

Research Article

การเพิ่มประสิทธิภาพเตาแก๊สชีไฟเบอร์แบบไหลลง
ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ

**Enhancement of Downdraft Gasifier
using Cashew Nut Shell Waste as Fuel with Automatic Control System**

พิทักษ์ คล้ายชม ^{a*} และ กันต์ อินทวงศ์ ^b

Pitak Khlaichom ^{a*} and Gunt Intuwong ^b

^a สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์ 53000

^a Computer Engineering Program, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Mueang, Uttaradit 53000, Thailand.

^b สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์ 53000

^b Industrial Technology Program, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Mueang, Uttaradit 53000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-05-22

Revised: 2024-10-12

Accepted: 2024-11-06

Keywords:

automatic control system;

downdraft gasifier;

cashew nut shell waste

Automatic control systems are technologies designed to manage processes based on preset conditions, eliminating the need for direct human intervention. These systems enhance efficiency, speed, and safety in operations. The objective of this research was to increase the efficiency of a downdraft gasifier with an automatic control system. Thermocouples were used to measure the temperature inside the furnace, sending signals to a PLC controller for processing. A PID control program operated the inverter to regulate blower speed and control the air flow into the furnace. The system included a touch screen display for viewing various furnace status values and controlling the reduction zone temperature according to specified values. Additionally, it allowed both manual and automatic control of the blower and fuel feed motor. The experiment aimed to determine the thermal efficiency of a gasifier stove using cashew nut shell waste as fuel. The temperature of the reduction zone was controlled at three levels: 515 °C, 615 °C, and 715 °C. Samples of the producer gas were analyzed in a laboratory using a gas chromatography machine. The research results found that the composition of the producer gas at the reduction zone temperature level of 515 °C yielded the highest heating value, measured at 4.39 MJ/Nm³. The proportions of combustible gases CO, H₂, and CH₄ were 21.0%, 13.5%, and 0.8%, respectively. The gasification system's efficiency with an automatic control system was calculated to be 48.68%, compared to that of the original gasification system without an automatic control system, which had an efficiency value of 39.92%, indicating that the automatic control system increased the gasification system efficiency by 21.94 %. The producer gas can be used as heat energy in the processing process to replace firewood and LPG.

* Corresponding author.

E-mail address: pitak.khl@uru.ac.th

Cite this article as:

Khlaichom, P. and Intuwong, G. 2025. Enhancement of Downdraft Gasifier using Cashew Nut Shell Waste as Fuel by Automatic Control System. **Recent Science and Technology** 17(3): 263440.

บทคัดย่อ

ระบบควบคุมอัตโนมัติเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยไม่ต้องมีการควบคุมจากมนุษย์โดยตรง ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว และความปลอดภัยมากขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลงด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิภายในเตาส่งสัญญาณไปประมวลผลที่เครื่องควบคุมพีแอลซี ใช้โปรแกรมควบคุมแบบพีไอดี สั่งงานเครื่องอินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์เพื่อควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตา โดยมีจอแสดงผลระบบสัมผัส สามารถดูค่าสถานะต่าง ๆ ของเตา ควบคุมค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันได้ตามค่าที่กำหนด และควบคุมการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงได้ทั้งแบบแมนนวลและแบบอัตโนมัติ ทำการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์โดยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ควบคุมอุณหภูมิโซนรีดักชันจำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C และส่งตัวอย่างโปรดิวเซอร์แก๊สไปตรวจหาองค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ผลการวิจัยพบว่าองค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ระดับอุณหภูมิโซนรีดักชัน 515 °C สามารถคำนวณค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สได้มากที่สุด เท่ากับ 4.39 MJ/Nm³ มีสัดส่วนของแก๊สติดไฟ CO H₂ และ CH₄ เท่ากับ 21.0 % 13.5 % และ 0.8 % ตามลำดับ และคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซีไฟเคชั่นที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติได้เท่ากับ 48.68 % เปรียบเทียบกับระบบแก๊สซีไฟเคชั่นเดิมที่ไม่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพ 39.92 % แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมอัตโนมัติทำให้ระบบแก๊สซีไฟเคชั่นมีประสิทธิภาพสูงขึ้น 21.94 % สามารถนำโปรดิวเซอร์แก๊สไปใช้เป็นพลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูปทดแทนฟืนและ LPG ได้มากขึ้น

คำสำคัญ: ระบบควบคุมอัตโนมัติ, เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลง, กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

1. บทนำ

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชเศรษฐกิจของอำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ มีพื้นที่ปลูกมะม่วงหิมพานต์มากเป็นอันดับ 1 ของประเทศ มีพื้นที่ปลูกทั้งหมด 91,904 ไร่ ได้ผลผลิต 7,267 ตันต่อปี ราคาเฉลี่ย 35.30 บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 257 ล้านบาทต่อปี (Department of Agriculture Extension, Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2019) หลังจากกะเทาะเมล็ดแล้วจะทำให้มีปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้ง ประมาณ 5,400 ตันต่อปี สำหรับวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไเก้ต้อย อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ มีปริมาณการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กะเทาะเปลือก ประมาณ 88 ตันต่อปี มีปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป ประมาณ 250 ตันต่อปี นำไปสกัดน้ำมัน CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) ด้วยเครื่องสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบเกลียวอัด (Screw Press) จะเหลือกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ประมาณ 185 ตันต่อปี (Phankam, 2022) หากมีการกำจัดโดยการกองกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทิ้งไว้ให้ย่อยสลายไปตามธรรมชาติ และทำลายโดยวิธีการเผาในพื้นที่โล่งแจ้ง จะก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ สารพิษจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ปนเปื้อนแหล่งน้ำชุมชน เกิดปัญหาขยะ ประกอบกับผลการศึกษาคูณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของน้ำมัน CNSL ของ Division of Agricultural Chemistry , Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives (1991) พบว่า น้ำมัน CNSL มีเป็นของเหลวสีน้ำตาลคล้ำ เหนียวข้น เป็นสารพิษ ทำให้ผิวหนังพุพองและเปื่อยได้ เมื่อน้ำมันดังกล่าวได้รับความร้อนสูงบางส่วนจะระเหยเป็นไอ มีกลิ่นฉุน กัดเยื่อจมูกและเยื่อตา การเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่โล่งแจ้ง ยังก่อให้เกิดก๊าซ

ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ ได้แก่ ฝุ่นละออง (TSP, PM10) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ มีเทน เป็นต้น แนวทางการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ของ Sangmanee (2021) นำเปลือกหุ้มเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาเป็นวัตถุดิบในการทำถ่านชีวภาพ (Cashew Nut Shell Biochar, CNSC) และศึกษาผลของการใช้ CNSC ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH, EC และการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชในดิน โดยใส่ปูนขาวและยิปซัมในการเปรียบเทียบ พบว่า CNSC มีประสิทธิภาพในการปรับค่า pH ของ CNSC น้อยกว่าปูนขาว โดยมีโพแทสเซียมซึ่งเป็นแคโทไอออนที่เป็นต่างเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความเป็นกรดในดินลดลง การใช้ CNSC ยังช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้โดยไม่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้า และ Khlaichom (2021) นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์บิบน้ำมัน CNSL ออกเหลือเป็นกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในระบบแก๊สซีไฟเคชั่น มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 39.92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถนำมาใช้แทนการใช้ฟืนและแก๊สหุงต้มในขั้นตอนการต้มเมล็ด การให้พลังงานความร้อนกับตูบเมล็ดของกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งช่วยลดต้นทุนค่าเชื้อเพลิงทั้งฟืนและแก๊ส LPG ได้ถึง 59,280 บาทต่อปี

จากปัญหาด้านการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จากกระบวนการแปรรูปมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างระบบแก๊สซีไฟเคชั่นขึ้น โดยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงเพื่อนำโปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ไปใช้เป็นพลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ระบบแก๊สซีไฟเคชั่นมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ซึ่งเป็นเตาที่ออกแบบเพื่อทำให้น้ำมันดินที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงโดยเฉพาะ โดยจุดเด่นของเตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิด V-Hearth จะออกแบบเป็นเหล็ก

รูปวงแหวนรูปตัว V คว่ำลง โดยบริเวณระหว่างระนาบของหัวฉีดและวงแหวนเหล็กจะมีเก๋าก่อตัวขึ้น ช่วยเพิ่มความเป็นฉนวนความร้อนทำให้เตาแก๊สซีฟิเออร์มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น และมีส่วนประกอบของไซโคลน สกรับเบอร์ หัวเผาในการศึกษาประสิทธิภาพของระบบแก๊สซีฟิเคชั่น พบว่ามีประสิทธิภาพทางความร้อนเพียง 39.92 % ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 2.22 มีอัตรากำลังความร้อน 26.82 kW องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้มีสัดส่วนของแก๊ส CO H_2 และ CH_4 คิดเป็น 16% 9.7% และ 1.5% ตามลำดับ มีค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สเท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจากระบบแก๊สซีฟิเคชั่นที่สร้างขึ้น อาศัยการเหนี่ยวนำของสกรับเบอร์แบบเวนจูร์สร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาทดแทนการใช้เครื่องเป่าลมซึ่งมีอัตราการไหลของอากาศที่จำกัด (Khlaichom, 2021) และไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและสภาวะต่าง ๆ ภายในเตาแก๊สซีฟิเออร์ได้อย่างเหมาะสม สอดคล้องกับ Samutjak and Jakrawatana (2016) ประเมินประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าชีวมวลเหลือทิ้งด้วยเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลลง ด้วยการทดสอบระบบแก๊สซีฟิเคชั่นแบบไหลลงขนาด 20 kW โดยใช้ขี้ขี้ข้าวโพดสามารถผลิตแก๊สได้ในระบบประกอบด้วย CO H_2 และ CH_4 คิดเป็น 20% 18% และ 2% ตามลำดับ ค่าความร้อนของแก๊ส 6 MJ/Nm³ แก๊สที่ผลิตได้จะถูกทำความสะอาดไซโคลนและชุดตัวกรอง และสอดคล้องกับ Homdoun et al. (2010) ทำการทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตความร้อนจากกระบวนการแก๊สซีฟิเคชั่นที่ใช้งานร่วมกับเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมในการอบแห้งเมล็ดพืช เตาแก๊สซีฟิเออร์ที่ใช้ทดสอบเป็นแบบไหลลงขนาด 600 kWth ติดตั้งร่วมกับระบบทำความสะอาดแก๊สโดยทดสอบเป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมงต่อเนื่อง ผลการทดสอบพบว่าระบบแก๊สซีฟิเออร์ มีอัตราการสิ้นเปลืองขี้ข้าวโพดเฉลี่ย 88.05 kg/h ค่าความร้อนและอัตราการไหลของโปรตีนเซอร์แก๊สตลอดช่วงทดสอบมีค่าเฉลี่ย 5.3 MJ/Nm³ และ 252.09 m³ /h ตามลำดับ ประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 63.41% การใช้ระบบแก๊สซีฟิเออร์ร่วมกับเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมให้อัตราการสิ้นเปลืองชีวมวลและพลังงานต่ำกว่าการใช้เตาชีวมวลชนิดเดียว 30% และให้ต้นทุนการผลิตความร้อนในการอบแห้งพืชต่ำกว่าเตาชีวมวล แบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลลงมักเกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิและคุณภาพของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ เนื่องจากระบวนการแก๊สซีฟิเคชั่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เหมาะสมในแต่ละโซน โดยเฉพาะโซนรีดักชันซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นโปรตีนเซอร์แก๊ส ควรรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 800 - 1,000 °C เพื่อการผลิตแก๊สที่เหมาะสมที่สุด (Unsomsri, 2022)

จากปัญหาดังกล่าว ทีมวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติที่เหมาะสมกับเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง โดยการควบคุม

อุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซีฟิเออร์ให้สม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตโปรตีนเซอร์แก๊ส และลดปริมาณน้ำมันดินและขี้เถ้าลง รวมถึงมีการวัดและแสดงผลค่าสภาวะต่าง ๆ ของเตา และแจ้งเตือนหากเกิดความผิดปกติขึ้นเพื่อความสะดวกปลอดภัยต่อการใช้งาน สามารถนำโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ไปใช้เป็นพลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูป ได้แก่ การต้มเมล็ดการอบแห้ง และการอบปรุงรส เกิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติกับเตาแก๊สซีฟิเออร์ ลดต้นทุนค่าฟืนและ LPG ลดปริมาณขยะ ลดการปล่อยมลพิษจากกระบวนการผลิตได้มากยิ่งขึ้น เป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างมีประสิทธิภาพก่อให้เกิดความยั่งยืนของการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยใช้รูปแบบการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) เพื่อการพัฒนาและหาประสิทธิภาพเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติที่เหมาะสมสำหรับผลิตพลังงานความร้อน

