate 1500 grams of rice straw and utilizes two heating elements rated at 220 volts and 700 watts each. The torrefaction process takes 130 minutes and consumes 2.0 kilowatt-hours of electricity. Experimental results indicate that the weight of the rice straw after torrefaction is reduced to 600 grams (a 40% reduction) and the energy content of the resulting fuel increases by 15% compared to the original weight. During the process, chemical structural changes occur within the biomass, including the production of volatiles and gases inside the reactor system. The heating elements operate independently at both the top and bottom of the machine to maintain appropriate and uniform temperature control. Conducted under anaerobic conditions at atmospheric pressure, this design enhances user safety. The application of this technology in the agricultural sector not only aims to increase the value of rice

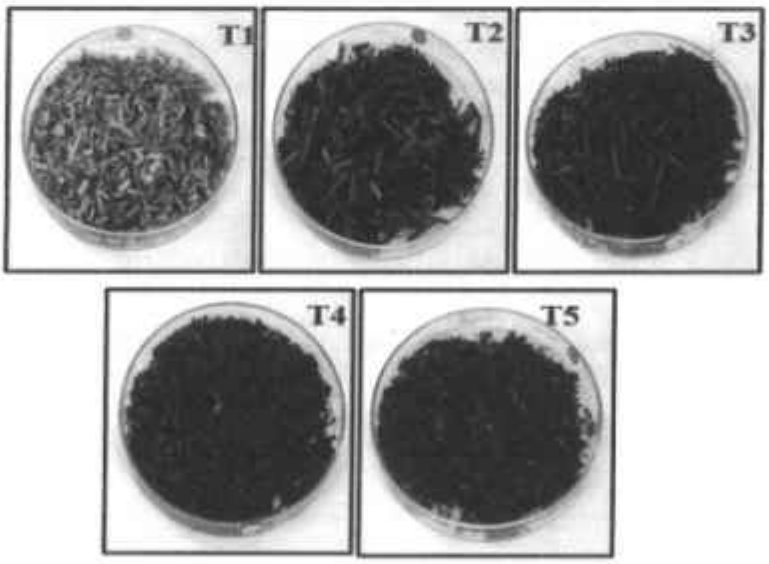
straw but also promotes sustainability and effectively reduces waste in agricultural industries. This approach demonstrates potential for efficient temperature management and energy usage in future commercial applications.

