

ผลกระทบของเถ้าจากการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงกาบมะพร้าว โดยการชะล้างด้วยน้ำ

ธเนศ อุ่นชัยศรี^{1*}, ปวีณ ชัยวัฒน์เสฏฐ์¹, วราภรณ์ เมธาวิริยะศิลป์¹, และ จารุวรรณ ภูศรี²

¹ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการเผาไหม้ สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วิทยาเขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10150 ประเทศไทย

²หน่วยวิศวกรรมและระบบ สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วิทยาเขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10150 ประเทศไทย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล: thanet.unc@mail.kmutt.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2026.02.004

รับเมื่อ 12 มกราคม 2569 แก้ไขเมื่อ 22 สิงหาคม 2569 ตอบรับเมื่อ 25 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวโดยการชะล้างด้วยน้ำและผลกระทบของเถ้าที่มีผลต่อการเกาะตัวกันของอนุภาคเบตในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด องค์ประกอบของเถ้าเชื้อเพลิงถูกวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray Fluorescence, XRF เพื่อนำมาประเมินความรุนแรงของปัญหา Fouling และ Agglomeration โดยใช้ดัชนีสองแบบ คือ Base to Acid Ratio (Rb/a) และ Bed Agglomeration Index (BAI) ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำที่อัตราการไหล 197 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้เวลา 25 นาที สามารถลดปริมาณ K₂O, Na₂O และ Cl ได้ถึงร้อยละ 40.4, 50.4 และ 82.0 และเมื่อนำตัวอย่างเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวก่อนผ่านการปรับปรุงคุณภาพและผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการชะล้างด้วยน้ำมาเผาไหม้เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 800 °C พบว่าเวลาที่เชื้อเพลิงไหม้จนอนุภาคเบตเกิดการสูญเสียสภาพการไหลอยู่ที่ 32 นาที และ 78 นาที สำหรับตัวอย่างเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวก่อนผ่านการปรับปรุงคุณภาพและผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการชะล้างด้วยน้ำ ตามลำดับ

คำสำคัญ: กาบมะพร้าว, การเกาะตัวของอนุภาคเบต, ชะล้าง, เถ้า, เผาไหม้

Effects of Ash Derived from Quality Improvement of Coconut Husk by Leaching with Water

Thanet Unchaisri^{1*}, Pawin Chaivatamaset¹, Waraporn Methawiriyasilp¹, and Jaruwan Poosri²

¹Combustion Technology Research Laboratory, Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10150 Thailand.

²Technical and Engineering System, Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10150 Thailand.

* Corresponding Author, E-mail: thanet.unc@mail.kmutt.ac.th DOI: 10.14416/JASET.KMUTNB.2026.02.004

Received 12 January 2026; **Revised** 22 August 2026; **Accepted** 25 August 2026

ABSTRACT

This study investigates the method of water washing coconut husk fuel to increase its quality. X-ray fluorescence (XRF) was used to study the fuel ash's composition and determine the degree of fouling and agglomeration issues using two parameters: the Bed Agglomeration Index (BAI) and the Base to Acid Ratio ($R_{b/a}$). The study revealed that the quantities of K_2O , Na_2O , and Cl were decreased by 40.4%, 50.4%, and 82.0%, respectively, after washing the coconut husk fuel with water at a flow rate of 197 milliliters per minute for 25 minutes. The time needed for bed particle defluidization was 32 minutes for the untreated sample and 78 minutes for the water-washed sample when untreated and water-washed coconut husk fuel were burned at 800 °C in a fluidized bed reactor.

KEYWORDS: Coconut husk, Bed agglomeration, Leaching, Ash, Combustion

1. บทนำ

พลังงานเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม การใช้หรือการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลมากเกินไปนอกจากจะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและยั่งยืนทางด้านพลังงาน (Energy security and sustainability) การใช้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนนอกจากจะช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ยังเป็นการเพิ่มความมั่นคงทางพลังงาน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ชีวมวลที่ได้จากมะพร้าวในประเทศไทยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ กะลา, เปลือกและกาบ, ก้านใบและทะลาย ในส่วนของเปลือกและกาบมีปริมาณ 147.9 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยพบว่าส่วนใหญ่อยู่ในภาคกลาง (85.1 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ) (DEDE, 2023) ดังนั้นจากศักยภาพดังกล่าวนี้ทำให้เห็นได้ว่าชีวมวลที่ได้จากมะพร้าวมีศักยภาพสำหรับการใช้ชีวมวลเป็นพลังงานทดแทน

ถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะชีวมวล ประกอบด้วยโลหะและอโลหะ ซึ่งเกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการเผาไหม้ คือการเกิดความสกปรกของผิว (Fouling) ที่บริเวณส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อไอน้ำ ปัญหานี้ก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนลดลง และก่อให้เกิดการสึกกร่อน การกัดกร่อนในอุปกรณ์ นอกจากนี้ในระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไชน์เบดซึ่งมีทราย (SiO_2) เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน ยังเกิดปัญหาการเกาะตัวของอนุภาคเบด (Bed agglomeration)

Fouling เป็นตะกรันที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวถ่ายโอนความร้อนแบบการพา เช่น บริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อโลหะอัลคาไลน์ได้รับความร้อนจะระเหยเป็นไอ และกลั่นตัวบนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำปฏิกิริยากับซิลิเพอร์ไดออกไซด์ในไอสี เกิดเป็นสารประกอบซิลิเพต หลอมตัวเป็นคราบเหนียวคอยจับขี้เถ้าที่ลอยมาสัมผัส

Bed agglomeration เป็นการเกาะตัวของอนุภาคเบดในการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาแบบฟลูอิดไชน์เบด เนื่องจากเถ้าของชีวมวลประกอบด้วยโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียมหรือ โพแทสเซียม สารประกอบออกไซด์ของธาตุเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ในทราย เช่น เกิดเป็นสารประกอบในรูปของโพแทสเซียมซิลิเกต ($\text{K}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2$) ที่จุดยูเทคติก ซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 750°C (Basu, 2006) เมื่อเกิดการเกาะติดกันของอนุภาคเบดจะทำให้ระบบสูญเสียสภาพการไหล (Defluidization) ส่งผลให้ระบบการ