2.1 กลุ่มตัวอย่าง

ในการวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดกลุ่มตัวอย่างการทดลองผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สด้วยเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือ กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งเป็นเศษที่เหลือจากการสกัดเอาน้ำมัน CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) ออกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แล้ว

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ระบบเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด โซนเผาไหม้ และเส้นรอบวงของปลายหัวฉีด 130, 300 และ 248 mm. ตามลำดับ มีความสูงของโซนเผาไหม้ 275 mm. และความสูงของโซนรีดักชัน 115 mm.
- 2) ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ที่พัฒนาขึ้น
- 3) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบ V-Hearth ได้แก่ เครื่องวัดอุณหภูมิ เครื่องวัดความเร็วลม เครื่องชั่งน้ำหนัก เครื่องจับเวลา ชุดปั๊มดูดโปรตีนเซอร์แก๊ส ถังเก็บแก๊ส และเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

2.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย

- 1) ลงพื้นที่สำรวจวัสดุเหลือทิ้งและการใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูปของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไกรน้อย ตำบลหาดล้า อำเภอบ้านลาด จังหวัดสุราษฎร์ธานี
- 2) ออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth และจัดหาและจัดเตรียมอุปกรณ์เพื่อสร้างและประกอบระบบควบคุมอัตโนมัติ
- 3) สร้างและติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth
- 4) ทำการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีไฟเออร์ที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติที่อุณหภูมิภายในโซนรีดักชัน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C
- 5) ส่งตัวอย่างโปรตีนซีโรสไปตรวจหาองค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี
- 6) วิเคราะห์ข้อมูลค่าความร้อนของโปรตีนซีโรส และประเมินประสิทธิภาพของเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative : PID) ประกอบด้วยควบคุม 3 ส่วน (Kiatsunthorn, 2015) ได้แก่

1. ตัวควบคุมแบบพี ส่วนนี้สัญญาณควบคุม (CVp) เท่ากับผลคูณของอัตราการควบคุมแบบพี (Kp) กับผลต่างระหว่างค่าเป้าหมาย (SV) กับตัวแปรกระบวนการ (PV) หาได้จากสมการที่ 1

$$CVp = Kp(SV - PV) \quad (1)$$

2. ตัวควบคุมแบบไอ ส่วนนี้สัญญาณควบคุม (CVi) เท่ากับผลคูณของอัตราการควบคุมแบบไอ (Ki) กับปริพันธ์ (Integrate) ผลต่างระหว่างค่าเป้าหมาย (SV) กับตัวแปรกระบวนการ (PV) หาได้จากสมการที่ 2

$$CVi = Ki \int (SV - PV) dt \quad (2)$$

3. ตัวควบคุมแบบดี ส่วนนี้สัญญาณควบคุม (CVD) เท่ากับผลคูณของอัตราการควบคุมแบบดี (Kd) กับอนุพันธ์ (Derivative) ผลต่างระหว่างค่าเป้าหมาย (SV) กับตัวแปรกระบวนการ (PV) หาได้จากสมการที่ 3

$$CVD = Kd \frac{d(SV - PV)}{dt} \quad (3)$$

การควบคุมแบบ PID จึงเป็นการรวมสามส่วนเข้าด้วยกัน หาได้จากสมการที่ 4

$$CVpid = Kp(SV - PV) + Ki \int (SV - PV) dt + Kd \frac{d(SV - PV)}{dt} \quad (4)$$

ค่าความร้อนของโปรตีนซีโรส มีหน่วยเป็น MJ/Nm³ ซึ่งประกอบด้วย แก๊ส CO H₂ และ CH₄ สามารถหาได้จากสมการที่ 5 (Basu, 2010)

$$HV_{gas} = (XCO \times 12.63) + (XH_2 \times 10.78) + (XCH_4 \times 35.88) \quad (5)$$

โดยที่ HV_{gas} คือ ค่าความร้อนของโปรตีนซีโรส (MJ/Nm³)
 XCO คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนมอนอกไซด์
 XH_2 คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของไฮโดรเจน
 XCH_4 คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของมีเทน

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซีไฟเคชั่น เป็นค่าพลังงานความร้อนจากโปรตีนซีโรสที่ระบบสามารถผลิตได้ เทียบกับค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปในระบบ สามารถหาได้จากสมการที่ 6 (Food and Agriculture Organization of The United Nations, 1986)

$$\eta_{th} = \frac{HV_{gas} \times Q_{gas}}{HV_{fuel} \times FCR_{fuel}} \times 100 \quad (6)$$

โดยที่ η_{th} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซีไฟเคชั่น (%)

HV_{gas} คือ ค่าความร้อนของโปรตีนซีโรส (MJ/Nm³)

Q_{gas} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของโปรตีนซีโรสที่ออกจากระบบ (Nm³/hr)

HV_{fuel} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

FCR_{fuel} คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/s)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ดัง Figure 1 มีหน้าที่หลักในการควบคุมค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันภายในเตาให้มีค่าตามที่ตั้งค่าไว้ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิโซนรีดักชันภายในเตา แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นข้อมูลดิจิทัลด้วยโมดูลรับค่าเทอร์โมคัปเปิล ส่งข้อมูลอุณหภูมิไปประมวลผลที่เครื่องควบคุม PLC โดยใช้โปรแกรมควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมการทำงานของโบลเวอร์ให้ป้อนอากาศเข้าสู่เตาด้วยการสั่งงานอินเวอร์เตอร์ผ่านพอร์ต RS-485 อีกส่วนหนึ่งเป็นระบบป้อนเชื้อเพลิงอัตโนมัติ และใช้เซนเซอร์วัดค่าน้ำหนักไหลดเซลล์แบบ Shear Beam ขนาด 500 kg จำนวน 4 ตัว ต่อเข้ากับรวมสัญญาณ ทำการอ่านค่าน้ำหนักทั้งหมดด้วยตัวแสดงผลค่าน้ำหนักและคำนวณค่าน้ำหนักของเชื้อเพลิงคงเหลือในเตา ส่งข้อมูลค่าน้ำหนักไปยังเครื่องควบคุม PLC ผ่านพอร์ต RS-485 เพื่อประมวลผลควบคุมการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงด้วยการ

