

บทความวิจัย (Research Article)

การผลิตถ่านชีวภาพในกระบวนการทอรรีแฟคชันจากชีวมวลไม้เพื่อทำนายค่า
ความร้อนสูงสุด

Biochar Production in Torrefaction Process from Bamboo Biomass
to Predict Highest Heating Value

นพพร รัตนช่วง^{1*}, ชัยวัฒน์ วามวรรัตน์², นิติกอร์ โรจนานาค¹

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² สาขาชีวเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Nopporn Rattanachoung^{1*}, Chaiwat Wamwarrarat², Nithikorn Rojjananak¹

¹ Division of Physics, Department of Physical and Material Sciences, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

² Division of Biochemistry, Department of Science and Bioinnovation, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

* Corresponding author

E-mail address: faasnor@ku.ac.th

Received: 13/06/2025; Revised: 13/09/2025; Accepted: 17/09/2025

คำสำคัญ

ชีวมวล
กระบวนการทอรรีแฟคชัน
ไม้ไผ่
แบบจำลองอัลกอริทึม SVM
แบบจำลองอัลกอริทึม KRR

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของกระบวนการทอรรีแฟคชันต่อค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลไม้ไผ่ โดยทำการเผาชีวมวลภายใต้อุณหภูมิ 200–400 °C ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยนำชีวมวลไม้ไผ่ทางการเกษตรผ่านการตากแห้ง (เฉลี่ย 35.27 °C) และบดผ่านตะแกรงขนาด 20, 60 และ 100 เมช ระบบทอรรีแฟคชันที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเตาเผาแบบท่อแนวนอน ชุดควบแน่นไอน้ำ และกระบอกล้างชีวมวล การจำลองและออกแบบกระบวนการใช้โปรแกรม Aspen Plus V12.1 และ Design Expert V13.0 เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงสุด (HHV) หน่วย MJ/kg ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โดยวิธีประมาณของไม้ไผ่ พบว่าค่าปริมาณสารระเหย ความชื้น คาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้าเท่ากับ 60.45, 6.73, 32.05 และ 1.84 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขทดสอบที่อุณหภูมิ 60 เมช อัตราไนโตรเจน 25 มิลลิลิตร/นาที อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส และเวลา 90 นาที ให้ค่าความร้อนสูงสุด 19.3945 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม โดยมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเมื่อเทียบกับค่าทดลองเพียง 3.143 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาจุดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรรีแฟคชันของชีวมวล พบว่าที่อุณหภูมิ

ขนาด 33.6813 เมช ไนโตรเจน 28.9080 mL/min อุณหภูมิ 339.225 °C เวลา 52.2639 นาที ให้ค่าความร้อนสูงสุด 19.4937 MJ/kg ในการทำนายค่าความร้อนสูงสุดด้วยการเรียนรู้ของเครื่องจากข้อมูล 279 ชุด พบว่า Kernel Ridge Regression (KRR) มีความแม่นยำสูงสุดที่ 87.64% ขณะเรียนรู้ และ 81.16% ในการทดสอบ เทียบกับ Support Vector Machine (SVM) ที่มีความแม่นยำ 60.60% และ 57.85% ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า KRR เหมาะสมกว่าสำหรับการพัฒนาเป็นเครื่องมือทำนายค่าความร้อนของชีวมวลไม้ไผ่

KEYWORDS

Biomass

Torrification process

Bamboo

SVM algorithm model

KRR algorithm model

ABSTRACT

This research investigates the effects of torrefaction on the higher heating value (HHV) of bamboo biomass. The process involves heating biomass at temperatures ranging from 200 to 400 °C under oxygen-limited or inert atmospheric conditions. Agricultural bamboo residues were sun-dried (average temperature 35.27 °C), ground, and sieved through mesh sizes of 20, 60, and 100. A custom-designed torrefaction system was developed, consisting of a horizontal tubular furnace, a vapor condensation unit, and a biomass feed chamber. The process was simulated and optimized using Aspen Plus V12.1 and Design Expert V13.0 to evaluate the HHV in megajoules per kilogram (MJ/kg). Proximate analysis of the bamboo biomass yielded values of 60.45% volatile matter, 6.73% moisture, 32.05% fixed carbon, and 1.84% ash. Under optimal experimental conditions—60 mesh particle size, 25 mL/min nitrogen flow rate, 340 °C temperature, and 90 minutes duration—the maximum HHV obtained was 19.3945 MJ/kg, with a mean prediction error of only 3.143%. Further optimization showed that the ideal conditions were a particle size of 33.6813 mesh, nitrogen flow rate of 28.9080 mL/min, temperature of 339.225 °C, and residence time of 52.2639 minutes, yielding an HHV of 19.4937 MJ/kg. Machine learning models were also applied to predict HHV based on 279 experimental data sets. Kernel Ridge Regression (KRR) demonstrated superior performance, achieving a prediction accuracy of 87.64% during training and 81.16% in testing, outperforming Support Vector Machine (SVM), which showed 60.60% and 57.85% accuracy, respectively. Therefore, KRR is identified as a more effective model for predicting the HHV of torrefied bamboo biomass.

1. บทนำ

ในปัจจุบันชีวมวลถือเป็นแหล่งพลังงานที่มีนัยสำคัญอย่างมาก เนื่องจากมีบทบาทเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานธรรมชาติที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตพลังงานได้โดยไม่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก เป็นสาเหตุมาจากข้อเท็จจริงที่ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้ถูกนำมาใช้เพื่อการสังเคราะห์ด้วยแสงในการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้เชื้อเพลิงชีวมวลยัง

คัมค่าเนื่องจากสามารถผลิตได้ภายในประเทศอย่างยั่งยืน จึงช่วยลดความจำเป็นในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ในท้องถิ่น รัฐบาลตระหนักถึงความสำคัญและประโยชน์ของพลังงานชีวมวลโดยตระหนักถึงข้อดีเหล่านี้ เพื่อส่งเสริมความมั่นคงด้านพลังงาน ประเทศไทยได้กำหนดนโยบายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนที่ได้จากชีวมวล ซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมฉบับที่ 13 (พ.ศ. 2566-2570) ของประเทศ (ปนัดดา และคณะ, 2562)