เผาไหม้ต้องหยุดการทำงาน ทำการเปลี่ยนอนุภาคเบตและเริ่มเดินระบบใหม่

เนื่องจากชีวมวล เช่น ทะลายปาล์ม ฟางข้าว กากยมะพร้าว มีองค์ประกอบหลักในเถ้า คือ โพแทสเซียม และเมื่อนำมาเผาไหม้ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการศึกษาวิจัยการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลให้มีปริมาณโพแทสเซียมลดลงโดยใช้น้ำเป็นตัวชะล้าง (Deng et al., 2018; Ma et al., 2017; Mu et al., 2021; Singhal, Goossens, et al., 2021; Singhal, Konttinen, et al., 2021) โดยที่การใช้น้ำเป็นตัวชะล้างมีข้อดี คือ ประหยัดต้นทุน ไม่มีสารตกค้างหลังจากการชะล้าง และปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน จากงานวิจัยดังกล่าวสามารถลดโพแทสเซียมในชีวมวลได้ถึงร้อยละ 24 - ร้อยละ 87 นอกจากนั้นยังสามารถลดปริมาณเถ้าลงได้ถึงร้อยละ 15 - ร้อยละ 56 อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ได้มีการศึกษาผลกระทบของเถ้าจากการเผาไหม้ และศึกษาการชะล้างโพแทสเซียม คลอไรด์ และปริมาณเถ้าในกาบมะพร้าว ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีศักยภาพเป็นแหล่งพลังงานในประเทศไทย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิง เช่น กาบมะพร้าว โดยการชะล้างด้วยน้ำ เพื่อลดความเข้มข้นของธาตุโพแทสเซียมและคลอไรด์อันเป็นสาเหตุของการกัดกร่อน ลดการถ่ายโอนความร้อนในอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อน และเกิดการสูญเสียสภาพการไหลเมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบเตาเผาแบบฟลูอิดไชน์เบด

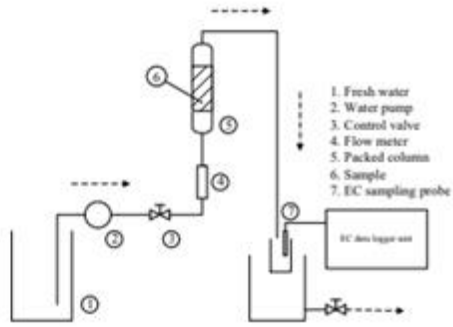
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การทดลองการชะล้างด้วยน้ำ

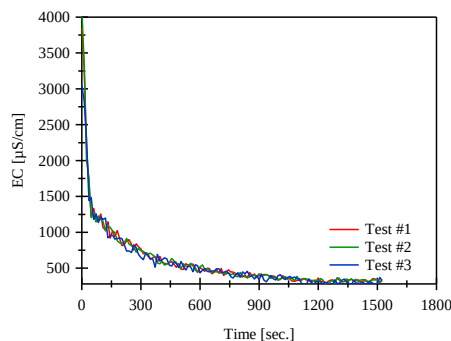
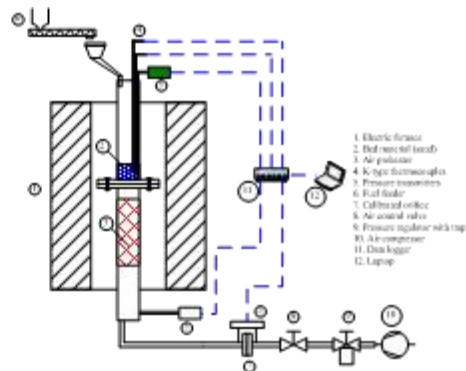
ระบบการชะล้างชีวมวลด้วยน้ำในระดับห้องปฏิบัติการ (ดังแสดงในรูปที่ 1) ถูกนำมาใช้ในการทดลองกับเชื้อเพลิง กาบมะพร้าวที่ถูกสับย่อยเป็นเส้นใยแล้ว ระบบจะประกอบไปด้วยท่อปฏิกรณ์ที่ทำจาก PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 52 มิลลิเมตร สูง 1.2 เมตร สามารถบรรจุตัวอย่าง กาบมะพร้าวได้ 100 กรัม ในแต่ละครั้งของการทดลอง น้ำถูกปั๊มเข้าทางด้านล่างของท่อปฏิกรณ์ ด้วยปั๊ม น้ำ (Peristaltic pump) ด้วยอัตราการไหล 197 มิลลิลิตรต่อ นาที น้ำที่ผ่านการชะล้างเชื้อเพลิงแล้วจะไหลออกทางด้านบนของท่อปฏิกรณ์ และวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, EC) ด้วยเซ็นเซอร์ และบันทึกค่าแบบออนไลน์ (Unchaisri & Oechaiyaphum, 2024) ซึ่ง



รูปที่ 1 ระบบการล้างชีวมวลด้วยน้ำ



รูปที่ 2 ตัวเตาปฏิกรณ์เผาไหม้แบบฟลูอิดไคเซเบด



รูปที่ 3 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ผ่านการชะล้างกามะพร้าว

เซ็นเซอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 1.42 เมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐานที่ $1,413 \mu\text{S/cm}$ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ออกจากกระบบชะล้างถูกบันทึกค่าทุก ๆ 12 วินาที จนกระทั่งค่าการนำไฟฟ้าของน้ำขาออกกระบบอยู่ที่ $300 - 310 \mu\text{S/cm}$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำประปาทั่วไปและนำเข้าระบบโดยอยู่ในช่วง $300 - 350 \mu\text{S/cm}$ กระบวนการชะล้างจึงหยุดและนำตัวอย่างออกจากท่อปฏิกรณ์ เพื่อนำไปตากให้แห้งและเตรียมการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุในถัดต่อไป

2.2 การเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไคเซเบด

ปริมาณการเติมของทรายอยู่ที่อัตราส่วนความสูงของอนุภาคเบตต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 0.5

ตัวอย่างของกามะพร้าวที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วมาเผาไหม้ในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไคเซเบดที่ระดับห้องปฏิบัติการ (ดังแสดงในรูปที่ 2) ตัวเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไคเซเบดทำจากสแตน-เลส (316) ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9 เซนติเมตร และสูง 1.8 เมตร ด้านล่างของตัวเตาปฏิกรณ์มีแผ่นกระจายอากาศเจาะรู 0.6 มิลลิเมตร จำนวน 85 รู สำหรับอนุภาคเบตที่ใช้ คือ ทรายขนาด 250 ไมโครเมตร