Keyword: rice straw, torrefaction, fixed bed

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

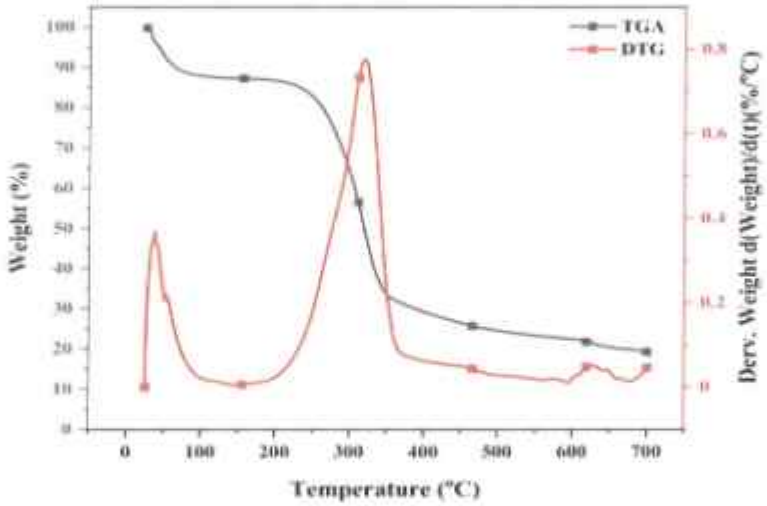
ปัจจุบันแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 13 มีจุดมุ่งหมายจะให้ไทยมีเศรษฐกิจหมุนเวียนและสังคมคาร์บอนต่ำ และมีทิศทางส่งเสริมด้านการสร้างมูลค่าเพิ่มจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงผลกระทบจากภัยธรรมชาติ รวมถึงตอบสนองกระแสการเปลี่ยนแปลงของโลก [1] และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้ดำเนินโครงการนำร่อง [2] โดยรวบรวมวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีการกำจัดเศษวัสดุเหลือใช้โดยการเผา ก่อให้เกิดปัญหาฝุ่นควัน PM 2.5 เป็นประจำทุกปี ด้วยการรับซื้อเปลือก ซังของข้าวโพด ขนส่งมายังโรงไฟฟ้าเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินได้ สำหรับฟางข้าวเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นจำนวนมากที่ถูกกำจัดโดยการเผา ก่อให้เกิดปัญหาฝุ่นควัน PM 2.5 เป็นประจำทุกปีเช่นกัน ปัจจุบันยังคงมีแนวคิดและส่งเสริมให้นำมาใช้ประโยชน์เพิ่มมูลค่าเพิ่มมากกว่าการเผาทิ้ง ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการเผาฟางข้าวมีหลากหลาย [3] เช่น น้ำมันชีวภาพ มีศักยภาพในการใช้งานที่สำคัญในด้านการเกษตร วัสดุศาสตร์ และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง [9, 10, 12] โดยเฉพาะในปุ๋ยอินทรีย์ พลาสติกชีวภาพ และส่วนประกอบในเครื่องสำอาง ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีสารอาหารสำคัญ เช่น ไพแทสเซียม ฟอสฟอรัส และซิลิกา ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช [11] น้ำมันชีวภาพยังสามารถแปรสภาพเป็นพลาสติกชีวภาพ เช่น กรดพลีลาคติก (PLA) และพอลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHA) [8] นอกจากนี้ ยังใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางเพื่อดูแลผิว เช่น ครีมบำรุงหน้า เซรั่ม และโลชั่น โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้มักมีส่วนผสมจากธรรมชาติ ซึ่งช่วยให้ผิวชุ่มชื้น อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์พลอยได้เหล่านี้ต้องผ่านการทำให้บริสุทธิ์และการประมวลผลเพิ่มเติมเพื่อรับประกันคุณภาพและความปลอดภัย เพื่อการพัฒนาการนำไปใช้ประโยชน์เหล่านี้จึงมีงานวิจัยออกมา [12] และการนำฟางข้าวซึ่งเป็นชีวมวลอีกรูปแบบมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงจากชีวมวลก็ยังเป็นงานที่ยังคงน่าสนใจมีงานวิจัยออกมาอย่างต่อเนื่องในรูปแบบทอรีแฟคชั่นชีวมวลโดยที่ฟางข้าวมีอุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส [4] การทำทอรีแฟคชั่นเพื่อกำจัดข้อด้อยหรือข้อจำกัดหลายอย่างจากการนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงเช่น มีค่าความชื้นสูง ค่าความร้อนต่ำ ดูดความชื้นจากภายนอก ย่อยให้เป็นชิ้นเล็กยาก มีสารระเหยในตัวสูง ขนาดใหญ่ ความหนาแน่นต่ำ มีคุณสมบัติที่ทางเชื้อเพลิงไม่แน่นอน ฯลฯ จากงานวิจัยทำการทดลองและเก็บผลทอรีแฟคชั่นฟางข้าวที่ T1 T2 T3 T4 และ T5 คืออุณหภูมิที่ 0 250 300 350 และ 400 องศาเซลเซียสตามลำดับ [5] แสดงให้สังเกตเบื้องต้นได้ถึงอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนสีของฟางข้าว ดังรูปที่ 1



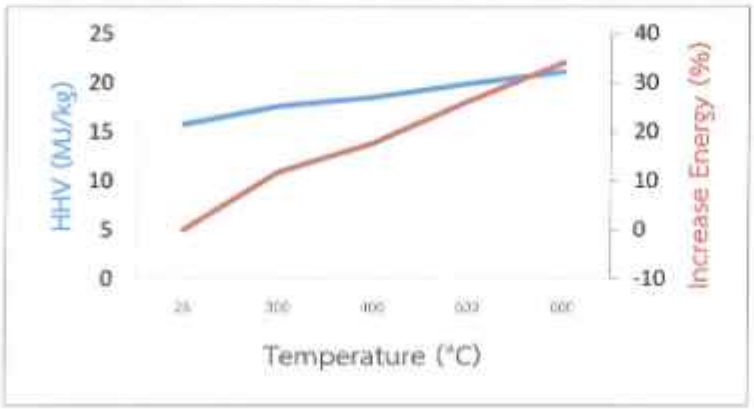
รูปที่ 1 ลักษณะชีวมวลจากการทอรีแฟคชั่นที่อุณหภูมิต่างกัน [5]

ในเบื้องต้น การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลในรูปแบบโรงงานขนาดใหญ่ที่มีการทำงานต่อเนื่อง [6] นั้นมีความซับซ้อนและต้องการการลงทุนสูง ซึ่งอาจไม่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีเฉพาะในช่วงฤดูกาล แต่จำเป็นต้องมีการจัดการเพื่อลดการเผาทิ้ง ดังนั้น ทีมวิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดที่ใช้ในห้องทดลอง เพื่อให้สามารถทำงานในปริมาณที่มากขึ้น โดยไม่ซับซ้อนในการนำฟางข้าวผ่านกระบวนการทอรีแฟคชั่น ก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในขั้นตอนถัดไป ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับเกษตรกรและผู้ประกอบการขนาดเล็กที่สามารถนำเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดไปใช้ในการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล ก่อให้เกิดการหมุนเวียนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งสร้างรายได้จากการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้เกิดมูลค่าเพิ่มในพื้นที่