ถ่านไบโอชาร์เป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอนที่ผลิตจากชีวมวลหรือสารอินทรีย์จากการย่อยสลายตามธรรมชาติหรือของเสียทางการเกษตรถูกสร้างขึ้นผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบควบคุมที่ระดับออกซิเจนต่ำ กระบวนการนี้เรียกว่าไพโรไลซิสภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนหรือมีออกซิเจนจำกัด ด้วยวิธีนี้จะได้ถ่านไบโอชาร์ที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ถ่านไบโอชาร์ในอุดมคติมีค่าความร้อนสูง (HHV) แต่เนื่องจากการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลยังคงเกิดการสูญเสียความร้อน และสร้างผลผลิตได้ยังไม่มากพอ เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก เช่น อุณหภูมิทอรรีแฟกชัน เวลา อัตราส่วนแก๊ส เป็นต้น (ธนศิษฐ์, 2562) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งแก้ไขปัญหานี้โดยการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านไบโอชาร์จากไม้ไผ่ ซึ่งไม้ไผ่เป็นพืชที่ปลูกกันมากและให้ค่าความร้อนค่อนข้างสูง โดยกระบวนการทอรรีแฟกชันเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 200-400 องศาเซลเซียส (Chen et al., 2009) ช่วงแรกทำให้เอมิเซลลูโลสบางส่วนเริ่มสลายตัว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัว และสุดท้ายเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึงค่าหนึ่งลิกนินจะเกิดการสลายตัวตาม ลำดับ (Nhuchhen et al., 2014) ดังนั้นการสลายตัวของเอมิเซลลูโลสในกระบวนการทอรรีแฟกชันเป็นจุดเริ่มของการลดปริมาณสารระเหย และเพิ่มคาร์บอนคงตัว ซึ่งลดองค์ประกอบที่ให้พลังงานต่ำและเพิ่มองค์ประกอบที่ให้พลังงานสูง ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มของค่าความร้อนของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการ

การศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพในกระบวนการทอรรีแฟกชันจากชีวมวลไม้ไผ่เพื่อทำนายค่าความร้อนสูงสุดผลกระทบบของกระบวนการทอรรีแฟกชันต่อเชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวลไม้ไผ่ และระบุสภาวะที่เหมาะสมที่สุด การศึกษานี้ตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรรีแฟกชัน รวมถึงขนาดอนุภาคชีวมวล อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน อุณหภูมิ และเวลาในการทอรรีแฟกชัน ตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากชีวมวลไม้ไผ่จะถูกใช้ในการทำนายลักษณะต่าง ๆ ของถ่านไบโอชาร์ผ่านการจำลองข้อมูลโดยใช้โปรแกรม ASPEN Plus v.12.1 (Kartal and Ozveren, 2020) การศึกษานี้ใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลและเพิ่มประสิทธิภาพชีวมวล โปรแกรม ASPEN Plus v.12.1 ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองภายใต้สภาวะคงที่ที่ความดันบรรยากาศและสภาวะอุณหภูมิคงที่ โดยพิจารณาจากส่วนประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นและปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง ถูกจัดการผ่านข้อมูลซึ่งสามารถทำให้อยู่ในรูป (Katongtung et al., 2022) แสดงในสมการที่ (1)

$$x_{i,j} = \hat{x}_{i,j} - \bar{x}_j / \sigma_j \quad (1)$$

โดยที่ x คือ ข้อมูลปกติจาก $\hat{x}$

$\bar{x}_j$ คือ ค่าเฉลี่ยของแต่ละคุณลักษณะ j

σ_j คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละคุณลักษณะ j

1. เทคนิค Support Vector Machine (SVM) เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการจัดจำรูปแบบรวมถึงการแก้ปัญหาการจัดกลุ่มหนึ่ง (Classification problem) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยเทคนิคนี้ได้มีการอาศัยหลักการของการหาสมประสิทธิ์ของสมการเพื่อนำไปสร้างเส้นแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลที่ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการสอนให้ระบบเรียนรู้ (Wang and Jia, 2009) โดยมุ่งเน้นไปยังเส้นแบ่งแยกกลุ่มข้อมูลได้ดีที่สุด (Optimal separating hyperplane) เมื่อมีการพิจารณาข้อมูลที่ประกอบด้วยข้อมูลสองกลุ่มแสดงดังสมการที่ (2)

$$D = \{x_i, y_i; i = 1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

โดยที่ $x_i = (x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m}) \in R^m$

$y_i \in \{1, -1\}$ โดยที่ 1 คือข้อมูลกลุ่มหนึ่ง และ -1 คือข้อมูลกลุ่มสอง

การกำหนดกลุ่มเป้าหมายให้ซัพพอร์ทเวกเตอร์ เครื่องจักรนั้นมุ่งเน้นเพื่อหาฟังก์ชันการตัดสินใจที่สามารถแบ่งแยกค่าที่ไม่ทราบได้ดังสมการที่ (3)

$$f(x) = \text{sign} \{ \sum_{k=1}^{n_v} w_k \varphi_k(x) \varphi_k(x_k + b) \} \quad (3)$$

$$\varphi_k = [\varphi_1(x_1), \varphi_2(x_2), \dots, \varphi_n(x_n)]^T$$

โดยที่ $\varphi(x)$ คือฟังก์ชันสำหรับแปลงข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้นสามารถแบ่งแยกได้

w_k คือ ค่าน้ำหนักที่เชื่อมโยงจาก *feature space* ไปสู่ *output space*

b คือ ค่าโน้มน้าว (bias)

$\varphi(x)$ คือ ซัพพอร์ตเวกเตอร์ โดย $k = 1, 2, \dots, n$

n_v คือ จำนวนของซัพพอร์ตเวกเตอร์

2. เทคนิค Kernel ridge regression (KRR) เป็นเทคนิคที่ประยุกต์ของ kernel tricks ไปสู่ ridge regression ซึ่งเป็นสเกลาร์ที่น้อยที่สุดด้วยการทำให้เป็นมาตรฐาน สำหรับการจำลองที่ฟังก์ชันไม่เป็นเส้นตรง โดยการฝึกฝนชุดข้อมูล $D(x, y)$ โดย x คือ n , p คือ เมทริกซ์ของข้อมูลเฉพาะกลาง และ y คือ n -vector กลางของเป้าหมาย (Kartal and Ozveren, 2020) ตัวอย่างการพยากรณ์ของเป้าหมายตัวอย่าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$f(x) = x\beta \quad (4)$$

โดยที่ $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)$ คือสัมประสิทธิ์ ridge ซึ่งสามารถประเมินได้โดย $\min_{\beta} \|x\beta - y\|_2^2 + \alpha \|\beta\|_2^2$

α คือสิ่งหนึ่งของไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่สำคัญใน KRR อัลกอริทึม โดยผลเฉลยของสัมประสิทธิ์ ridge สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$\beta = (x^T x + \alpha I)^{-1} x^T y \quad (5)$$

กระบวนการเรียนรู้เครื่องจักรเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีด้านปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งเป็นรูปแบบของการวิเคราะห์ข้อมูลที่ดำเนินการอย่างอัตโนมัติด้วยแบบจำลอง โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานกับชุดข้อมูลต่าง ๆ ส่วนแบบจำลองความแม่นยำในการทำนายถูกตรวจสอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการประเมิน ค่า R^2 และค่า RMSE โดยค่า R^2 เป็นการวัดทางสถิติในแบบจำลองการถดถอย (regression model) ซึ่งประเมินความเป็นไปได้ของตัวแปรในพารามิเตอร์ขาออก โดยความเป็นไปได้นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ข้อมูลขาเข้า ส่วนค่า RMSE เป็นการวัดความผิดพลาดระหว่างค่าจริงและค่าที่ได้จากการประเมิน ทั้งนี้ค่า R^2 มีค่ามาก ส่วนค่า RMSE มีค่าน้อยจะเป็นการประเมินที่มีความเที่ยงตรง และการประเมินอัลกอริทึมว่าวิธีใดมีประสิทธิภาพมากขึ้นเพียงใดจะใช้ค่าทางสถิติ R^2 และ RMSE โดย R^2 สามารถหาได้จากสมการที่ (6)

$$R_k^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (y_{m,k} - f_{m,k}(x))^2}{\sum_1^n (y_{m,k} - \bar{y}_k)^2} \quad (6)$$