(Hb/Db) กล่าวคือ ความสูงของอนุภาคเบต 4.5 เซนติเมตร น้ำหนักอนุภาคเบตอยู่ที่ 287.5 กรัม

ในการทดสอบจะกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิง, อัตราอากาศส่วนเกิน (Excess air) ที่ร้อยละ 50 และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ (ควบคุมโดยฮีตเตอร์) ที่ 800 °C ให้เท่ากันทุกการทดลอง ในการทดสอบจะทำการบันทึกเวลาเมื่อเริ่มต้นป้อนเชื้อเพลิงและการทดสอบจะสิ้นสุดเมื่อระบบสูญเสียสภาพการไหลโดยสมบูรณ์ (Defluidization) ผลการศึกษาจะแสดงพฤติกรรมเบตเมื่อเกิดการเกาะตัวของอนุภาคเบตในระหว่างการเผาไหม้และแนวโน้มการสูญเสียสภาพการไหลของเชื้อเพลิงที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว

2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าและการใช้ดัชนีบ่งชี้ปัญหาเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้

การศึกษาองค์ประกอบเถ้าจากการเผาไหม้หรือการวิเคราะห์ทางเคมี เพื่อหาส่วนประกอบต่างๆ ของเถ้าในรูปออกไซด์โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปประเมินผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้ หรืออุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อน คือ การเกิดปัญหา Fouling และการเกาะตัวของอนุภาค (Agglomeration) โดยปัญหาดังกล่าวสามารถประเมินได้โดยใช้ดัชนีบ่งชี้ Base to Acid Ratio ($R_{b/a}$) และ Bed Agglomeration Index (BAI) ตามลำดับ

นอกจากนั้น อนุภาคเบตที่สูญเสียสภาพการไหล (Defluidization) ที่มีลักษณะการจับตัวกันของอนุภาคเบตถูกนำมาวิเคราะห์ทางสัณฐานและทางเคมีโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน/วิเคราะห์ธาตุแบบจุด (Scanning electron microscope and energy dispersive x-ray spectrometer, SEM-EDS) เพื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการเกาะตัว องค์ประกอบของสารสำคัญ

2.3.1 ดัชนี Base to Acid Ratio ($R_{b/a}$)

แนวโน้มการเกิด Fouling สามารถทำนายได้จากอัตราส่วนของกลุ่มเบสิกออกไซด์และอะซิติกออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ (2.1) (Ma et al., 2017; Singhal, Konttinen, et al., 2021)

$$R_{b/a} = \frac{(Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O)}{(SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3)} \quad (2.1)$$

เมื่อ $R_{b/a} < 0.5$ คือ แนวโน้มการเกิด Fouling ต่ำ

$R_{b/a} 0.5 - 1$ คือ แนวโน้มการเกิด Fouling ปานกลาง

$R_{b/a} > 1$ คือ แนวโน้มการเกิด Fouling สูง

$R_{b/a}$ เป็นค่าของสัดส่วนของออกไซด์โลหะที่เป็นเบสต่อออกไซด์ของโลหะที่เป็นกรด โดยออกไซด์ของโลหะที่เป็นเบสจะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ และออกไซด์ของโลหะ/โลหะที่เป็นกรดจะหลอมตัวที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเถ้าที่มีส่วนประกอบของเบสิกออกไซด์

($Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O$) สูงส่งผลให้โอกาสในการเกิด Fouling มากขึ้น ในกรณีที่เชื้อเพลิงมีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสมาก ออกไซด์ของฟอสฟอรัส (P_2O_5) จะถูกรวมอยู่ในกลุ่มของเบสิกออกไซด์ด้วย เนื่องจากมีผลทำให้เกิดจุดหลอมเหลวต่ำในเถ้าลอย (Wang et al., 2012)

2.3.2 ดัชนี Bed Agglomeration (BAI)

การเผาไหม้แบบฟลูอิดไเบตโดยส่วนใหญ่ใช้ทราย (SiO_2) เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของอัลคาไลน์ในเถ้า เช่น K_2O และ Na_2O เกิดเป็นสารประกอบ โซเดียมซิลิเกต ($Na_2O \cdot 2SiO_2$) และ โพแทสเซียมซิลิเกต ($K_2O \cdot 4SiO_2$) ซึ่งเกิดที่จุดยูเทคติกคือ อุณหภูมิ 874 °C และ 754 °C ตามลำดับ (Basu, 2006) เพราะฉะนั้นออกไซด์ของโลหะจึงถูกนำมาทำนายการเกิดการรวมตัวของเถ้าและอนุภาคเบต Bed agglomeration ดังแสดงในสมการที่ (2.2) (Vamvuka & Zografos, 2004)

$$BAI = \frac{Fe_2O_3}{(K_2O + Na_2O)} \quad (2.2)$$

เมื่อ $BAI < 0.5$ คือ แนวโน้มการเกิดการเกาะตัวของอนุภาคเบตสูง

3. ผลลัพธ์และการอภิปรายผลการวิจัย

3.1 ผลกระทบของการชะล้างด้วยน้ำในชีวมวลที่มีต่อองค์ประกอบของเถ้า

กาบมะพร้าวปริมาณ 100 กรัม ที่ถูกบรรจุในคอลัมน์ (ดังแสดงในรูปที่ 1) ถูกการชะล้างโดยน้ำที่ป้อนเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 197 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำที่ผ่านการชะล้างกาบมะพร้าวถูกวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC) อย่างต่อเนื่องทุกๆ 12 วินาที จนกระทั่งมีค่าการนำไฟฟ้าของกระบอบอยู่ที่ 300 – 310 $\mu S/cm$ จึงหยุดการทดลอง จากผลการทดลองชะล้างพบว่าใช้เวลา 25 นาที ค่าการนำไฟฟ้าของกระบอบอยู่ในช่วงดังกล่าว ในการทดลองการชะล้างมีการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง (Test 1 – Test

3) โดยผลการชะล้างดังแสดงในรูปที่ 3 ค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้นของกาบมะพร้าวทั้ง 3 ซ้ำของการทดลองอยู่ในช่วง 3,054 – 4,106 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และค่าความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลของทั้ง 3 ซ้ำของการทดลองอยู่ในช่วงร้อยละ -17.9 ถึงร้อยละ 15.5 เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ย

ตัวอย่างกาบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการชะล้างและหลังผ่านการทดลองการชะล้างถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเพื่อหาส่วนประกอบต่างๆ ของธาตุในรูปออกไซด์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ X-ray Fluorescence, XRF ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปประเมินผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้หรืออุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อน ได้แก่ การเกิดปัญหา Fouling และ Agglomeration เป็นต้น