สั่งงานเปิดปิดแมกเนติกตามเงื่อนไขค่าน้ำหนักที่ตั้งค่าไว้
จอแสดงผลระบบสัมผัส HMI ทำงานร่วมกับเครื่องควบคุม PLC ทำให้ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ V-Hearth สามารถตั้งค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชัน ค่าน้ำหนักเชื้อเพลิง สามารถดูสถานะการทำงานของเตาในขณะปัจจุบัน ได้แก่ ค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันและโซนไพโรไลซิส ค่าน้ำหนักเชื้อเพลิง การทำงานของโบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิง สามารถควบคุม

การทำงานของโบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงได้ทั้งแบบ
แมนนวลและแบบอัตโนมัติ สามารถดูค่าที่บันทึกไว้ย้อนหลัง ได้แก่ ค่าวันที่และเวลา ค่าเวลาทำงานของชุดป้อนเชื้อเพลิง ค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงคงเหลือ ค่าอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิไฟเออร์ และค่าอุณหภูมิภายในโซนไพโรไลซิสของเตาแก๊สซิไฟเออร์ได้

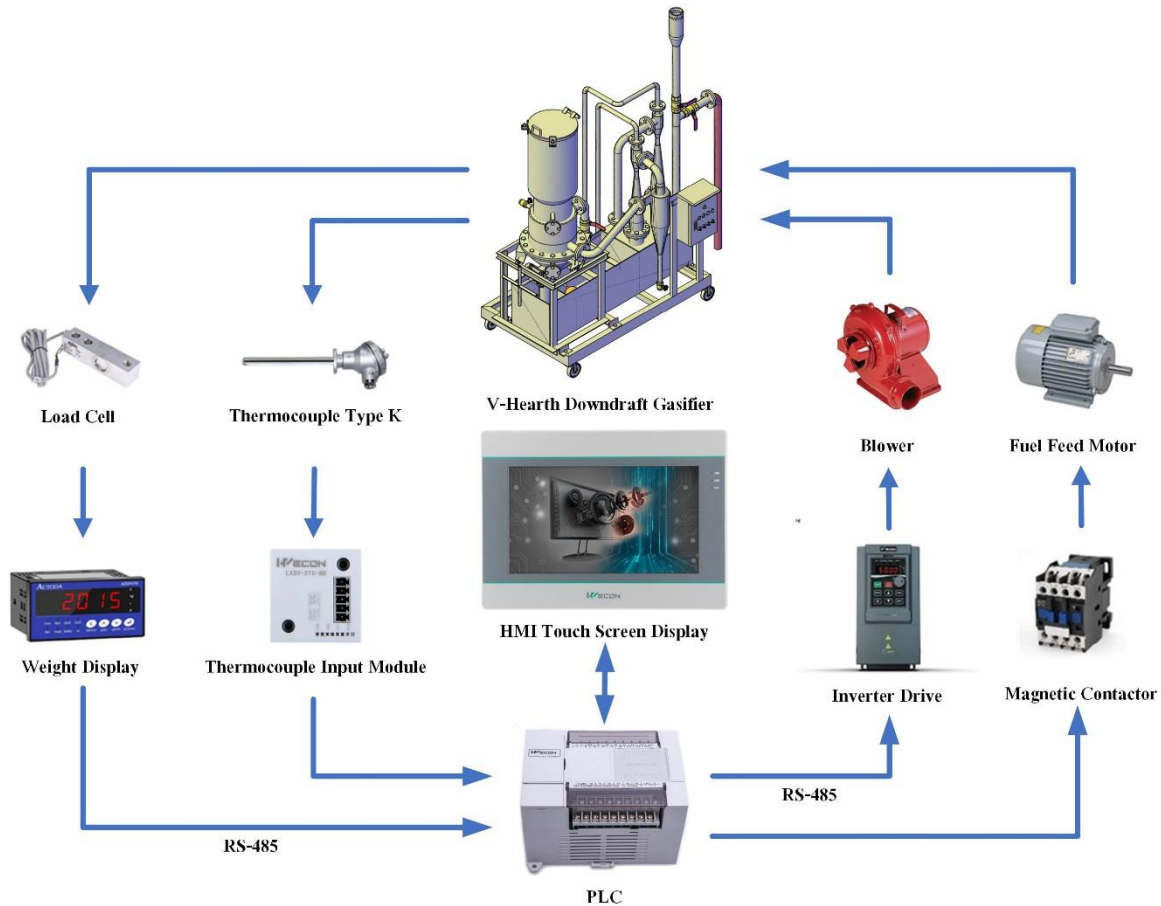


Figure 1 Overview of the automatic control system for the V-Hearth gasifier

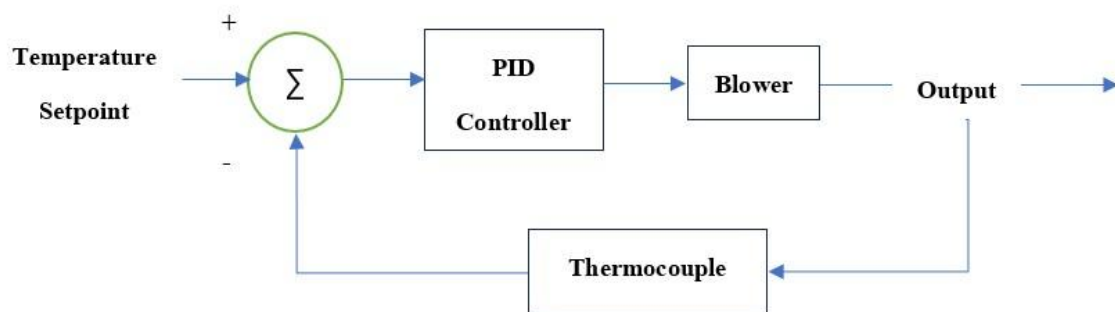


Figure 2 Temperature control system inside the V-Hearth gasifier

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ V-Hearth มีการออกแบบอัลกอริทึมในการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา ดัง Figure 2 เป็นการควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับ โดยเริ่มจากการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (Setpoint) ระบบจะคำนวณหาค่าความผิดพลาดหรือผลต่างของค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้กับค่าอุณหภูมิปัจจุบันของเตาที่วัดได้จากเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิ้ล และนำไปประมวลผลด้วยตัวควบคุม PID เพื่อหาค่าเอาต์พุตไปสั่งงานอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่ขับโบลเวอร์ป้อนอากาศเข้าสู่เตา หากอุณหภูมิปัจจุบันของเตามีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ค่าผิดพลาดจะมีค่าเป็นบวก ตัวควบคุม PID จะส่งค่าเอาต์พุตให้มากขึ้น ทำให้โบลเวอร์ป้อนอากาศเข้าสู่เตามากขึ้น การเผาไหม้ภายในเตาจะมากขึ้น แปรผันตรงกับอุณหภูมิภายในเตา แต่ถ้าอุณหภูมิภายในเตาเข้าใกล้หรือสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ตัวควบคุม PID จะลดปริมาณเอาต์พุตลง ทำให้โบลเวอร์ป้อนอากาศเข้าสู่เตาน้อยลงจนรูปแบบนี้ไปเรื่อย ๆ เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามค่าที่ตั้งไว้

3.2 การสร้างและติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ V-Hearth ที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

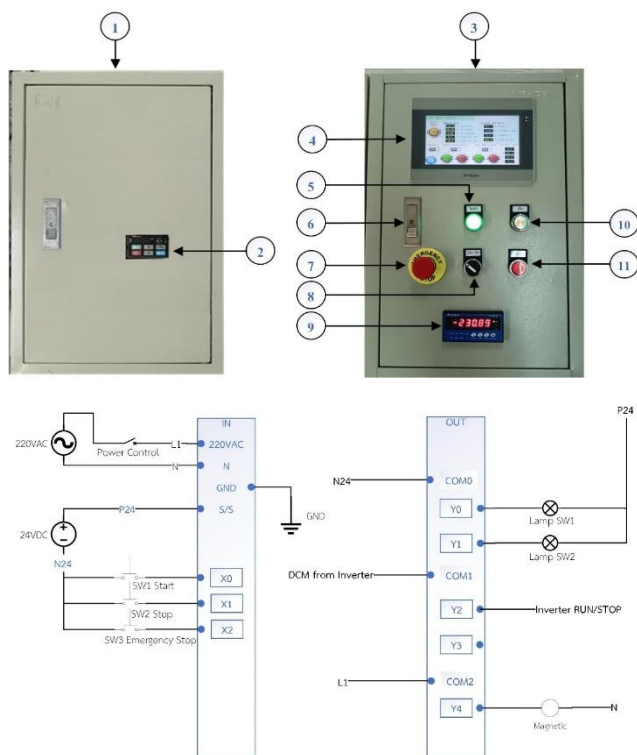


Figure 3 Components and circuits of the automatic control cabinet for the V-Hearth gasifier

รายละเอียดส่วนประกอบภายนอกตู้ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ V-Hearth ตามFigure 3 ได้แก่

1. ตู้ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า
2. หน้าจอของอินเวอร์เตอร์ควบคุมโบลเวอร์

3. ตู้ระบบควบคุมอัตโนมัติ
4. หน้าจอแสดงผลระบบ HMI
5. หลอดไฟแสดงสถานะไฟเข้า