ค่า RMSE สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7)

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{m,k} - f_{m,k}(x))^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบและสร้างชุดทดลองกระบวนการเทอร์รีแฟกชันชีวมวลไม้ไผ่

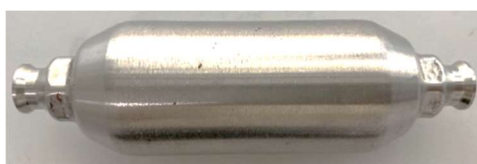
ชุดทดลองกระบวนการเทอร์รีแฟกชันชีวมวลชนิดไม้ไผ่ ประกอบด้วยส่วนที่ 1 การสร้างเตาเผาแบบท่อแนวนอนพร้อมระบบควบคุมการทำงาน ขนาดเตาเผาภายนอกกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 600 มิลลิเมตร และสูง 300 มิลลิเมตร ท่อ Quartz tube ขนาดกว้าง 55 มิลลิเมตร และยาว 1,200 มิลลิเมตร ระบบไฟฟ้าที่ใช้กับเตาเผาชีวมวล 220 โวลต์ 1 เฟส 50 เฮิร์ตซ์ ระบบการให้ความร้อนโดยขดลวดความร้อนแบบสปริงขนาด 2,600 วัตต์ ความต้านทาน 15 โอห์ม ฝังในร่องและติดตั้งในห้องเผา ส่วนฉนวนความร้อนเป็นไฟเบอร์บอร์ดเป็นแผ่นวัสดุที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติ มาผสมกับสารยึดเกาะแล้วอัดขึ้นรูปภายใต้ความร้อนและแรงดันสูง เพื่อให้ได้แผ่นวัสดุที่แข็งแรงและสามารถนำไปใช้งานต่อได้ ส่วนที่วัดอุณหภูมิใช้การทำงานด้วยเทอร์โมคัปเปิลแบบชนิด K ซึ่งมีคุณสมบัติใน

เครื่องของช่วงอุณหภูมิ ความทนทาน และราคาไม่สูง เป็นโลหะผสมของนิกเกิล 95 เปอร์เซ็นต์ อะลูมิเนียม แมงกานีส และซิลิกอน เตาเผาแบบท่อแนวนอนให้ความร้อนสูงสุด 1,100 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 1



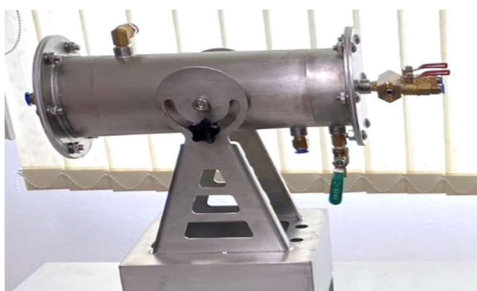
ภาพที่ 1 เตาเผาที่ใช้สำหรับงานวิจัย

ส่วนที่ 2 ชุดอุปกรณ์ใส่วัสดุชีวมวลไม้ไผ่ทำด้วยสแตนเลส มีความยาวกระบอก 80 มิลลิเมตร มีช่องด้านหัวและท้ายสำหรับใส่ชีวมวล ชนิดไม้ไผ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20.5 มิลลิเมตร แสดงในภาพที่ 2



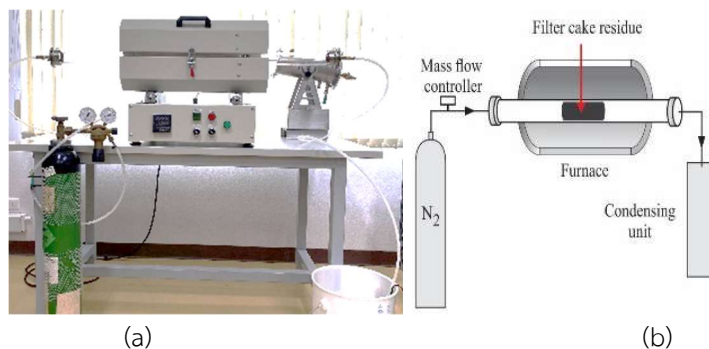
ภาพที่ 2 ชุดสำหรับใส่ชีวมวลไม้ไผ่ ที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัย

ส่วนที่ 3 เครื่องควบแน่นมีความยาว 800 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร เปลือกของท่อมีความยาว 850 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร และเข้าของเปลือกท่อมีความหนา 0.5 นิ้ว และมีความยาว 150 มิลลิเมตร แสดงดัง ภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงชุดระบบ Condensing สำหรับงานวิจัย

ส่วนกระบวนการทอรรีแฟกซ์ ดังภาพที่ 4 แสดงแผนผังของการทดลองกระบวนการทอรรีแฟกซ์ชีวมวลไม้ไผ่ ประกอบด้วยเครื่องเตาเผาแบบท่อแนวนอน อุปกรณ์สำหรับใส่วัสดุชีวมวลไม้ไผ่ ทำจากสแตนเลสทรงกระบอกที่มีความยาว 80 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20.5 มิลลิเมตร วางในเตาเผาท่อแนวนอนยาวรวม 300 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 58 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 55 มิลลิเมตร อุณหภูมิถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิของเตาเผา



ภาพที่ 4 การแสดง: (a) ภาพถ่าย และ (b) แผนผังของการตั้งค่าการทดลองของกระบวนการทอรรีแฟกซ์

ตัวอย่างชีวมวลไม้ไผ่ประมาณ 20 กรัม มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในกระบอกที่ใส่ตัวอย่างชีวมวล และนำกระบอกใส่ในท่อ Quartz tube ขนาดกว้าง 55 มิลลิเมตร ยาว 1,200 มิลลิเมตร ในโซนตรงกลางที่ให้ความร้อนสม่ำเสมอของเตาเผาแบบท่อแนวนอนและปิดฝา Seal ล็อกปลายท่อทั้งสองข้าง แก๊สไนโตรเจนถูกปล่อยเข้าไปภายในเตาเผาซึ่งควบคุมโดยตัวควบคุมการไหลของมวล อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนถูกคงไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่อากาศออกจากห้องเตาเผา เพื่อให้แน่ใจว่ามีสถานะเฉื่อย ตัวอย่างชีวมวลไม้ไผ่ได้รับความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิที่ต้องการด้วยอัตราการป้อนไนโตรเจน 10 มิลลิลิตรต่อวินาที¹ ภายใต้บรรยากาศ แก๊สที่ออกจากเตาเผาผ่านกระบวนการเทอร์รีแฟกชันถูกทำให้เย็นลงโดยหน่วยควบแน่น โดยใช้เครื่องควบแน่นวัตถุชีวมวลมีสายยางสองทางต่อเข้ากับในอ่างน้ำเพื่อใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน ผลการเปรียบเทียบ HHV ที่ได้รับจากแบบจำลองการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 2 กับที่ได้จากกระบวนการเทอร์รีแฟกชันจากการทดลอง โดยทำการทดลองรวม 29 เงื่อนไข แต่นำมาแสดงผลการทดสอบที่ 4 เงื่อนไขพบว่าหมายเลข 14 (HHV สูงสุดที่ 19.3945 MJ/kg.) หมายเลข 12 (HHV ต่ำสุดที่ 15.4272 MJ/kg.) ส่วนหมายเลขที่ 6 และ 15 ให้ค่า HHV เท่ากับ 19.1345 MJ/kg. และ 15.6371 MJ/kg. ตามลำดับ