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงและธาตุในตารางที่ 1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวผ่านการชะล้างด้วยน้ำ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ลดลงอย่างมากจาก 34.2% ในตัวอย่างที่ไม่ได้ชะล้างเหลือ 20.4% ในตัวอย่างที่ชะล้างแล้ว โดยเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพของการชะล้างอยู่ที่ร้อยละ 40.4 ที่อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำที่ใช้ในเวลา 25 นาที คือ 1 กรัม/49.3 มิลลิลิตร (อัตราการไหลของน้ำ 197 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวอย่าง 100 กรัม) ทั้งนี้ยังมียานวิจัยที่ใช้วิธีการชะล้างชีวมวลด้วยน้ำโดยวิธีการแช่น้ำโดยการศึกษาของ Ma et al. (2017) และ Singhal, Goossens, et al. (2021) ได้ทำการทดลองชะล้างฟางข้าวสาลีด้วยน้ำโดยใช้อัตราส่วน 1 กรัม/50 มิลลิลิตร ใช้เวลา 3 ชั่วโมง และ ที่อัตราส่วน 1 กรัม/15 มิลลิลิตร ใช้เวลา 10 นาที ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าสามารถลดปริมาณ K_2O ได้ร้อยละ 87.4 และ 22.2 ตามลำดับ อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Ma et al. (2017) แต่พบว่าประสิทธิภาพการลด K_2O ต่ำกว่างานวิจัยดังกล่าว ซึ่งเวลาที่ใช้ในการชะล้างถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่แปรผันตามประสิทธิภาพการลดลงของ K_2O (Singhal, Goossens, et al., 2021) โดยในงานวิจัยนี้ใช้เวลาเพียง 25 นาที ดังนั้นการเลือกวิธีการชะล้าง อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำ และเวลาที่ใช้ เป็นข้อควรพิจารณาในการใช้ปรับปรุงสมบัติของชีวมวล

ในขณะที่ SiO_2 , Al_2O_3 และ MgO ในธาตุของเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้างแล้วมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า และเพิ่มขึ้นถึง 3 โดยประมาณใน CaO ซึ่ง

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับการชะล้างชีวมวลฟางข้าวสาลี (Wheat straw) และใยทะเลลายปาล์ม (Empty fruit bunches) ด้วยน้ำตามการศึกษาของ Singhal, Goossens, et al. (2021) การเพิ่มขึ้นของออกไซด์เหล่านี้เนื่องจาก ซิลิคอน (Si), อะลูมิเนียม (Al), แมกนีเซียม (Mg) และแคลเซียม (Ca) มีข้อจำกัดความสามารถในด้านการละลายในน้ำ (Werkelin et al., 2010) เช่น ซิลิคอนพบส่วนใหญ่ในรูปออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) ซึ่งมีพันธะที่แข็งแรงระหว่างซิลิคอนและออกซิเจน ส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำมาก อย่างไรก็ตามทั้ง MgO และ CaO ในธาตุของชีวมวลสามารถลดลงได้โดยใช้กรดเป็นตัวชะล้าง ดังการศึกษาของ Mu et al. (2021) ที่ศึกษาการชะล้างชีวมวลสาหร่าย (Ulva lactuca) ในอัตราส่วน 1 กรัมต่อสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ความเข้มข้น 5% ปริมาณ 30 มิลลิลิตร แช่และปั่น 1 ชั่วโมง ผลการศึกษพบว่าธาตุของชีวมวลที่ผ่านการชะล้างมีปริมาณ MgO และ CaO ลดลงถึง 2 เท่า โดยประมาณ

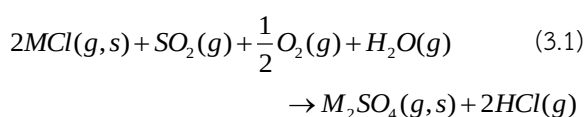
สำหรับคลอรีน (Cl) ในองค์ประกอบธาตุที่ผ่านการชะล้างแล้วสามารถลดลงจากก่อนชะล้างได้ถึงร้อยละ 82 ผลการศึกษาลดลงกับงานวิจัยของ Singhal, Goossens, et al. (2021) ได้ทำการทดลองชีวมวลที่มีองค์ประกอบของคลอรีนค่อนข้างสูง เช่น ใยทะเลลายปาล์ม ที่อัตราส่วน 1 กรัม/15 มิลลิลิตร ใช้เวลา 10 นาที ส่งผลให้คลอรีนลดลงได้ถึงร้อยละ 90 ประสิทธิภาพที่สูงของการชะล้างคลอรีนมาจากสมบัติการละลายน้ำได้ดีของคลอรีนในน้ำ เนื่องจากสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำในชีวมวล เช่น KCl และ NaCl เป็นต้น ทำให้เกิดการสลายพันธะและเปลี่ยนสถานะได้ง่าย (Werkelin et al., 2010)

ผลกระทบของการชะล้างส่งผลให้ปริมาณ volatile matters เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 7 เนื่องจากโลหะอัลคาไลน์ เช่น K และ Na ในรูปของสารประกอบ K_2O และ Na_2O ซึ่งมีสัดส่วนสูงและสามารถละลายน้ำได้ รวมถึง Cl ที่มีอยู่ในกากกาบมะพร้าวก่อนการชะล้างถึงร้อยละ 24.5 เมื่อนำกาบมะพร้าวผ่านกระบวนการชะล้าง พบว่าองค์ประกอบ K_2O , Na_2O และ Cl สามารถลดลงได้ถึงร้อยละ 50.4, 40.4 และ 82 ตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาณธาตุลดลงร้อยละ 51.5 ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของ volatile matters เกิดจากการลดลงของปริมาณธาตุซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญ K_2O , Na_2O และ Cl ลดลงค่อนข้างสูงหลังจากกระบวนการชะล้าง โดยผลการ

ทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Guo et al. (2020) ที่ศึกษาการชะล้างลำต้นข้าวโพดที่เหลือทิ้งหลังเก็บเกี่ยว โดยนำตัวอย่างไปแช่น้ำในอัตราส่วน 1 กรัมต่อน้ำ 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าปริมาณ volatile matters เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.6