จากกราฟในรูปที่ 2 แสดงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิฟางข้าวที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (Thermogravimetric Analysis: TGA) และ (Derivative Thermogravimetric Analysis: DTG) ของฟางข้าวที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส น้ำหนักชีวมวลลดลงเหลือประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเดิมและมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึงประมาณ 500 องศาเซลเซียส น้ำหนักชีวมวลลดลงเหลือประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเดิม ซึ่งมีอัตราการลดลงไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 3 ข้อมูลการวิเคราะห์ [15] เมื่อใช้เวลาดำเนินการ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 300 – 600 องศาเซลเซียส สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสูงสุด (Higher heating value: HHV) (MJ/kg) และค่าพลังงานของฟางข้าวในรูปถ่านชีวมวลที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานต่อน้ำหนักชีวมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส สามารถให้พลังงานสูงขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์จากอุณหภูมิ 25องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จะเลือกใช้อุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียสในการทดลอง



รูปที่ 2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง TGA และ DTG ของฟางข้าว [13-14]



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าความร้อน HHV เมื่อเพิ่มอุณหภูมิฟางข้าว [15]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อการพัฒนาเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดสำหรับฟางข้าวเพื่อใช้ในระดับครัวเรือนหรือชุมชนขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

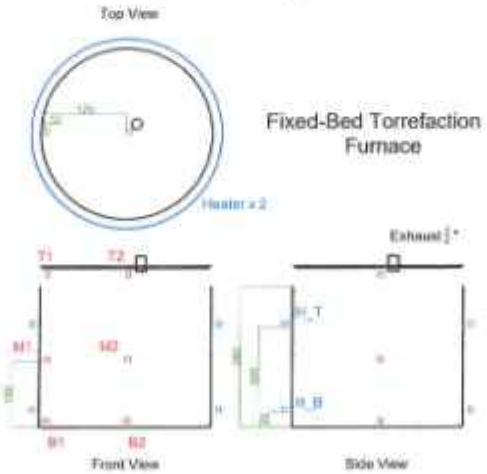
การจัดสร้างเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดสำหรับฟางข้าวที่สามารถควบคุมอุณหภูมิทอรีแฟคชั่นไม่ต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ในสภาวะรูปแบบอับอากาศที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าว

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การจัดสร้างเครื่องต้นแบบเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดสำหรับฟางข้าวมีขนาดความจุ 25 ลิตร ใช้ตัวทำความร้อนขนาด 220 โวลต์ 700 วัตต์ จำนวน 2 ชุด ดังรูปที่ 4 เพื่อต้องการทำให้อุณหภูมิในเตาทอรีแฟคชั่นไม่ต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส สามารถบรรจุฟางข้าวก่อนทอรีแฟคชั่นน้ำหนัก 1500 กรัม และต้องให้มีความร้อนที่กระจายภายในเตาให้ใกล้เคียงกัน เพื่อให้ฟางข้าวที่ผ่านขบวนการทอแฟคชั่นนั้นจะได้มีคุณลักษณะเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าวที่สม่ำเสมอ ส่วนของเตาทอรีแฟคชั่นได้ทำการแยกส่วนภายนอกประกอบด้วยตัวทำความร้อนและฉนวนหุ้มหนา 25 มิลลิเมตร และส่วนของตัวเตาสำหรับการผาชีวมวล โดยส่วนของตัวเตานั้นจะสามารถแยกออกจากส่วนตัวทำความร้อนแยกเป็นชุดด้านบน (H_T) และชุดด้านล่าง (H_B) มีส่วนช่องระบายอากาศ (Exhaust) เพื่อต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตามอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น และส่วนของเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 เซนติเมตร และสูง 28 เซนติเมตร พร้อมทำการติดตั้งชุดตรวจวัดความร้อนแยกเป็น 2 ชุด คือติดตั้งบริเวณผนังเตา 3 จุด ตำแหน่งบน (T1) กลาง (M1) และล่าง (B1) และติดตั้งบริเวณแนวกลางเตา 3 จุด ตำแหน่งบน (T2) กลาง (M2) และล่าง (B2) ดังรูปที่ 5 เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตา การแยกส่วนของส่วนให้ตัวทำความร้อนและส่วนเตาเพื่อให้การระบายความร้อนหลังจากการทำกระบวนการทอรีแฟคชั่นเสร็จได้เร็วขึ้น จากการยกเตาแยกออกจากส่วนตัวทำความร้อน ทั้งนี้การปรับปรุงนี้จะช่วยให้กระบวนการทอรีแฟคชั่นมีประสิทธิภาพสูงขึ้นทั้งในด้านการควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำงาน

a) b)