2.2 การเตรียมวัสดุ

วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการวิจัยนี้คือชีวมวลไม้ไผ่ที่ได้จากการเกษตร ภาพที่ 5 (a) แสดงวัตถุดิบของไม้ไผ่ที่ใช้ในการวิจัย วัสดุถูกทำให้แห้งภายใต้แสงแดดเป็นเวลา 2 วัน วัดอุณหภูมิเฉลี่ย 35.27 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Weatherstation (Phywe) ดังแสดงในรูปที่ 6 (b) บดเป็นอนุภาคละเอียดและกรองผ่าน 3 ขนาด คือ (a) 20 (b) 60 และ (c) 100 mesh ดังแสดงในภาพที่ 5 ผงทั้งสามขนาดถูกใส่ลงในกล่องแก้วใสเพื่อการวิเคราะห์เพิ่มเติมภายใต้กระบวนการเทอร์รีแฟกชัน อย่างไรก็ตาม มีการกำหนดองค์ประกอบใกล้เคียงของตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ สารระเหย ความชื้น คาร์บอนคงตัว และเถ้า ตัวอย่างที่ใช้ชีวมวลไม้ไผ่ก่อนและหลังจากกระบวนการเทอร์รีแฟกชัน



(a)

(b)

ภาพที่ 5 ชีวมวลไม้ไผ่ (a) วัตถุดิบ และ (b) หลังผ่านการร่อนจากตะแกรงและนำไปตากจนแห้ง



(a)

(b)

(c)

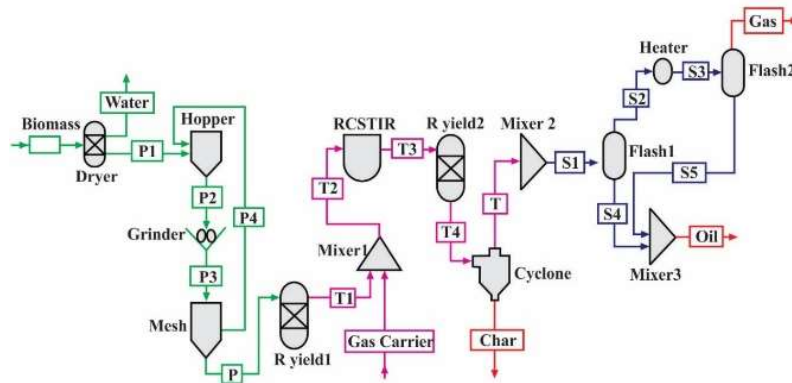
ภาพที่ 6 ขนาดของชีวมวลชนิดไม้ไผ่ที่ผ่านการร่อนจากตะแกรงขนาดต่าง ๆ (a) 20 mesh (b) 60 mesh (c) 100 mesh

2.3 การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Design Expert v13.0

ในกระบวนการเทอร์รีแฟกชัน ตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองประกอบด้วยขนาดอนุภาคชีวมวล (ตาข่าย) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มล./นาที) อุณหภูมิ (°C) และเวลา (นาที) ตัวแปรตามคือค่าความร้อนที่สูงสุด (HHV) ของชีวมวลในหน่วย MJ/kg. ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการออกแบบด้วยวิธี Box-Behnken (BBD) โดยใช้โปรแกรม Design Expert v13.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์เชิงสถิติ

และสามารถทำนายผลการทดลองได้ โดยปัจจัยทั้งหมดที่นำมาทำการศึกษาทั้งหมด 4 ปัจจัย ของตัวแปร 4 ตัว (X_1, X_2, X_3, X_4) และมีผลลัพธ์ตอบสนองคือ ค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลได้ในหน่วย (MJ/kg) โดยออกแบบให้ศึกษามุ่งเน้นในอิทธิพล 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 และภายใต้เงื่อนไขการทดลองของกระบวนการทอริแฟกชันชีวมวลได้ที่ระบุในตารางที่ 2

ศึกษาแบบจำลองกระบวนการทอริแฟกชันชีวมวลชนิดไม้ไผ่ โดยใช้โปรแกรม ASPEN Plus v.12.1 ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แบบจำลองกระบวนการทอริแฟกชัน

จากแบบจำลองในภาพที่ 7 ประกอบด้วย 7 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) เครื่องบด 2) เครื่องแยกขนาด 3) การสลายตัวของชีวมวล (Ryield) 4) เครื่องปฏิกรณ์ (RCSTIR) 5) ผลิตภัณฑ์หลักของแข็ง (CHAR) 6) น้ำมันชีวภาพ และ 7) ก๊าซ พารามิเตอร์ที่จะศึกษามีดังนี้ ขนาดของชีวมวล อัตราการไหลของ N_2 อุณหภูมิและเวลา แบบจำลองการออกแบบได้รับการประเมินโดยการคำนวณค่าความร้อนสูงสุด (HHV) (Loha et al., 2011) ในทุกสภาวะของกระบวนการทอริแฟกชัน (Zaman and Ghosh, 2021) (ดังแสดงในตารางที่ 2) และผลลัพธ์จะแสดงในคอลัมน์สุดท้ายของตารางที่ 3 จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่า HHV สูงสุดที่ 19.3945 MJ/kg. ได้มาจากการทดสอบหมายเลข 14 โดยที่ขนาดอนุภาค, อัตราการไหลของ N_2 , อุณหภูมิและเวลา คือ 60 เมช, 25 มล./นาที, 340 °C และ 90 นาที ตามลำดับ จากนั้นจึงเปรียบเทียบ HHV ที่ได้รับจากแบบจำลองการออกแบบกับกระบวนการทดลองการทอริแฟกชันตามข้ออธิบายไว้ในส่วนถัดไป

2.4 การวัดค่าความร้อนสูงสุด (HHV)