3.2 การทำนายแนวโน้มการเกิดปัญหาของเถ้าจากการเผาไหม้

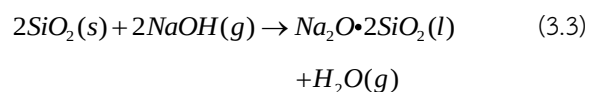
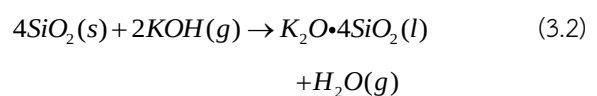
ดัชนี Base to Acid Ratio ($R_{b/a}$) และ Bed Agglomeration Index (BAI) ถูกใช้ในการทำนายปัญหาการ Fouling และ Agglomeration ตามลำดับ ดังแสดงผลการทำนายปัญหาดังกล่าวในตารางที่ 1 โดยเปรียบเทียบเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติโดยการชะล้างด้วยน้ำ จากผลการทำนายในตารางที่ 1 เชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการชะล้างมีค่าพารามิเตอร์ $R_{b/a}$ มากกว่าเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้าง เนื่องมาจากเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการชะล้างมีองค์ประกอบของเบสิกออกไซด์ คือ K_2O ค่อนข้างสูง ในขณะที่เดียวกันอะซิดิกออกไซด์ คือ SiO_2 ต่ำกว่าเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้าง จากการที่ออกไซด์ของโลหะที่เป็นเบสจะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ และออกไซด์ของโลหะ/อโลหะ ที่เป็นกรดจะหลอมตัวที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเถ้าที่มีส่วนประกอบของเบสิกออกไซด์มากยิ่งมีโอกาสในการเกิด Fouling มากขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลดัชนี $R_{b/a}$ เชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการชะล้างและผ่านการชะล้างด้วยน้ำยังอยู่ในเกณฑ์โอกาสการเกิดปัญหา Fouling ค่อนข้างสูง เนื่องจากยังมี K_2O และ Na_2O คงเหลือในเถ้าของเชื้อเพลิงที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำถึงร้อยละ 20.4 และ 8.78 ตามลำดับ เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ออกไซด์ของโพแทสเซียมและโซเดียมจะเกิดการสลายตัว องค์ประกอบเหล่านี้ โดยเฉพาะ K_2O จะเริ่มหลอมละลายที่อุณหภูมิ 600 °C โดยประมาณ (Unchaisri & Fukuda, 2022) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อโพแทสเซียมรวมตัวกับคลอรีน (Cl) หรือซัลเฟอร์ (S) จะเกิดสารประกอบ KCl, K_2SO_4 ดังแสดงในสมการที่ (3.1) (Silvennoinen & Hedman, 2013) ซึ่งมีจุดเดือดที่ต่ำ ส่งผลให้เกิดปัญหา Fouling ได้

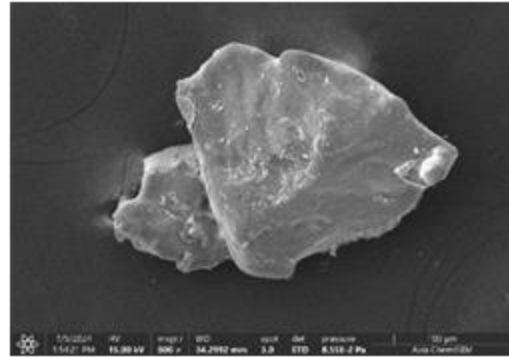
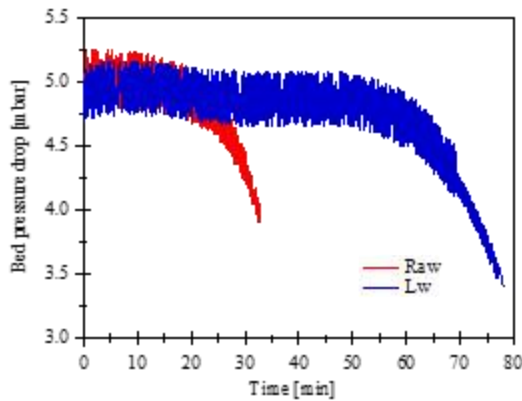


เมื่อ M คือ โลหะอัลคาไลน์ เช่น Na หรือ K

ธาตุ Cl ที่มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 24.5 ในเถ้าของตัวอย่างก่อนการชะล้าง ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอัลคาไลน์เกิดเป็นสารประกอบ เช่น KCl (จุดหลอมเหลว 770 °C), NaCl (จุดหลอมเหลว 801 °C) และ Na_2SO_4 -NaCl (จุดหลอมเหลว 625 °C) (Guo et al., 2020) สารประกอบเหล่านี้ล้วนมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ เพิ่มโอกาสในการเกิด fouling ดังแสดงในสมการที่ (3.1) ดังนั้นองค์ประกอบ K_2O , Na_2O และ Cl ที่สามารถลดลงได้ถึงร้อยละ 50.4, 40.4 และ 82 ตามลำดับ หลังผ่านกระบวนการชะล้าง จึงสามารถลดสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและลดปัญหาการเกิด Fouling