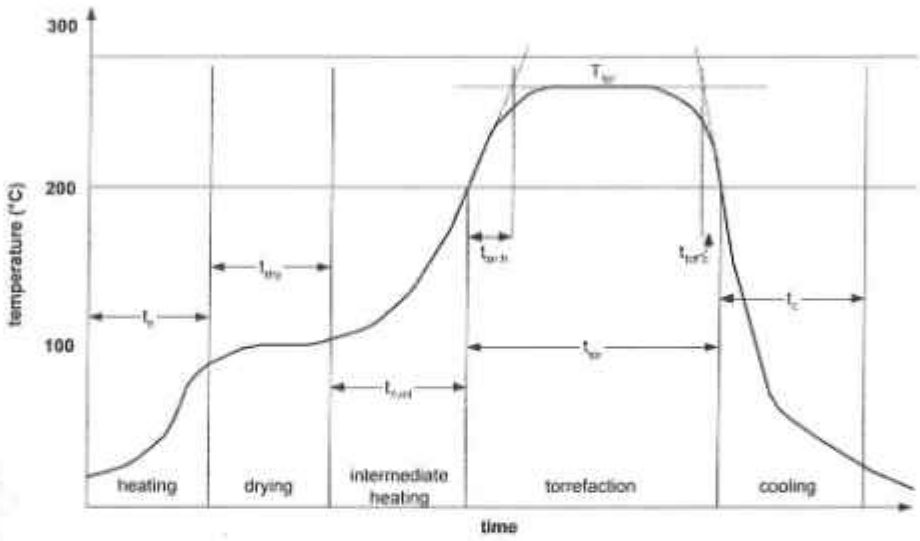
รูปที่ 4 องค์ประกอบของเตาทอรีแฟคชั่น a) ตัวเตา ฉนวนหุ้มและตัวทำความร้อน b) การประกอบใช้งาน



รูปที่ 5 ขนาดเตาทอรีแฟคชั่นและตำแหน่งการติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิ

กระบวนการทอรีแฟคชั่นชีวมวลและความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ในกระบวนการทอรีแฟคชั่นชีวมวลได้มีการควบคุมอุณหภูมิอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การเพิ่ม ลด และรักษาอุณหภูมิในช่วงต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและความปลอดภัยสูงสุด. สามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา ดังรูปที่ 6 โดยมีลำดับกระบวนการย่อยดังนี้ 1) การทำให้ชีวมวลร้อนขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึง 100 องศาเซลเซียส (ช่วง th) ในช่วงนี้เป็นการเพิ่มอุณหภูมิของชีวมวลให้ถึงจุดเดือดของน้ำ เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการระเหยความชื้น 2) การทำให้ชีวมวลแห้งหรือระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ช่วง tdry) โดยช่วงนี้น้ำที่มีอยู่ในชีวมวลจะถูกระเหยจนชีวมวลแห้ง พร้อมสำหรับกระบวนการย่อยต่อไป 3) การทำให้ชีวมวลร้อนขึ้นจาก 100 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิทอรีแฟคชั่น (ช่วง th, int) อุณหภูมิในช่วงนี้อยู่ระหว่าง 200–300 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับลักษณะของชีวมวลหรือการออกแบบที่กำหนดโดยผู้วิจัยเอง จะเป็นช่วงที่เริ่มเกิดกระบวนการสลายสารระเหยและแก๊สต่าง ๆ จากชีวมวล 4) การรักษาอุณหภูมิในช่วงทอรีแฟคชั่น ในขั้นตอนนี้ต้องควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนด เพื่อให้กระบวนการปลดปล่อยสารระเหยสมบูรณ์ 5) การลดอุณหภูมิชีวมวลให้ต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส (ช่วง tc) หลังจากกระบวนการทอรีแฟคชั่นเสร็จสิ้น ต้องลดอุณหภูมิของชีวมวลเพื่อป้องกันการลุกติดไฟเมื่อสัมผัสกับอากาศที่มีออกซิเจน

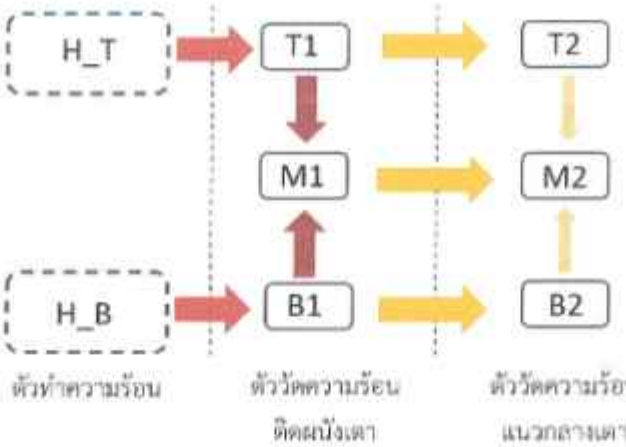


รูปที่ 6 กระบวนการทอรีแฟคชั่นชีวมวล [6]