ค่าความร้อนระบุปริมาณพลังงานที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ชีวมวล) ต่อหน่วยน้ำหนักในรูปของความร้อน ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละประเภทจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะและส่วนประกอบของชีวมวล ในกรณีที่มีค่าความร้อนสูงสุด (HHV) หมายถึงพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยสมบูรณ์ (ค่าความร้อนรวม) ซึ่งรวมถึงความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ โดยทั่วไปค่าความร้อนที่สูงขึ้นจากชีวมวลจะถูกวิเคราะห์โดยใช้ Bomb calorimeter ซึ่งวัดพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ตัวอย่างในแคลอริมิเตอร์ ทำงานบนหลักการที่ว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในพันธะเคมีของสารจะถูกปล่อยออกมาเมื่อสารถูกเผาไหม้หรือที่เรียกว่าความร้อนจากการเผาไหม้ใน Bomb calorimeter การเผาไหม้ของชีวมวลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จากนั้นค่าความร้อนที่สูงขึ้นจะถูกกำหนดเป็นความร้อนที่ปล่อยออกมาระหว่างการเผาไหม้ ตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นถึงอุณหภูมิสุดท้ายตามที่อธิบายไว้ในสมการ

$$HHV = \frac{W\Delta T}{m} \quad (8)$$

โดยที่ ΔT คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C), W คือพลังงานเทียบเท่า (EE) ของเครื่องวัดความร้อนของระบบ (cal/°C) และ m คือมวลของตัวอย่าง (g) งานวิจัยนี้ Bomb calorimeter Calorimeter C1 (IKA) ถูกนำมาใช้ในการวัดค่าความร้อนสูงของการเผาไหม้ของชีวมวลชนิดไม้ไผ่

ตาราง 1 การออกแบบการทดลองโดยวิธี BBD

Parameter	Symbol	Unit	Min.	Mean	Max.
Particle size	X ₁	mesh	20	60	100
N ₂ flow rate	X ₂	ml/min	20	25	30
Temperature	X ₃	°C	220	280	340
Time	X ₄	min	30	60	90

ตาราง 2 เงื่อนไขของกระบวนการทอรรีแฟกซ์ชันชีวมวลชนิดไม้ไผ่

Run No.	Particle size (mesh)	Flow N ₂ (ml/min)	Temperature (°C)	Time (min)	HHV (MJ/kg)
1	60	20	340	60	18.3721
2	60	20	280	30	16.2315
3	20	25	280	30	16.6232
4	60	20	280	90	17.1936
5	100	25	280	90	16.0123
6	60	30	340	60	19.1345
7	100	25	280	30	16.7124
8	20	25	220	60	16.6232
9	60	30	280	90	17.1936
10	100	25	220	60	16.0123
11	100	25	340	60	18.7315
12	60	25	220	30	15.4272
13	20	30	280	60	18.1238
14	60	25	340	90	19.3945
15	60	25	220	90	15.6371
16	60	25	280	60	17.7234
17	60	25	280	60	16.8214
18	60	30	280	30	17.1936
19	100	30	280	60	17.3455
20	100	20	280	60	17.8725
21	20	25	280	90	18.2134
22	60	25	280	60	16.8747
23	60	25	280	60	16.2315
24	60	25	280	60	16.4312
25	60	20	220	60	16.3456
26	20	20	280	60	16.8321
27	20	25	340	60	18.9315
28	60	30	220	60	16.9213
29	60	25	340	30	18.8837

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

แสดงผลการวิเคราะห์โดยวิธีประมาณ การทดลองกระบวนการทอรรีแฟคชัน การหาจุดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรรีแฟคชันของชีวมวลชนิดไม้ไผ่ ผลการทดสอบค่าความร้อนสูงสุด และผลการทดสอบประสิทธิภาพระหว่างค่าทำนาย และค่าจริง ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

ตาราง 3 การวิเคราะห์โดยวิธีประมาณ (wt %, d.b.)

Proximate composition	Before torrefaction (%)	After torrefaction (%)
Volatile matter	77.31	60.45
Moisture	8.43	6.73
Fixed carbon	12.05	32.05
Ash	2.21	1.84

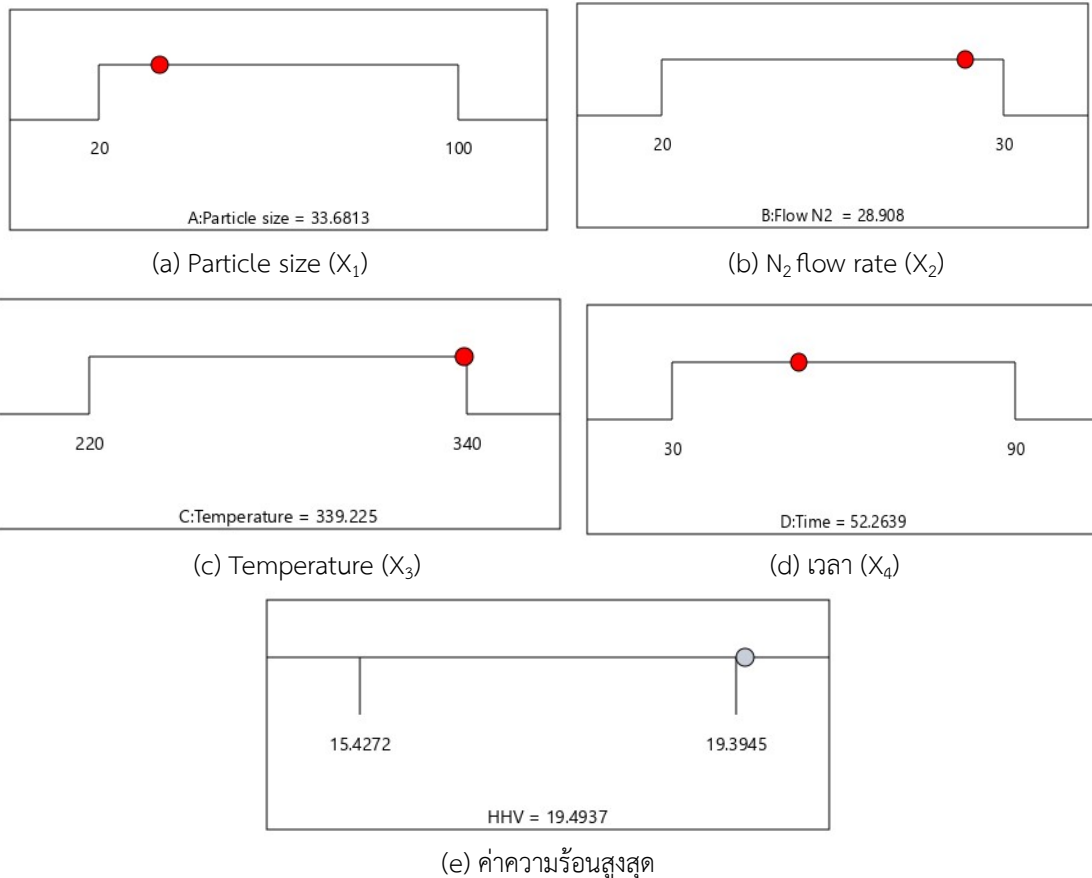
ตารางที่ 3 แสดงการวิเคราะห์โดยวิธีแบบประมาณของชีวมวลไม้ไผ่ก่อนและหลังกระบวนการทอรรีแฟคชัน (ตามมาตรฐาน ASTM D3173) (Zaman and Ghosh, 2021) พบว่าการทำงานหมายเลข 14 (ขนาดอนุภาค, อัตราการไหลของ N_2 , อุณหภูมิและเวลา คือ 60 เมช, 25 มิลลิลิตร/นาที่, $340^\circ C$ และ 90 นาที ตามลำดับ) จะเห็นได้ว่าไม้ไผ่ มีปริมาณสารระเหยสูงมาก มีความชื้นสูงและปริมาณเถ้าสูง ส่งผลให้ค่าความร้อนต่ำ นอกจากนี้ ชีวมวลไม้ไผ่ยังมีคาร์บอนต่ำ ซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนต่ำด้วย สำหรับชีวมวลไม้ไผ่ที่ถูกทอรรีแฟคชันทำให้สารระเหยลดลงจาก 77.31 เปอร์เซ็นต์ เป็น 60.45 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าลดลงจาก 2.21 เปอร์เซ็นต์ เป็น 1.84 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจาก 12.05 เปอร์เซ็นต์ เป็น 32.05 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในกระบวนการทอรรีแฟคชันเป็นจุดเริ่มของการลดปริมาณสารระเหย และเพิ่มคาร์บอนคงตัว ซึ่งลดองค์ประกอบที่ให้พลังงานต่ำและเพิ่มองค์ประกอบที่ให้พลังงานสูง ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มของค่าความร้อนของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการ

ตาราง 4 การทดลองกระบวนการทอรรีแฟคชันที่ 4 เจื่อนไซ

Run No.	Particle size (mesh)	N_2 flow rate (ml/min)	Temperature ($^\circ C$)	Time (min)	HHV (MJ/kg) Simulation	HHV (MJ/kg) Experiment	Error (%)
14	60	25	340	90	19.3945	20.1924	3.951
6	60	30	340	60	19.1345	19.4375	1.558
15	60	25	220	90	15.6371	16.2268	3.634
12	60	25	220	30	15.4272	15.9754	3.431

ทดลองกระบวนการทอรรีแฟคชันกับตัวอย่างชีวมวลจำนวน 4 ตัวอย่าง เฉพาะค่าสูงสุด 2 ลำดับแรก คือหมายเลขรัน 14 และ 6 และค่าต่ำสุด 2 ลำดับสุดท้าย คือหมายเลข 15 และ 12 ตามที่อธิบายไว้ในส่วนที่ 4 ผลลัพธ์ของค่าความจุความร้อนของกลุ่มตัวอย่างเหล่านั้นแสดงไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจากการทดสอบการจำลองกระบวนการทอรรีแฟคชันและผลลัพธ์จากการทดลองด้วยเครื่อง Bomb calorimeter Calorimeter C1 (IKA) ค่าความร้อนสูงขึ้นหลังการทอรรีแฟคชัน เพราะปริมาณสารระเหยลดลง ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ความชื้นลดลงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ทำให้ค่าความร้อนที่สูงขึ้นและประสิทธิภาพเชื้อเพลิงดีขึ้น พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.143 เปอร์เซ็นต์

การหาจุดที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้สำหรับกระบวนการทอรรีแฟคชันของชีวมวลชนิดไม้ไผ่ โดยใช้โปรแกรม Design Expert v13.0 สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 8 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทอรรีแฟคชันของชีวมวลไม้ไผ่ (a) Particle size (X_1) เท่ากับ 33.6813 เมช, (b) N_2 flow rate (X_2) เท่ากับ 28.9080 มิลลิตอร์ต่อนาที, (c) Temperature (X_3) เท่ากับ $339.225^\circ C$ และ (d) เวลา (X_4) เท่ากับ 52.2639 นาที และทำให้ได้ค่าความร้อนสูงสุดคือ 19.4937 MJ/kg



Desirability = 1.000

Solution 1 out of 100

ภาพที่ 8 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการทอดรีแฟคชันของชีวมวลไม้

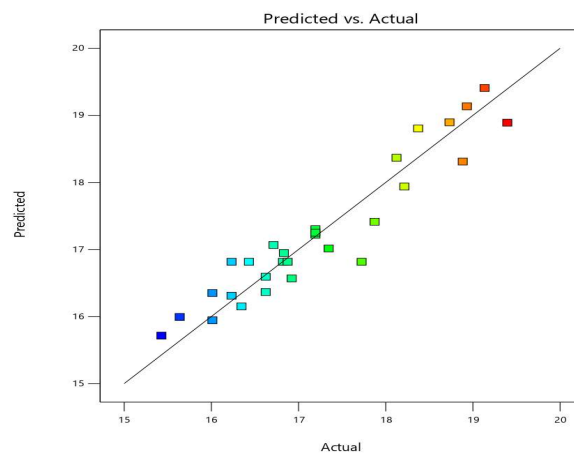
ผลการทดสอบค่าความร้อนสูงสุดโดยการพล็อตค่าที่คาดการณ์เทียบกับค่าจริง สำหรับกระบวนการทอดรีแฟคชันของชีวมวลไม้ ไม้ ไม้ ดังแสดงในภาพที่ 9

HHV

Color points by value of

HHV:

15.4272 19.3945



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่คาดการณ์เทียบกับค่าจริงของค่าความร้อนสูงสุดสำหรับชีวมวลไม้

จากภาพที่ 9 เพื่อแสดงความแม่นยำของแบบจำลองการคาดการณ์ค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลไม้ไผ่ โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริง แกน X ค่าความร้อนสูงสุดที่วัดได้จริง (Actual HHV) หน่วย: MJ/kg แกน Y ค่าความร้อนสูงสุดที่คาดการณ์ได้จากโมเดล (Predicted HHV), หน่วย: MJ/kg

ผลการทดสอบค่าความร้อนสูงสุดของตัวแปรของชีวมวลไม้ไผ่

ผลการทดสอบค่าความร้อนสูงสุด ทั้งนี้พบว่าค่าความร้อนสูงสุด (HHV) ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส เวลาในการทอรีรีแฟกซ์ 90 นาที อัตราการไหลของไนโตรเจน 25 มิลลิลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาค 60 เมช ให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 19.3945 เมกะจูลต่อกิโลกรัม โดยการแสดงกราฟฟิกของผลกระทบร่วมของสภาวะกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ เป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และเวลา (นาที) ต่อค่าความร้อนสูงสุดของไม้ไผ่ ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์แบบ 3 มิติ แกน X อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) แกน Y เวลา (นาที) และแกน Z (ค่าที่แสดงด้วยสีหรือความสูง) ค่าความร้อนสูงสุด (MJ/kg) ดังแสดงในภาพที่ 10