6. กุญแจเปิดบานหน้าต่าง
7. สวิตช์หยุดการทำงานฉุกเฉิน
8. สวิตช์เปิด-ปิดไฟเข้าตู้ระบบควบคุมอัตโนมัติ
9. หน้าจอตัวแสดงค่าน้ำหนักเชื้อเพลิง
10. สวิตช์เริ่มต้นการทำงานและหลอดไฟแสดงผล
11. สวิตช์หยุดการทำงานและหลอดไฟแสดงผล

การทำงานของโปรแกรมระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ V-Hearth แบ่งออกเป็น 2 โหมดการทำงาน คือ โหมดแบบแมนนวล (Manual) และโหมดแบบอัตโนมัติ (Auto)



Figure 4 Operation screen in Manual mode

การทำงานในโหมด Manual ดัง Figure 4 ผู้ใช้งานสามารถควบคุมการทำงานได้เอง ในส่วนของการควบคุมมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงให้ดูในกรอบของ MOTOR FEED โดยให้กดที่ปุ่ม START เพื่อเปิดมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าสู่เตาจะทำให้ตัวเลขค่าน้ำหนัก PV WEIGHT KG เพิ่มขึ้น เมื่อหยุดป้อนเชื้อเพลิงให้กดที่ปุ่ม STOP มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงจะหยุดทำงาน ส่วนการควบคุมความเร็วของโบลเวอร์ป้อนอากาศให้ดูในกรอบของ BLOWER VFD HEAT ให้กรอกค่าความเร็วของโบลเวอร์ที่ต้องการในช่อง SET SPEED ตั้งค่าได้ 0 – 50 จากนั้นให้กดที่ปุ่ม START เพื่อเปิดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมโบลเวอร์ สามารถดูค่าความเร็วของโบลเวอร์ได้ที่ช่อง PV INVERTER SPEED และดูค่ากระแสไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในช่อง PV INVERTER AMP เมื่อต้องการปิดการทำงานของอินเวอร์เตอร์และโบลเวอร์ให้กดที่ปุ่ม STOP ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนโหมดการควบคุมเป็นโหมด AUTO ได้โดยการกดปุ่ม SELECT MODE



Figure 5 Operation screen in AUTO mode

การทำงานในโหมด AUTO ดัง Figure 5 ระบบจะควบคุมมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงและโบลเวอร์เองอัตโนมัติตามค่าที่ได้ตั้งไว้ในการตั้งค่าการควบคุมมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงให้ดูที่กรอบของ MOTOR FEED โดยให้กรอกค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงขั้นสูงสำหรับใช้เป็นเงื่อนไขให้มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงหยุดการทำงาน ในช่อง SV HI WEIGHT ให้กรอกค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงขั้นต่ำสำหรับใช้เป็นเงื่อนไขให้มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงเปิดการทำงาน ในช่อง SV LOW WIEGHT ให้กรอกค่าเวลาสำหรับใช้เป็นเงื่อนไขจำกัดเวลาที่มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงสามารถเปิดการทำงานแต่ละครั้งได้นานเท่าไร ในช่อง SV TIME OFF (SEC) เมื่อตั้งค่าการควบคุมมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงเรียบร้อยแล้ว ให้กดที่ปุ่ม START เพื่อเริ่มต้นการทำงาน ในขณะที่ระบบทำงานแบบอัตโนมัติ ผู้ใช้งานสามารถดูค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงคงเหลือปัจจุบันได้ในช่อง PV WEIGHT KG และดูการนับเวลาการเปิดการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงแต่ละครั้งได้ที่ช่อง PV TIME OFF (SEC) สามารถดูสถานะการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงได้ที่ช่อง MAGNETIC เมื่อต้องการหยุดการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงให้กดที่ปุ่ม STOP