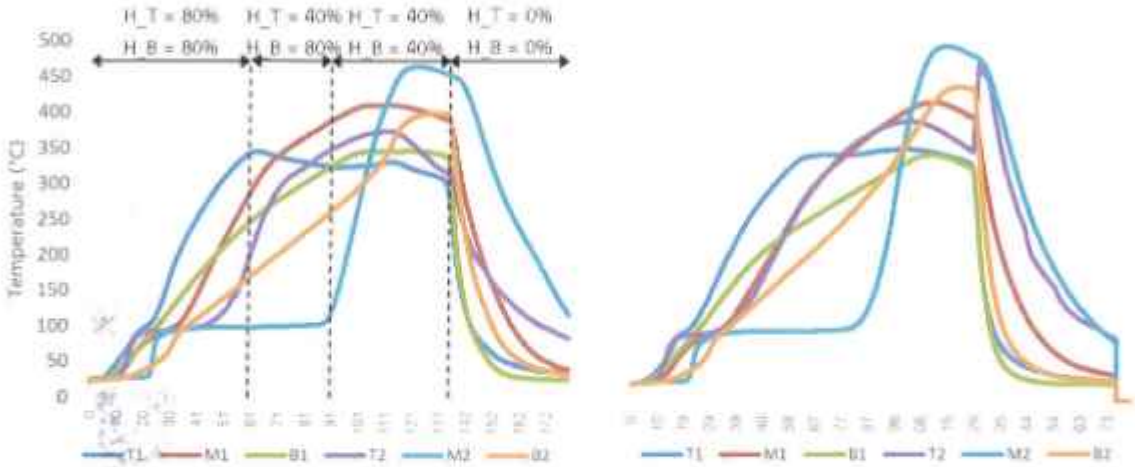
3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การทดลองเริ่มต้นด้วยการจ่ายพลังงานให้กับตัวทำความร้อนด้านบน (H_T) และด้านล่าง (H_B) ซึ่งกระตุ้นให้เกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาตามทิศทางที่แสดงในรูปที่ 7 อุณหภูมิในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาถูกตรวจวัดผ่านชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (รูปที่ 5) และบันทึกผลเพื่อใช้ในการปรับการจ่ายพลังงานให้กับตัวทำความร้อนอย่างเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่และมีค่าไม่ต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในเตาสามารถรักษาระดับที่เหมาะสมได้ต่อเนื่องเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 30 นาที โดยกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่มีความแม่นยำนี้ช่วยให้สามารถบรรลุเป้าหมายของการทดลองได้ตามที่กำหนดไว้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลที่ได้สอดคล้องกับสมมุติฐานในรูปที่ 1 และสำหรับกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาตามเวลาแสดงในรูปที่ 8

จากกราฟรูปที่ 8 a) และ b) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาเผา โดยค่าแกนแนวนอนแสดงค่าเวลา (นาที) แกนแนวตั้งแสดงค่าอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเตาเผาทั้ง 2 ครั้ง เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยผลการทำงาน 2 ส่วนดังนี้



รูปที่ 7 ทิศทางของกระบวนการถ่ายเทความร้อน



a) การทดลองครั้งที่ 1 ใช้พลังงาน 2.04 kW-H b) การทดลองครั้งที่ 2 ใช้พลังงาน 2.01 kW-H

รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตา

หมายเหตุ T1 = อุณหภูมิขอบ-ด้านบนเตา T2 = อุณหภูมิกึ่งกลาง-ด้านบนเตา
M1 = อุณหภูมิขอบ-กึ่งกลางเตา M2 = อุณหภูมิกึ่งกลาง-กึ่งกลางเตา
B1 = อุณหภูมิขอบ-ด้านล่างเตา B2 = อุณหภูมิกึ่งกลาง-ด้านล่างเตา

จากกราฟดังรูปที่ 7 และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สามารถอธิบายถึงองค์ประกอบดังนี้

ส่วนที่ 1 : ส่วนที่รับความร้อนโดยตรง (T1 และ B1)

ช่วงแรกเวลา 0–60 นาที : จากการให้ตัวทำความร้อนด้านบน:H_T และด้านล่าง:H_B ถ่ายเทความร้อนไปยังจุดต่างๆของเตา ซึ่งแบ่งการทำงานออกเป็นช่วงเวลาดังนี้ เริ่มจากการควบคุมตัวทำความร้อนชุดบนและชุดล่างให้ทำงานที่ 80% ของ 700 วัตต์ จนกระทั่ง T1 มีอุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลา 60 นาที เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ T1 และ B1 มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเหมือนกันทั้งรูปที่ 8 ก) และ ข) ซึ่งจะรับความร้อนโดยตรงจากตัวทำความร้อน แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนของ B1 ต่ำกว่า T1 คาดว่าเกิดจากสภาวะอับอากาศด้านล่างมากกว่าและการคายความชื้นที่สูงกว่าด้านบน