Factor Coding: Actual

3D Surface

HHV (MJ/kg)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

15.4272 19.3945

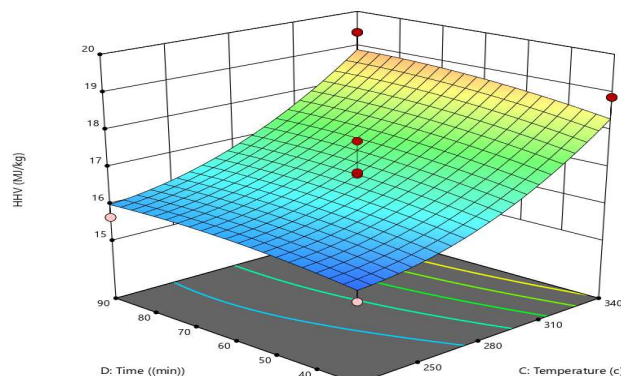
X1 = C

X2 = D

Actual Factors

A = 60

B = 25



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และเวลา (นาที) กับค่าความร้อนสูงสุดของไม้ไผ่

ผลการทดสอบค่าความร้อนสูงสุด โดยการแสดงกราฟฟิกของผลกระทบร่วมของสภาวะกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตร/นาที) ของไม้ไผ่ ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์แบบ 3 มิติ แกน X อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) แกน Y อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตร/นาที) และแกน Z (ค่าที่แสดงด้วยสีหรือความสูง) ค่าความร้อนสูงสุด (MJ/kg) ดังแสดงในภาพที่ 11

Factor Coding: Actual

3D Surface

HHV (MJ/kg)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

15.4272 19.3945

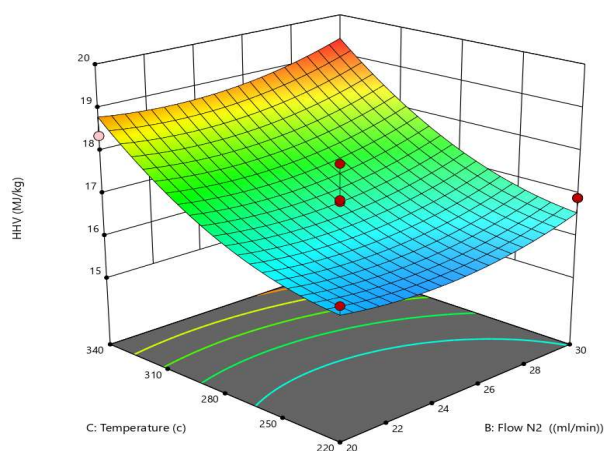
X1 = B

X2 = C

Actual Factors

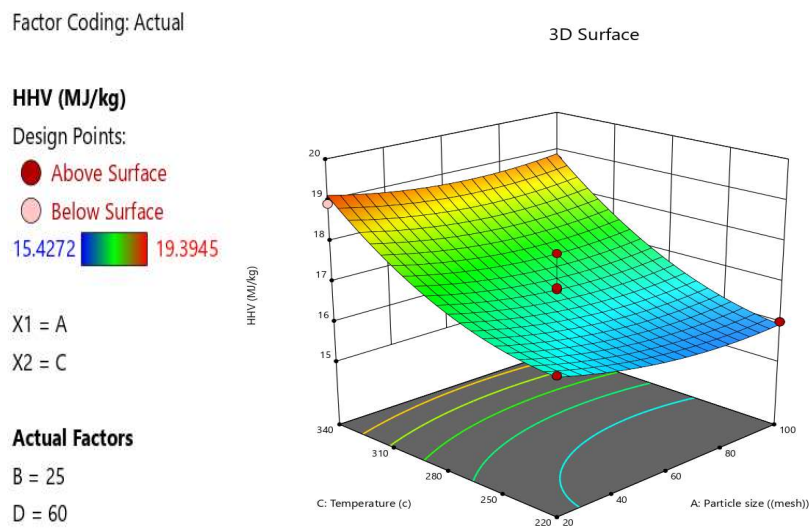
A = 60

D = 60



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตร/นาที) กับค่าความร้อนสูงสุดของไม้ไผ่

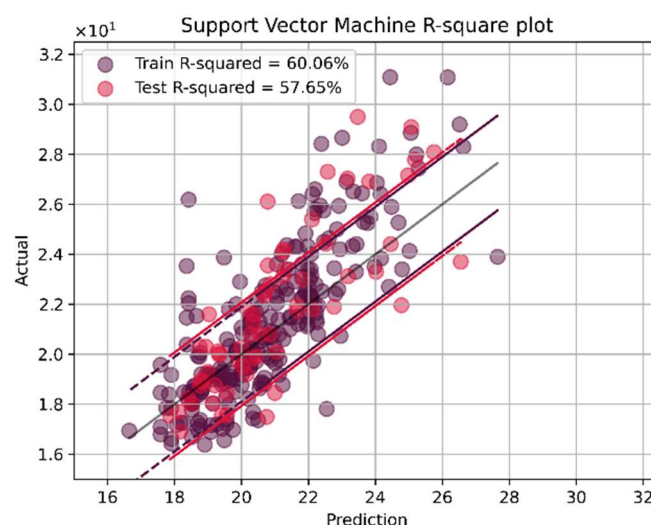
ผลการทดสอบค่าความร้อนสูงสุด โดยการแสดงกราฟิกของผลกระทบของสภาวะกระบวนการทอรีแฟคชันความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และขนาดของชีวมวล (เมช) ของไม้ไผ่ ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์แบบ 3 มิติ แกน X อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) แกน Y ขนาดของชีวมวล (เมช) และแกน Z (ค่าที่แสดงด้วยสีหรือความสูง) ค่าความร้อนสูงสุด (MJ/kg) ดังแสดงในภาพที่ 12



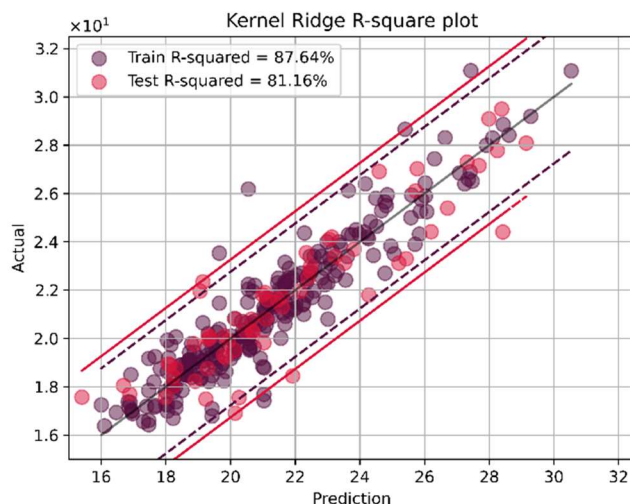
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และ ขนาดของชีวมวล (เมช) กับค่าความร้อนสูงสุดของไม้ไผ่