ส่วนการตั้งค่าการควบคุมโบลเวอร์ให้ระบุที่กรอบ BLOWER VFD HEAT โดยกรอกตัวเลขค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันภายในเตาที่ต้องการ ในช่อง SV TEMP SETTING จากนั้นให้กดที่ปุ่ม START เพื่อเริ่มต้นการทำงานของอินเวอร์เตอร์และโบลเวอร์แบบอัตโนมัติ สามารถดูค่าความเร็วของโบลเวอร์ได้ที่ช่อง PV INVERTER SPEED ดูค่ากระแสไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ใช้ ในช่อง PV CURRENT A และสามารถดูค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันในปัจจุบันได้ในช่อง PV TEMP1 C หากอุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ระบบจะควบคุมอินเวอร์เตอร์และโบลเวอร์ให้ป้อนอากาศเข้าสู่เตามากขึ้น หากอุณหภูมิเข้าใกล้หรือถึงค่าที่ตั้งไว้ ระบบจะควบคุมอินเวอร์เตอร์และโบลเวอร์ให้ป้อนอากาศเข้าสู่เตาน้อยลง โดยอาศัย

โปรแกรมควบคุมแบบ PID ซึ่งโปรแกรมจะปรับจูนค่าพารามิเตอร์ PI และ D ที่เหมาะสมแบบอัตโนมัติ และแสดงค่าพารามิเตอร์บนหน้าจอ เมื่อต้องการหยุดการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงให้กดที่ปุ่ม STOP

3.3 การติดตั้งตู้ควบคุมของระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth

ในการติดตั้งตู้ควบคุมอัตโนมัติเข้ากับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth ดัง Figure 6 เริ่มจากการเชื่อมต่อสายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ลโซนรีดักชัน และเทอร์โมคัปเปิ้ลโซนไฟโรไลซิส เข้ากับโมดูลอ่านค่าอุณหภูมิ CH1 และ CH2 ตามลำดับ จากนั้นเชื่อมต่อสายสัญญาณจากกล่องรวมสัญญาณโหลดเซลล์ เข้ากับตัวแสดงผลค่าน้ำหนัก ภายในตู้ระบบควบคุมอัตโนมัติ ในส่วนภาคเอาต์พุต ให้ทำการต่อสายไฟของโบลเวอร์เข้ากับเครื่องอินเวอร์เตอร์ ทำการต่อสายไฟของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงเข้ากับแมกเนติกคอนแทคเตอร์ ต่อสายไฟปั๊มน้ำ และต่อสายไฟเมนเข้าตู้ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยทำการต่อสายไฟเข้ากับคอนเน็คเตอร์ที่กำหนดให้ถูกต้อง



Figure 6 Installation of automatic control cabinet to V-Hearth gasifier

เมื่อเชื่อมต่อสายสัญญาณและสายไฟต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ให้ทำการเปิดเมนเบรกเกอร์เบรกเกอร์ปั๊มน้ำ เบรกเกอร์ตู้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ เบรกเกอร์มอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิง และเบรกเกอร์เครื่องอินเวอร์เตอร์ เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ทั้งหมดของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ V-Hearth หลังจากนั้น ให้ทำการตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ได้แก่ การอ่านค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงคงเหลือ และการอ่านค่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ล เลือกโหมดควบคุมแบบ Manual แล้วทำการทดลองควบคุมโบลเวอร์ที่ความเร็วต่าง ๆ และการทำงานของมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิง หากพบข้อผิดพลาดให้ดำเนินการหาสาเหตุและแก้ไขให้เป็นปกติก่อน แล้วจึงเริ่มต้นการทดลอง

ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซีฟเอร์แบบ V-Hearth ที่ใช้กากเปลือกมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาระบบที่ใช้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐานในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้เครื่องควบคุม PLC เป็นตัวควบคุมหลัก แตกต่างจากระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับเตาถลุงสินแร่เหล็กน้ำพี้แบบคิวโปลา ของ Khlaichom *et al.* (2018) ที่ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นตัวประมวลผลหลัก ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ในการรับค่าจากเซนเซอร์และส่งค่าไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก และระบบเตาเผาถ่านชีวมวลควบคุมระบบด้วยอินเทอร์เนตของสรรพสิ่ง ของ Homsri *et al.* (2023) ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวควบคุมหลักและเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เนตของสรรพสิ่ง จะเห็นได้ว่าทั้ง PLC และไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถใช้งานควบคุมอุปกรณ์และควบคุมกระบวนการได้ โดยมีความแตกต่างกันที่ PLC ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม เขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษา Ladder มีความน่าเชื่อถือและมีเสถียรภาพสูงในสภาพแวดล้อมของโรงงานอุตสาหกรรม ในขณะที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นแพลตฟอร์ม Open Source ออกแบบมาสำหรับนักพัฒนาระบบ เขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษาซี และภาษาไพธอน ใช้งานได้ง่าย มีแหล่งข้อมูลออนไลน์มากมาย มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน สามารถเชื่อมต่อสื่อสารต่างๆ ได้ง่าย และมีราคาถูก (Polaridad, 2024) ดังนั้น การเลือกใช้งาน PLC หรือไมโครคอนโทรลเลอร์จึงขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสมของแต่ละงาน สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ตัว

ควบคุม PLC เนื่องจากระบบที่มีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือสูง ในสภาพแวดล้อมการทำงานภายนอกอาคาร มีอุณหภูมิและความชื้นสูง มีสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กของมอเตอร์มาก แต่มีเงื่อนไขในการควบคุมไม่ซับซ้อนมาก