ช่วงเวลาที่สอง 60 – 90 นาที เมื่อ T1 มีอุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียสจึงเป็น เป็นการแยกการควบคุม T1 ให้รักษาระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 350 องศาเซลเซียสโดยการจ่ายพลังงานความร้อนชุดบนให้ทำงานที่ 40% ของ 700 วัตต์ ส่วนตัวทำความร้อนชุดล่างยังคงทำงานที่ 80% เห็นได้ว่าการ B1 มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเหมือนกันทั้ง ก) และ ข) ซึ่งถือได้ว่ารับความร้อนโดยตรงจากตัวทำความร้อน

ช่วงเวลาที่สาม 90 – 130 นาที เมื่อ B1 มีอุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียสจึงเป็น เป็นการแยกการควบคุมทั้ง T1 และ B1 ให้รักษาระดับอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 350 องศาเซลเซียส และสังเกตจากรูปที่ 8 ได้ว่า อุณหภูมิภายในเตาไม่มีจุดใดมีค่าต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียสที่เวลา 100 นาทีจึงกำหนดให้ทำงานต่ออีก 30 นาทีเป็นเวลาที่เพียงพอสำหรับการเปลี่ยนโครงสร้างของชีวมวล เพื่อให้ได้คุณภาพเชื้อเพลิงจากเตาเพิ่มขึ้นไม่ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ดังกราฟรูปที่ 3 จึงเป็นการสิ้นสุดการให้ความร้อนเตาที่เวลา 130 นาที เมื่อสิ้นสุดกระบวนการได้ออกแบบให้สามารถยกเตาเผาออกจากฉนวนหุ้มได้ เพื่อการระบายความร้อนที่ดีขึ้นซึ่งใช้เวลาประมาณ 60 นาที อุณหภูมิ สำหรับทำให้เตาเผามีอุณหภูมิภายในลดลงต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จะเปิดเตาเผาได้โดยไม่ทำให้เกิดการลุกไหม้จากออกซิเจนในอากาศ

ส่วนที่ 2 : การถ่ายเทความร้อน (T2, B2, M1 และ M2) ดังรูปที่ 7 ซึ่งไม่ได้รับความร้อนโดยตรงจากตัวทำความร้อน สามารถแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาดังนี้

ช่วงแรก มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามกันในรูปแบบถ่ายเทความร้อนของคู่ T1-T2, B1-B2 และ T1-M1 โดยที่อุณหภูมิตำแหน่งปลายทางที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าต้นทางและมีปรากฏการณ์ทำให้ฟางข้าวแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาไม่เท่ากัน

ช่วงหลัง มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามกันของคู่ T1-T2, B1-B2 และ M1-M2 ในรูปแบบอุณหภูมิตำแหน่งปลายทางสูงกว่าอุณหภูมิต้น หรือว่าอุณหภูมิในแนวตำแหน่งกึ่งกลางมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิในแนวขอบเตาซึ่งอยู่ใกล้กับแหล่งจ่ายความร้อน ซึ่งสันนิฐานว่าเกิดจากขั้นตอนการคายความร้อน เมื่อพิจารณาส่วนความร้อน M2 ที่มีอุณหภูมิสูงสุดแตกต่างกันดัง รูปที่ 8 a) 460 องศาเซลเซียส และ รูปที่ 8 b) 490 องศาเซลเซียส สันนิฐานว่าเกิดจากการให้ความร้อน T1, B1 ของรูปที่ 8 b) มีค่ามากกว่า รูปที่ 8 a) ส่งผลให้เกิดการคายพลังงานความร้อนที่มากกว่า

ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

การดำเนินการใช้เวลาควบคุมความร้อนเตา 130 นาทีและเวลาในการระบายความร้อน 60 นาที รวม 190 นาที โดยใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 2.0 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับผลผลิตที่ได้ คือ ชีวมวลฟางข้าวที่ผ่านการทอรีแฟคชั่น 600 กรัม จากน้ำหนักเริ่มต้น 1500 กรัม น้ำหนักลดลง 40% สอดคล้องกับผลการทดลอง 2 ครั้งที่ให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน

ข้อดีของการออกแบบเตา

เตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมการกระจายความร้อนอย่างแม่นยำ โดยการแยกควบคุมH_T และ H_B ช่วยให้อุณหภูมิภายในเตามีความสม่ำเสมอ ลดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟคชั่น เพิ่มความปลอดภัยด้วยการออกแบบให้ยกเตาเผาออกจากฉนวนหุ้มเพื่อระบายความร้อน ทำให้อุณหภูมิภายในลดลงต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสใน 60 นาที สามารถเปิดเตาได้โดยไม่เกิดการลุกไหม้เมื่อสัมผัสกับออกซิเจน ทำให้ได้ลักษณะชีวมวลฟางข้าวมีสีที่สม่ำเสมอดังรูปที่ 9 ข) ซึ่งสอดคล้องตามข้อสมมติฐานและสอดคล้องกับงานวิจัยดังรูปที่ 1 ว่ากระบวนการที่ดำเนินการควบคุมพลังงานความร้อนด้านบนและด้านล่างของเตาที่แยกการควบคุมต่อกันนั้น เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาทั้งหมดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

a) b)