การเรียนรู้เครื่องจักรของกระบวนการทอรีแฟคชัน โดยการสร้างชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้จำนวน 279 ชุดข้อมูล ประกอบด้วยข้อมูลขาเข้า และข้อมูลขาออก เพื่อนำไปทำนายคุณสมบัติต่าง ๆ และผลิตโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก ได้รับการพัฒนาผ่านภาษาไพทอน โดยใช้ไลบรารี Scikit-learn (Pedregosa et al., 2011) ทั้งนี้สามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือข้อมูลที่นำไปเรียนรู้ (Train) และข้อมูลที่นำไปทดสอบ (Test) สำหรับข้อมูลที่นำไปเรียนรู้ทั้งนี้การทดสอบประสิทธิภาพในการทำนายพิจารณาจากค่า R^2 โดยอัลกอริทึมที่นำมาเรียนรู้ประกอบด้วย 2 เทคนิค คือวิธี Support Vector Machine (SVM) และวิธี Kernel ridge regression (KRR) ตามลำดับ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพระหว่างค่าทำนายและค่าจริงของทั้ง 2 วิธี คือวิธี Support Vector Machine (SVM) (Chen et al., 2009) พบว่าค่า R^2 สำหรับข้อมูลที่นำไปเรียนรู้ (Train) เท่ากับ 60.06 เปอร์เซ็นต์ และข้อมูลที่นำไปทดสอบ (Test) เท่ากับ 57.65 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 13 และวิธี Kernel ridge regression (KRR) พบว่าค่า R^2 สำหรับข้อมูลที่นำไปเรียนรู้ (Train) เท่ากับ 87.64 เปอร์เซ็นต์ และข้อมูลที่นำไปทดสอบ (Test) เท่ากับ 81.16 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 14 ตามลำดับ



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทำนายและค่าจริงของวิธี SVM



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทำนายและค่าจริงของวิธี KRR

แนวโน้มจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทำนาย (Prediction) ซึ่งอยู่บนแกน x และค่าจริง (Actual) ซึ่งอยู่บนแกน y ของวิธี SVM และ KRR แสดงดังภาพที่ 13 และ 14 ตามลำดับ พบว่าในการเรียนรู้ของชุดข้อมูลทั้งหมด วิธี KRR มีประสิทธิภาพในการเรียนรู้และมีความแม่นยำในการทำนายค่าความร้อนสูงสุดได้ดีที่สุด 87.64 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าวิธี SVM ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60.06 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำไปทดสอบความฉลาดในการทำนายของวิธี KRR คือ 84.16 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวิธี SVM เท่ากับ 57.65 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีการที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือในการทำนายค่าความร้อนสูงสุดคือ KRR

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของกระบวนการเทอร์รีแฟคชันต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากชีวมวลไม้ไผ่ โดยใช้ไม้ไผ่ที่บดละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 20, 60 และ 100 เมช นำมาจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรม Aspen Plus V.12 และออกแบบการทดลองด้วย Design Expert v13.0 โดยมีตัวแปรต้น 4 ตัว ประกอบด้วย X_1 : ขนาดของชีวมวล (เมช), X_2 : อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตร/นาที่), X_3 : อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และ X_4 : เวลา (นาที่) ส่วนตัวแปรตามของการทดลอง คือ Y_1 : ค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลในหน่วย (เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อผ่านกระบวนการเทอร์รีแฟคชัน ปริมาณสารระเหย ความชื้น และเถ้าลดลง ขณะที่คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มค่าความร้อนของชีวมวล โดยค่าความร้อนสูงสุดที่ได้จากการจำลองคือ 19.3945 MJ/kg ภายใต้เงื่อนไข ขนาดชีวมวล 60 เมช อัตราไนโตรเจน 25 มล./นาที่ อุณหภูมิ 340°C และเวลา 90 นาที ค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงที่วัดได้ 20.1924 MJ/kg โดยมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 3.143% และจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการคือ อุณหภูมิ 339.225°C เวลา 52.2639 นาที อัตราไนโตรเจน 28.9080 มล./นาที่ ขนาดชีวมวล 33.6813 เมช ซึ่งให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 19.4937 MJ/kg

ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มุ่งเน้นวิเคราะห์ผลของกระบวนการเทอร์รีแฟคชันต่อเชื้อเพลิงที่ผลิตจากชีวมวลไม้ไผ่ โดยเน้นการทำนายค่าความร้อนที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว ทั้งนี้การทำนายผลค่าความร้อนในกระบวนการเทอร์รีแฟคชันยังขึ้นอยู่กับ การเก็บข้อมูลปริมาณอื่น ๆ เช่น ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์ คลอรีน และออกซิเจน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงธาตุ นอกจากนี้ยังมีการนำเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) มาช่วยทำนายค่าความร้อนสูงสุด โดยใช้การหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Correlation Matrix) และประยุกต์ใช้โมเดล Random Forest (RF) และ Extreme Gradient Boosting (XGB) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายค่าความร้อนสูงสุดจากข้อมูลที่ได้จากกระบวนการเทอร์รีแฟคชันของไม้ไผ่ นอกจากนี้ยังสามารถเลือกใช้ชีวมวล เช่น ไม้ยูคาลิปตัส เศษไม้จากการแปรรูป หรือเปลือกไม้ ซึ่งล้วนเป็นวัสดุที่มีลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน และมีศักยภาพในการเปลี่ยนเป็นพลังงานหรือวัสดุที่มีมูลค่าเพิ่ม ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลเสนอเปรียบเทียบและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนาจ. (2564). *การผลิตถ่านชีวภาพและแนวทางการใช้ประโยชน์*.
<https://erp.mju.ac.th/articleDetail.aspx?qid=1072>
- ปนัดดา อินทร์ดำ, โชคชัย เหมือนมาศ, และสุกฤษฎิรา รัตนวิไล. (2562). การคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรีรีแฟคชันของ ทะลายปาล์มโดยใช้การออกแบบการทดลองด้วย. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 19(4), 86–99.
- Chen, Z., Pears, N., Freeman, M., & Austin, J. (2009). Road vehicle classification using support vector machines. *IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, 4, 214–218.
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5357707
- Kartal, F., & Ozveren, U. (2020). A deep learning approach for prediction of syngas lower heating value from CFB gasifier in Aspen Plus. *Energy*, 209, 118457.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544220315656?utm_source=chatgpt.com
- Katongtung, T., Onsree, T., & Tippayawong, N. (2022). Machine learning prediction of biocrude yields and higher heating values from hydrothermal liquefaction of wet biomass and wastes. *Bioresource Technology*, 344, 126278.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421016205?utm_source=chatgpt.com
- Loha, C., Chatterjee, P. K., & Chattopadhyay, H. (2011). Performance of fluidized bed steam gasification of biomass – Modeling and experiment. *Energy Conversion and Management*, 52(3), 1583–1588.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890410004978?utm_source=chatgpt.com
- Nhuchhen, D. R., Basu, P., & Acharya, B. (2014). A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014(2014), 1–56.
https://pdfs.semanticscholar.org/ab71/ac1c2c7fe154b3135369265e0efd8e638b8d.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
https://jmlr.org/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf?utm_source=chatgpt.co
- Wang, L., & Jia, X. (2009). Integration of soft and hard classifications using extended support vector machines. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(3), 543–547.
https://www.researchgate.net/publication/224466676_Integration_of_Soft_and_Hard_Classifications_Using_Extended_Support_Vector_Machines
- Zaman, S. A., & Ghosh, S. (2021). A generic input-output approach in developing and optimizing an Aspen Plus steam-gasification model for biomass. *Bioresource Technology*, 125412.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421016205?utm_source=chatgpt.com