3.4 ผลการควบคุมอุณหภูมิโซนรีดักชันภายในเตาแก๊สซีฟเอร์

การทดลองควบคุมอุณหภูมิโซนรีดักชันภายในเตาแก๊สซีฟเอร์ด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี กำหนดค่าอัตราการควบคุม Kp Ku และ Kd เท่ากับ 283.5 61.5 และ 16.4 ตามลำดับ เริ่มต้นการทำงานในโหมดแบบอัตโนมัติเมื่อโซนรีดักชันมีอุณหภูมิถึง 515 °C จึงตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการเป็น 615 °C เป็นเวลา 60 นาที แล้วให้เปลี่ยนอุณหภูมิที่ต้องการเป็น 715 °C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการให้สูงขึ้นจาก 515 °C เป็น 615 °C และ จาก 615 °C เป็น 715 °C มีค่าช่วงเวลาขึ้น (Rise time) 43 นาที และ 18 นาที ตามลำดับ ไม่มีโอเวอร์ชูต (Overshoot) มีค่าผิดพลาดสถานะคงตัว (Steady – state error) เล็กน้อย มีเสถียรภาพดี ตาม Figure 7

ค่าอุณหภูมิโซนรีดักชันที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ต่ำกว่าค่าตามทฤษฎี เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลอยู่ห่างจากช่องอากาศเข้าของโซนเผาไหม้ถึง 275 mm. ทำให้วัดอุณหภูมิได้ค่าต่ำลงไป สอดคล้องกับผลการทดลองของ Hirunprasertsri and Butdee (2014) ที่ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะหลุมฝังกลบโดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 227 °C – 896 °C

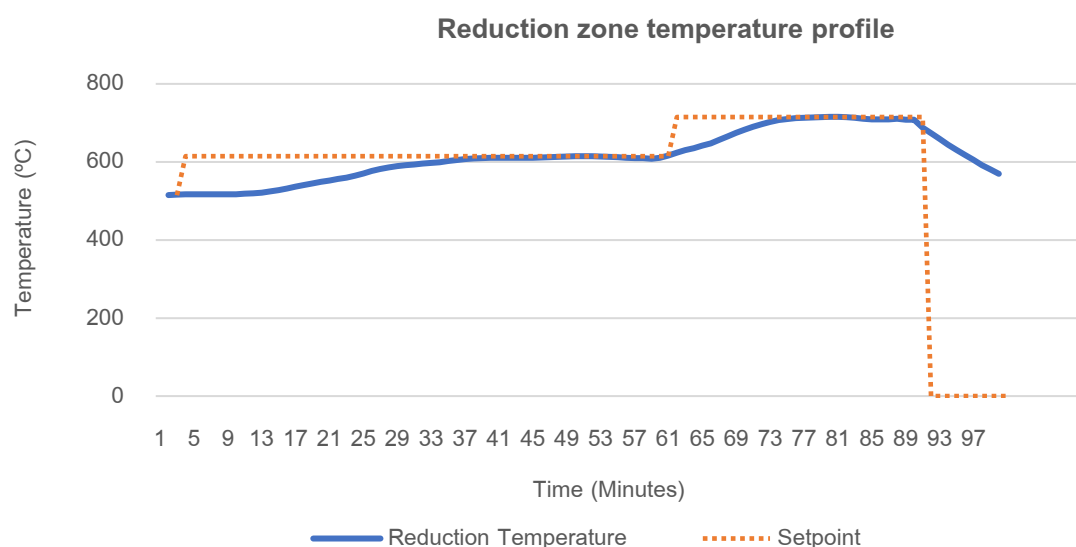


Figure 7 Reduction zone temperatures profile

Table 1 The composition of the producer gas is regulated by controlling the temperature in the reduction zone of the V-Hearth gasifier with an automatic control system, using cashew nut shell waste as fuel

The composition of the producer	Proportion of gas (%)			
	Temperature ^{1/}	Temperature ^{1/}	Temperature ^{1/}	No control system ^{2/}
	515 °C	620 °C	715 °C	
Methane (CH ₄)	0.8	0.9	0.4	1.5
Carbon Monoxide (CO)	21.0	15.8	14.4	16
Carbon dioxide (CO ₂)	9.8	13.4	13.5	10
Oxygen (O ₂)	0.9	1.1	1.0	4.7
Nitrogen (N ₂)	54.0	57.0	61.1	61
Hydrogen (H ₂)	13.5	11.8	9.6	9.7

^{1/} The composition of the producer gas is regulated by controlling the temperature in the reduction zone of the V-Hearth gasifier with the automatic control system

^{2/} The composition of producer gas is generated from V-Hearth gasifier without the automatic temperature control system (Khlaichom, 2021)

3.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโปรดิวเซอร์แก๊สจากห้องปฏิบัติการ

จากการทดลองควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C เพื่อทำการศึกษาร้อยละของโปรดิวเซอร์แก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการคำนวณค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส ผู้วิจัยจึงได้เก็บตัวอย่างโปรดิวเซอร์แก๊ส และส่งตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างไปตรวจหาองค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ซึ่งองค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สประกอบด้วยมีเทน (CH₄) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกซิเจน (O₂) ไนโตรเจน (N₂) และไฮโดรเจน (H₂) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโปรดิวเซอร์แก๊ส แสดงดัง Table 1 ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัดส่วนของ H₂ จะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาน้ำแปลงแก๊ส (Water gas reaction) ลดลง และสัดส่วนของ CH₄ มีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาแปลงมีเทน (Methanation) มักเกิดขึ้นในอุณหภูมิที่ต่ำ และมีเทนจะแตกตัวเป็น CO และ H₂ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่นเดียวกับสัดส่วนของ CO จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกินค่าที่เหมาะสม เนื่องจากปฏิกิริยาบูดัวร์ด (Boudouard) เกิดขึ้นได้น้อยลง ส่งผลให้ CO₂ เพิ่มมากขึ้น

3.6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อน ประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ

จากการควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C เมื่อแทนค่าสัดส่วนของแก๊สติดไฟที่เกิดตาม Table 1 ในสมการที่ 5 แล้ว สามารถคำนวณค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้เท่ากับ 4.39 3.59 และ 3.00 MJ/Nm³ ตามลำดับ

ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีอัตราการไหลของแก๊ส (Q_{gas}) เท่ากับ 26.79 m³/h มีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (FCR_{fuel}) เท่ากับ 11.4 kg/h และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีค่าความร้อน 21.22 MJ/kg (Khlaichom *et al.*, 2020) สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน (η_{th}) จากการควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C ตามสมการที่ 6 ได้ค่าดัง Table 2 สังเกตได้ว่าการตั้งค่าให้อุณหภูมิของโซนรีดักชันสูงขึ้น จะทำให้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสั่งงานให้โบลเวอร์ป้อนอากาศเข้าสู่เตามากขึ้น ส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น CO₂ จึงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ CH₄ CO และ H₂ ลดลง ทำให้ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สและค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันลดต่ำลงไปด้วย