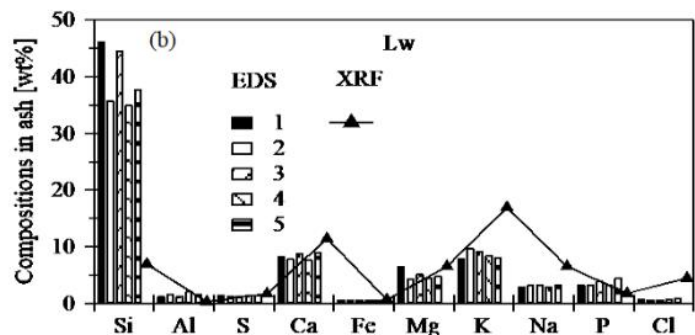
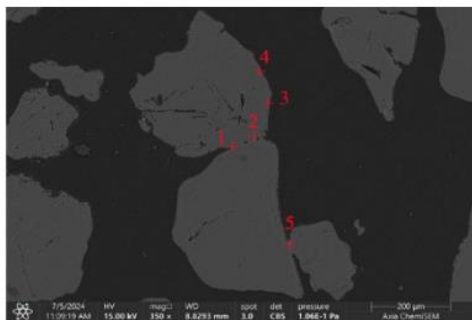
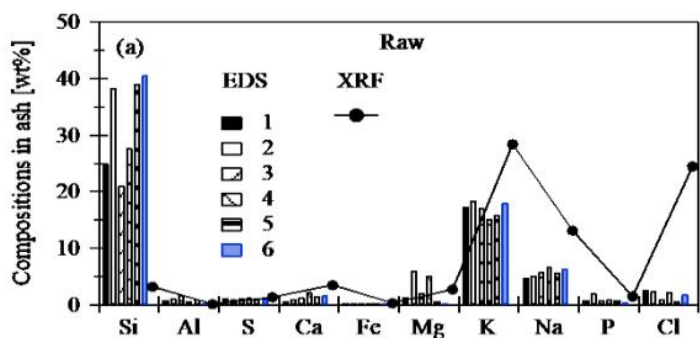
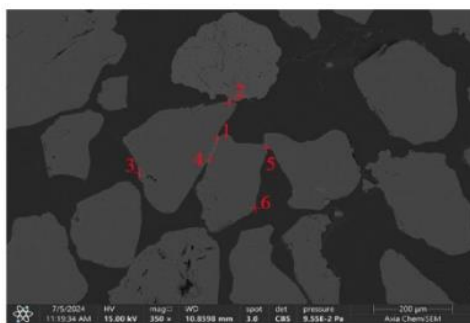
แนวโน้มการเกิดการเกาะตัวของอนุภาคเบต BAI ดังแสดงในตารางที่ 1 ของทั้งเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการชะล้างและผ่านการชะล้างแล้วยังคงรุนแรง สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาการเกาะตัวของอนุภาคเบต เนื่องมาจากเถ้าของเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของออกไซด์ของโลหะอัลคาไลน์ K_2O และ Na_2O ในปริมาณที่สูง ออกไซด์ดังกล่าวเกิดการสลายตัวขณะเผาไหม้จากนั้นธาตุโพแทสเซียมและโซเดียมเกิดเป็นสารประกอบใหม่ในรูปไฮดรอกไซด์ (MOHs) โดยเฉพาะในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบดที่ใช้ทรายซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ SiO_2 ส่งผลให้สารประกอบไฮดรอกไซด์เหล่านี้ทำปฏิกิริยากับอนุภาคเบต (ดังแสดงในสมการที่ 3.2 -3.3) (Elled et al., 2013) เกิดเป็นสารประกอบโลหะอัลคาไลน์ในรูปซิลิเกต เช่น โพแทสเซียมซิลิเกต ($K_2O \cdot 4SiO_2$) และโซเดียมซิลิเกต ($Na_2O \cdot 2SiO_2$) เกิดที่จุดยูเทคติกและมีอุณหภูมิการหลอมละลายที่ต่ำคือ อุณหภูมิ 754 °C และ 874 °C ตามลำดับ (Basu, 2006) ดังนั้นเมื่อปริมาณ K_2O และ Na_2O ในเถ้าลดลงร้อยละ 50.4 และ 40.4 ตามลำดับ หลังผ่านกระบวนการชะล้าง ส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมละลายของเถ้าโดยรวมสูงขึ้นตามไปด้วย และลดปัญหาการเกิด Agglomeration





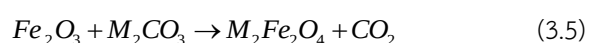
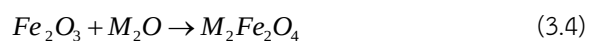
(a) ความดันตกคร่อมของอนุภาคเบด (b) การเกาะตัวของอนุภาคเบด

รูปที่ 4 (a) ความดันตกคร่อมของอนุภาคเบดในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบด และ (b) ลักษณะการเกาะตัวของอนุภาคเบด



รูปที่ 5 องค์ประกอบของธาตุที่อยู่รอบอนุภาคเบดหลังการเผาไหม้ของ (a) กาบมะพร้าวที่ยังไม่ชะล้างน้ำ และ (b) กาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้างน้ำในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบด

การเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่าในสารประกอบ Fe_2O_3 ของเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้างแล้ว สามารถยับยั้งการเกิดการเกาะตัวของอนุภาคเบด (Agglomeration) ได้ เนื่องจาก Fe_2O_3 สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอัลคาไลน์ (K, Na) ในรูปออกไซด์และคาร์บอเนต ขณะเผาไหม้ดังแสดงในสมการที่ (3.4) – (3.5) เกิดเป็นสารประกอบที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงประมาณ $1,135^\circ C$ (Elled et al., 2013)

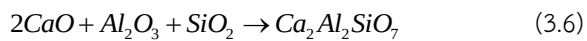


เมื่อ M คือ โลหะอัลคาไลน์ เช่น Na หรือ K

นอกจากสารประกอบ Fe_2O_3 ที่สูงขึ้นในเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้างแล้ว ยังพบว่าสารประกอบ SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO ยังเพิ่มขึ้น ในช่วง 2 – 3 เท่า เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่ยังไม่ผ่านการชะล้าง ความเข้มข้นของสารประกอบเหล่านี้ส่งผลให้เมื่อเกิดการเผาไหม้สามารถเกิดเป็นสารประกอบใหม่ในรูปแคลเซียมอลูมิเนียมซิลิเกต ดังแสดงในสมการที่ (3.6) – (3.7) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ $1,593^\circ C$ และ $1,550^\circ C$ ตามลำดับ (Mu et al., 2021) ซึ่งลดปัญหาการหลอมตัวของเถ้าและปัญหาการเกิด Agglomeration ได้

ถึงแม้สารประกอบ Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO ที่เพิ่มขึ้นในเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้างแล้วส่งผล

ให้แนวโน้มอุณหภูมิการหลอมตัวของเถ้าสูงขึ้น แต่ความเข้มข้นของ K_2O และ Na_2O คงเหลือในเถ้าของเชื้อเพลิงที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำถึงร้อยละ 20.4 และ 8.78 ตามลำดับ ยังคงเป็นปริมาณที่สูงและออกไซด์ของโลหะทั้งสองนี้มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ ดังนั้นแนวโน้มการเกิดการเกาะตัวของอนุภาคเบต (BAI) ยังมีโอกาสที่สูง



3.3 การเผาไหม้เชื้อเพลิงกาบมะพร้าวในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบด

ตัวอย่างเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการชะล้างและผ่านการชะล้างด้วยน้ำที่ผ่านการตากแห้งแล้วถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้ในเตาไหม้แบบฟลูอิดซ์เบด ระหว่างการทดลองอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ 0.65 กรัม/นาทิจ และเมื่อความดันตกคร่อมเบต (Bed pressure drop) เริ่มลดลงอย่างรวดเร็วแสดงถึงการสูญเสียสภาพการไหลของอนุภาคเบต (Defluidization) (ดังแสดงในรูปที่ 4 (a)) เนื่องจากเกิดการเกาะตัวของอนุภาคเบต (ดังแสดงในรูปที่ 4 (b)) ส่งผลให้อนุภาคเบตมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดช่องว่าง (Voidage) ระหว่างอนุภาคเบตมากขึ้น และความดันตกคร่อมลดลง การทดลองการเผาไหม้จะสิ้นสุดเมื่อเกิดการสูญเสียสภาพการไหล เมื่อเตาปฏิกรณ์อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง อนุภาคเบตจะถูกนำออกมาจากเตาปฏิกรณ์และนำตัวอย่างอนุภาคเบตทำการหล่อเรซินและใช้ใบตัดเพชรเพื่อตัดภาคตัดขวางของตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ทางสัณฐานและทางเคมีโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน/วิเคราะห์ธาตุแบบจุด (Scanning electron microscope and energy dispersive x-ray spectrometer, SEM-EDS) ดังแสดงในรูปที่ 5 จากผลการทดลองเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการชะล้างสามารถเผาไหม้ได้ 32 นาที อนุภาคเบตจะเกิดการสูญเสียสภาพการไหล และเมื่อใช้เชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำที่อัตราการไหล 197 มิลลิลิตร/นาทิจ เป็นเวลา 25 นาทีแล้วสามารถยืดเวลาการสูญเสียสภาพการไหลได้มากขึ้น คือ เกิดที่ 78 นาที จากผลการศึกษาของ Chaivatamaset et al. (2019) ได้ทำการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ยังไม่ผ่าน

การชะล้างในเตาเผาไหม้ฟลูอิดซ์เบตที่อุณหภูมิ 900 °C ผลการศึกษาพบว่าใช้เวลา 15 นาทีโดยประมาณ อนุภาคเบตจะเกิดการสูญเสียสภาพการไหล ซึ่งต่างจากงานวิจัยนี้ (ใช้เวลา 32 นาที) สาเหตุเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต่ำกว่า คือ 800 °C ซึ่งการเกิดสูญเสียสภาพการไหลแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้

การวิเคราะห์ธาตุแบบจุดของอนุภาคเบตที่ได้จากตัวอย่างหลังการทดสอบเผาไหม้และจากการวิเคราะห์ XRF ดังแสดงในรูปที่ 5 (a) ของเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการชะล้าง และรูปที่ 5 (b) ของเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้าง พบว่าปริมาณธาตุโพแทสเซียม (K) และ โซเดียม (Na) ที่บริเวณอนุภาคเบตของกรณีเชื้อเพลิงที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งธาตุทั้งสองดังกล่าวเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้จุดหลอมเหลวของเถ้าต่ำ อีกทั้งตัวเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวเองมีองค์ประกอบของซิลิกา (Si) และ อนุภาคเบตซึ่งใช้ทรายและมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกา (Si) เมื่อเผาไหม้จะทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมและโซเดียมที่มีอยู่ปริมาณมากในเชื้อเพลิงที่ไม่ผ่านการชะล้าง จึงมีโอกาสที่เกิดสารประกอบโพแทสเซียมซิลิเกต ($K_2O \cdot 4SiO_2$) และ โซเดียมซิลิเกต ($Na_2O \cdot 2SiO_2$) (ดังได้แสดงในสมการที่ 3.2 และ 3.3) เกิดที่จุดยูเทคติกโดยมีอุณหภูมิการหลอมละลายที่ต่ำ คือ อุณหภูมิ 754 °C และ 874 °C (Basu, 2006) ตามลำดับ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเกาะตัวกันของอนุภาคเบต และสูญเสียสภาพการไหลได้เร็ว นอกจากนั้นจากผลการวิเคราะห์ธาตุแบบจุดยังพบว่าองค์ประกอบของธาตุ ซิลิกา (Si), อลูมิเนียม (Al) และ แคลเซียม (Ca) ที่อยู่ในบริเวณรอบอนุภาคเบตจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกาบมะพร้าวที่ชะล้างด้วยน้ำ มีปริมาณที่สูงขึ้น โดยที่ธาตุทั้งสามดังกล่าวสามารถเกิดเป็นสารประกอบใหม่ในรูปของแคลเซียมอลูมิเนียมซิลิเกต ดังได้แสดงในสมการที่ (3.6) – (3.7) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 1,593 °C – 1,550 °C (Mu et al., 2021) ส่งผลให้จุดหลอมเหลวของเถ้าสูงขึ้นสามารถลดปัญหาการเกาะตัวของอนุภาคเบตและสูญเสียสภาพการไหลได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ธาตุแบบจุดของธาตุ Si และ Cl มีค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าตามลำดับ อย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ XRF ผลที่แตกต่างกันนี้อันเนื่องมาจากตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ EDS เป็นอนุภาคเบตซึ่งมีทรายเป็นองค์ประกอบหลัก (Si) รวมกับเถ้าเชื้อเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้เกิดเป็น

สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังสมการที่ (3.2) – (3.3), (3.6) – (3.7) ด้วยเหตุนี้ค่า Si จากการวิเคราะห์ EDS จึงมีค่าที่สูงกว่า XRF สำหรับค่า Cl ที่ได้จากการวิเคราะห์ EDS มีค่าต่ำกว่าการวิเคราะห์ XRF เนื่องมาจากมาตรฐานการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ XRF นั้น ถูกเตรียมที่อุณหภูมิ 550 °C แต่ตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ EDS ได้มาจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 800 °C ส่งผลให้ Cl มีค่าที่เหลือน้อยลง เพราะ Cl ที่อยู่ในรูป KCl จะเริ่มสลายตัวในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิ 600 °C และจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังการศึกษาของ Unchaisri and Fukuda (2022) ที่ศึกษาการเกิด Fouling ในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไธด์และ การใช้โปรแกรม FactSage. จำลองอุณหภูมิการเผาไหม้ตั้งแต่ 500 °C – 1500 °C เพื่อดูผลกระทบของสารประกอบในรูปของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาองค์ประกอบของเถ้าในเชื้อเพลิงกบมะพร้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการชะล้างด้วยน้ำ เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงกบมะพร้าวก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และนำเชื้อเพลิงมาเผาไหม้ในเตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธด์เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้า จากผลการศึกษการชะล้างเชื้อเพลิงกบมะพร้าวด้วยน้ำที่อัตราการไหล 197 มิลลิลิตร/นาที่ มีการนำไฟฟ้าของน้ำที่ชะล้างเริ่มต้นอยู่ในช่วง 3,054 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 4,106 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ใช้เวลา 25 นาที่ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ชะล้างเริ่มคงที่ 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ โดยประมาณ ซึ่งเป็นค่าการนำไฟฟ้าของน้ำประปาทั่วไป ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าพบว่าปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O), โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และคลอรีน (Cl) ลดลงอย่างมากจาก 34.2%, 17.7% และ 24.5% ในตัวอย่างที่ไม่ได้ชะล้างเหลือ 20.4%, 8.78% และ 4.42% ตามลำดับ ซึ่งออกไซด์ดังกล่าวและคลอรีนเมื่อเกิดการเผาไหม้อาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและการเกาะตัวกันของอนุภาคเบดเมื่อนำมาใช้กับเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์