รูปที่ 9 ลักษณะของฟางข้าวจากกระบวนการทอรีแฟคชั่น a) ฟางข้าวก่อนทอรีแฟคชั่น b) ฟางข้าวหลังทอรีแฟคชั่น

จากผลการวิจัยทั้งหมดดังกล่าวนี้ ชี้ให้เห็นว่า เตาต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามเป้าหมายที่กำหนด โดยการควบคุมอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กระบวนการทอรีแฟคชั่นประสบความสำเร็จ ด้วยการจัดการดังต่อไปนี้ คือ 1) การควบคุมอุณหภูมิภายในเตา ด้วยการกระจายตัวของความร้อนจากตัวทำความร้อนด้านบนและด้านล่างส่งผลให้สามารถรักษาอุณหภูมิที่คงที่ได้ดี 2) การติดตั้งชุดตรวจวัดอุณหภูมิในตำแหน่งที่แตกต่างกันช่วยให้สามารถตรวจสอบและปรับการจ่ายพลังงานได้อย่างแม่นยำ 3) การทำให้มีประสิทธิภาพของระบบถ่ายเทความร้อน ด้วยความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง

ภายในเตาแสดงถึงประสิทธิภาพของการออกแบบระบบถ่ายเทความร้อน และการทำให้ช่วงเวลาการรักษาอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที เป็นแนวทางระบบมีเสถียรภาพเพียงพอสำหรับกระบวนการทอรีแฟคชั่น

ประเด็นข้อพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับการพัฒนาต่อไป คือ ควรมีการปรับปรุงการออกแบบหรือฉนวนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียความร้อน และมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณพลังงานที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลา เพื่อช่วยเพิ่มความคุ้มค่าและลดต้นทุนของกระบวนการเผา

4. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดสำหรับฟางข้าวขนาดเล็กเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับฟางข้าว ได้ใช้แนวคิดการทำงานที่ควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าใกล้เคียงกันทั้งด้านบนและด้านล่างของเตา โดยอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส ระหว่างการทำงาน อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงประมาณ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้เวลาในการดำเนินการรวม 190 นาที และใช้พลังงานไฟฟ้าเพียง 2.0 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ผลจากการดำเนินงานพบว่าน้ำหนักของฟางข้าวลดลงจาก 1500 กรัมเป็น 600 กรัม (ลดลง 40%) ขณะทำงานที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ส่งผลให้พลังงานของเชื้อเพลิงที่ได้เพิ่มขึ้น 15% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเดิม เมื่อชีวมวลได้รับพลังงานความร้อน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี รวมถึงการผลิตสารระเหยและแก๊สในระบบเตา โดยชุดตัวทำความร้อนทั้งด้านบนและด้านล่างจะทำงานอิสระจากกัน เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้มีความเหมาะสมและสม่ำเสมอในกระบวนการทำงาน กระบวนการนี้ดำเนินการในสภาวะอับอากาศภายใต้ความดันบรรยากาศ ซึ่งสร้างความปลอดภัยให้กับผู้ใช้งาน หากประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในภาคการเกษตร อุตสาหกรรมไม่เพียงช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับฟางข้าว แต่ยังสนับสนุนความยั่งยืนการ ลดขยะในอุตสาหกรรมเกษตรกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแสดงถึงการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมและการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพในเชิงพาณิชย์ในอนาคต

5. ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาเตาทอรีแฟคชั่นแบบฟิกซ์เบดสำหรับฟางข้าว มุ่งเน้นเพื่อใช้ในระดับครัวเรือนหรือชุมชนขนาดเล็ก ที่มีรูปแบบการทำงานไม่ซับซ้อน ซึ่งคาดการณ์ว่าจะใช้กับชีวมวลแต่ละชนิดมีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการให้ความร้อน อุณหภูมิ และเวลา มีความสอดคล้องกันในรูปแบบเฉพาะตัว เพื่อการประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม ควรมีการพัฒนาปรับปรุงด้านประสิทธิภาพและการใช้งาน โดยอาจออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติเพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดความซับซ้อน แต่คงกระบวนการทำงานให้ได้เชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ รวมถึงศึกษาความเหมาะสมของวัสดุอื่นๆ เช่น ชีวมวลชนิดอื่น เพื่อขยายขอบเขตการใช้งาน ในด้านการลดต้นทุน ควรพัฒนาวัสดุที่มีต้นทุนต่ำสำหรับชิ้นส่วนของเครื่อง และพิจารณาเทคโนโลยีการทำความร้อนที่ใช้พลังงานน้อยกว่าแต่ยังคงประสิทธิภาพการทำงาน นอกจากนี้ ควรวิเคราะห์ปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกเพื่อแสดงศักยภาพของเครื่องในเชิงสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมการใช้งานในชุมชนโดยเสริมสร้างความรู้เกี่ยวกับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอย่างปลอดภัย ด้านการขยายผลงานวิจัยนี้ต่อไป ควรปรับขนาดเครื่องให้เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดย่อม และศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบเครื่องต้นแบบที่สามารถผลิตและจำหน่ายในตลาดได้ อีกทั้งควรทดสอบการทำงานในสภาวะการใช้งานจริง เช่น ในครัวเรือนหรือชุมชน พร้อมทั้งติดตามและบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานและคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ทั้งนี้จะมีการส่งเสริมสร้างเครือข่ายความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น องค์กรชุมชนหรือหน่วยงานวิจัย เพื่อกระจายเทคโนโลยีนี้ไปสู่การใช้งานจริงในวงกว้างและสร้างผลกระทบเชิงบวกต่อเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่สิบสาม พ.ศ. 2566 – 2570, สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2565.

[2] โครงการ Biomass Co-firing. (10 กันยายน 2567). การไฟฟ้าฝ่ายผลิต. สืบค้นจาก https://rnmsmartcity.egat.co.th/biomass-co-firing_project/

[3] ฟางข้าว ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย. (10 กันยายน 2567). สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). จากสืบค้น https://www.arda.or.th/detail/6368

[4] Tumpa Sarker and Venkatesh Meda, "A Review of Torrefaction Technology for Upgrading Lignocellulosic Biomass to Solid Biofuels." Bio Energy Research, Vol.14, pp. 645–669, March 2021.

[5] Abhishek Kumar Pathak, Sanjay Dhakate, and Bhanu Pratap Singh, "Rice straw biomass to high energy yield bio-coal by torrefaction: Indian perspective." Current Science, Vol. 116, No. 5, pp. 831-838, March 2019.

[6] Milica Djurdjevic and Sasa Papuga, " Torrefaction Process Parameters and Reactor Design." Periodical Polytechnical Chemical Engineering, DOI:10.3311/ppch.22081, Corpus ID: 259428861, June 2023.

[7] P. C. A. Bergman, Arjen Boersma and J. H. A. Kiel, "Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass." ECN Biomass, ECN-C--05-067, January 2005.

[8] Goodman, B. A., "Utilization of waste straw and husks from rice production: A review." Journal of Bioresources and Bioproducts, Vol. 5, No. 3, pp. 143-162, 2020.

[9] Moraes, C. A., Fernandes, I. J., Calheiro, D., Kieling, A. G., Brehm, F. A., Rigon, M. R., and Osorio, E.. "Review of the rice production cycle: by-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling." Waste Management & Research, Vol. 32, No. 11, pp. 1034-1048, 2014.

[10] Alengebawy A., Ran, Y., Ghimire, N., Osman, A. I., and Ai, P., "Rice straw for energy and value-added products in China: a review." *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 21, No. 5, pp. 2729-2760, 2023.

[11] Satlewal A., Agrawal, R., Bhagia S., Das, P., and Ragauskas A. J., "Rice straw as a feedstock for biofuels: availability, recalcitrance, and chemical properties. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Vol. 12, No. 1, pp. 83-107, 2018.

[12] Rathour R., Devi M., Dahiya P., Sharma N., Kaushik N., Kumar D., Kumar P., Baadhe R., Walia A. Bhatt A. and Bhatia R. "Recent Trends, Opportunities and Challenges in Sustainable Management of Rice Straw Waste Biomass for Green Biorefinery." *Energies*, Vol. 16, No. 3, pp. 1429, 2023.

[13] Abhishek Sadananda Madival a, Raviraj Shetty a, Deepak Doreswamy b., Srinivasulu Maddasani, "Characterization and optimization of thermal properties of rice straw and Furcraea foetida fiber reinforced polymer composite for thermal insulation application." Journal of Building Engineering Volume 78, 1 November 2023.

[14] Anil Kumar Sakhiya, Abhijeet Anand, VirendraKumar Vijay, Priyanka Kaushal, "Thermal decomposition of rice straw from rice basin of India to improve energy-pollution nexus: Kinetic modeling and thermodynamic analysis." Energy Nexus, Volume 4, 30 December 2021.

[15] Anil Kumar Sakhiya; Paramjeet Baghel; Shivangi Pathak; Virendra Kumar Vijay; Priyanka Kaushal ,"Effect of Process Parameters on Slow Pyrolysis of Rice Straw: Product Yield and Energy Analysis." ICUE 2020 on Energy, Environment, and Climate Change Asian Institute of Technology, Thailand. 20 – 22 October 2020.