การทำนายความรุนแรงในการเกิดผลกระทบของเถ้าสำหรับปัญหา Fouling และ Agglomeration โดยใช้ดัชนีสองชนิด คือ Base to Acid Ratio ($R_{b/a}$) และ Bed Agglomeration Index (BAI) ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของ

การเกิดปัญหาทั้งสองในเชื้อเพลิงกบมะพร้าวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการชะล้างด้วยน้ำลดลงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงกบมะพร้าวที่ยังผ่านการปรับปรุงคุณภาพ อย่างไรก็ตามแนวโน้มก็ยังมีโอกาสเกิดปัญหา Fouling และ Agglomeration สูงในตัวอย่างเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด เมื่อนำตัวอย่างเชื้อเพลิงทั้งสองมาเผาไหม้ในเตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไธด์โดยใช้ทรายเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน และให้ความร้อนคงที่ 800 °C พบว่าเวลาที่เชื้อเพลิงไหม้จนเกิดการสูญเสียสภาพการไหล (Defluidization time) อยู่ที่ 32 นาที่ และ 78 นาที่ สำหรับเชื้อเพลิงกบมะพร้าวที่ไม่ผ่านการชะล้างและเชื้อเพลิงกบมะพร้าวที่ผ่านการชะล้างด้วยน้ำ ตามลำดับ

การปรับปรุงเชื้อเพลิงกบมะพร้าวด้วยการชะล้างด้วยน้ำจึงสามารถลดปัญหาการเกาะตัวของอนุภาคเบดได้ อย่างไรก็ตามการทดลองการสูญเสียสภาพการไหลในเตาเผาไหม้ควรมีการทดลองซ้ำ เพื่อดูความแปรปรวนของเวลาและองค์ประกอบของธาตุที่อยู่รอบๆ อนุภาคเบด นอกจากนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมต่อสำหรับปัญหา Fouling ที่ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของหม้อไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปรียบเทียบก่อนและหลังการชะล้างด้วยน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณงบประมาณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (Fundamental Fund, FF) ประจำปีงบประมาณ 2567 รหัสโครงการวิจัย: 4694740 ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Basu, P. (2006). *combustion and gasification in fluidized beds*. Taylor and Francis Group. p.129.
- Chaivatamaset, P., Tia, S., & Methaviriyasilp, W., et al. (2019). Bed particle agglomeration and defluidization in the rubber wood and coir-fired fluidized bed. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 3457-3470. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0358-y>
- DEDE. (2023). *Thailand Alternative Energy Situation 2023*. Retrieved August 10, 2026, from <https://pei.dede.go.th/dataset/2566-thailand-alternative-energy-situation-2023>
- Deng, L., Xi Jin, J. L., & Che, D. (2018). Ash deposition behaviors during combustion of raw and water washed biomass fuels. *Journal of the Energy Institute*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.07.009>
- Eller, A. L., Åmand, L. E., & Steenari, B. M. (2013). Composition of agglomerates in fluidized bed reactors for thermochemical conversion of biomass and waste fuels. *Fuel*, 111, 696-708. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.018>

- Guo, Q., Cheng, Z., Chen, G., et al. (2020). Optimal strategy for clean and efficient biomass combustion based on ash deposition tendency and kinetic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122529>
- Homdoun, N., Sasujit, K., Uttharuan, J., et al. (2019). Influence of torrefaction temperature and time on the yields and properties of torrefied biomass. *Engineering and Applied Science Research*, 46(2), 170-175. <https://doi.org/10.14456/easr.2019.19>
- Ma, Q., Han, L., & Huang, G. (2017). Evaluation of different water-washing treatments effects on wheat straw combustion properties. *Bioresour Technol*, 245, 1075-1083. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.052>
- Mu, L., Li, T., & Wang, Z., et al. (2021). Influence of water/acid washing pretreatment of aquatic biomass on ash transformation and slagging behavior during co-firing with bituminous coal. *Energy*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121286>
- Silvennoinen, J., & Hedman, M. (2013). Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler. *Fuel Processing Technology*, 105, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.05.019>
- Singhal, A., Goossens, M., & Fantozzi, D., et al. (2021). Step washing: A modified pretreatment approach for industrial applications to improve chemical composition of agricultural residues. *Bioresour Technol*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125753>
- Singhal, A., Kontinen, J., & Joronen, T. (2021). Effect of different washing parameters on the fuel properties and elemental composition of wheat straw in water-washing pre-treatment. Part 1: Effect of washing duration and biomass size. *Fuel*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120206>
- Unchaisri, T., & Fukuda, S. (2022). Investigation of ash formation and deposit characteristics in CFB co-combustion of coal with various biomass fuels. *Journal of the Energy Institute*, 105, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.08.005>
- Unchaisri, T., & Oechaiyaphum, K. (2024). Development of electrical conductivity measurement tool and online data logging by a microcontroller., *The 2nd International Conference on Science and Technology (INCOST)*, Pathum Thani, Thailand.
- Vamvuka, D., & Zografos, D. (2004). Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. *Fuel*, 83(14-15), 2051-2057. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.012>
- Wang, L., Skjevra, G., & Hustad, J. E., et al. (2012). Sintering characteristics of sewage sludge ashes at elevated temperatures. *Fuel Processing Technology*, 96, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.12.022>
- Werkelin, J., Skrifvars, B.-J., Zevenhoven, M., et al. (2010). Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*, 89(2), 481-493. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.005>