Table 2 Efficiency values of the gasification system with temperature control in the reduction zone by the automatic control system

Temperature in reduction zone	The heating value of producer gas (MJ/Nm ³)	Efficiency of gasification system (%)
515 °C ^{1/}	4.39	48.68
615 °C ^{1/}	3.59	39.81
715 °C ^{1/}	3.00	33.27
No control System ^{2/}	3.60	39.92

^{1/} Efficiency values of the gasification system with automatic control system^{2/} Efficiency values of the gasification system without automatic control system (Khlaichom, 2021)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ และใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง จากการทดลองควบคุมอุณหภูมิโซนรีดักชันที่ระดับ 515 °C 615 °C และ 715 °C พบว่าที่ระดับอุณหภูมิ 515 °C มีค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สมากที่สุดเท่ากับ 4.39 MJ/Nm³ มีค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันสูงสุดเท่ากับ 48.68 % มีค่ามากกว่าโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันเดิมที่ไม่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ (Khlaichom *et al.*, 2018) ซึ่งมีค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส เท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ มีค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันเท่ากับ 39.92 % เนื่องจากระบบควบคุมแบบอัตโนมัติช่วยให้เกิดปฏิกิริยาที่สามารถผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สที่ค่าความร้อนสูง โดยสามารถลดปริมาณ O₂ ลงได้อย่างชัดเจน และเพิ่มเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นว่าระบบแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ที่ตั้งค่าอุณหภูมิภายในเตาแก๊สซิฟิเคชันบริเวณโซนรีดักชันให้มีค่าเท่ากับ 515 °C ทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพสูงขึ้น 21.94 % โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง ของ Samutjak and Jakrawatana (2016) เท่ากับ 54 % และประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กะลามะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง ของ Sabpayasan *et al.* (2018) เท่ากับ 50.49 %

4. สรุป

ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติสำหรับเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบ V-Hearth ที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมค่าอุณหภูมิของโซนรีดักชันภายในเตาให้มีค่าตามที่ตั้งค่าไว้ โดยติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิโซนรีดักชันภายในเตา ประมวลผลด้วยเครื่องควบคุม PLC โดยใช้โปรแกรมควบคุมแบบพีไอดี เพื่อควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาด้วยการควบคุมความเร็วของโบลเวอร์ โดยมีจอแสดงผลระบบสัมผัส HMI ทำงานร่วมกับเครื่องควบคุม PLC สามารถควบคุมการทำงานของโบลเวอร์และมอเตอร์ป้อนเชื้อเพลิงได้ทั้งแบบ Manual และ Auto จากการทดลองควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 515 °C 615 °C และ 715 °C

คำนวณค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สได้เท่ากับ 4.39 3.59 และ 3.00 MJ/Nm³ ตามลำดับ และสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันจากการควบคุมอุณหภูมิภายในโซนรีดักชันของเตาแก๊สซิฟิเคชันด้วยระบบควบคุมอัตโนมัติ ได้เท่ากับ 48.68 % 39.81 % และ 33.27 % ตามลำดับ การใช้โปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเตาแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงทดแทน LPG ในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์อย่างเต็มศักยภาพ จะมีระยะเวลาคืนทุน (PB) 2.6 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 302,594 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 37 % อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) 2.5 จะทำให้การลงทุนสร้างเตาแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ มีความคุ้มค่าต่อการลงทุน และมีอัตราผลตอบแทนสูง นอกจากนี้ยังเกิดรูปแบบการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบใหม่ที่ก่อให้เกิดรายรับและลดต้นทุนค่าพลังงาน คิดเป็นมูลค่าทั้งสิ้น 801,280 บาท/ปี เพิ่มขึ้นจากการจัดการในรูปแบบเดิม 551,280 บาท/ปี และสามารถนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติ ไปประยุกต์ใช้งานในสถานประกอบการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรและมีวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาเป็นชีวมวลใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเตาแก๊สซิฟิเคชันได้ หรือนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมเตาเผาชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น เตาเผาชีวมวลแบบเผาตรง เตาถลุงโลหะ เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณนางวันทรา ผ่านคำ ประธานกลุ่มวิสาหกิจชุมชนส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไเก้ต้อย ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบเตาแก๊สซิฟิเคชัน ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่สนับสนุนงานวิจัยอย่างจริงจังและต่อเนื่องมาโดยตลอด และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวนาม ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- Basu, P. 2010. **Gasification theory and modeling of gasifiers**. Available Source: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00005-2>, May 5, 2010. (in Thai)
- Department of Agriculture Extension, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2019. **Cashew Nut**. Available Source: <http://production.doae.go.th/>, April 22, 2024. (in Thai)
- Division of Agricultural Chemistry, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 1991. **Cashew Nut**. Agricultur Co-Operative Federation of Thailand Printing Company Limited, Nonthaburi. (in Thai)
- Food and Agriculture Organization of The United Nations. 1986. **Wood Gas as Engine Fuel**. Mechanical Wood Products Branch Forest Industries Division FAO Forestry Department, Rome Italy.
- Hirunprasertsri, S. and Butdee, S. 2014. Experimental Study to Obtain Gas Production Conditions from the Old Landfill Solid Waste by using Gasification Process. **SWU Engineering Journal** 9(1): 16-27. (in Thai)
- Homsri, P., Jitchak, K. and Sitanon, J. 2023. A development of biomass charcoal kiln system control by internet of things. **Kasem Bundit Engineering Journal** 13(2): 42-62. (in Thai)
- Homdoun, N., Dussadee, N. and Sasujit, K. 2010. Testing and Performance Analysis of Gasifier System for Grain Drying, pp.103-108. In **The 8th Thailand Renewable Energy for Community Conference**. Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Khlaichom, P. 2021. Gasification Technology for Cashew Nut Shell Residue Management. Doctor of Philosophy Program, Uttaradit Rajabhat University. (in Thai)
- Khlaichom, P., Phromfaiy, A. and Nathiang, P. 2018. Efficiency Improvement of Cupola Namphi Iron Ore Furnace by Using Automatic Control system. **UTK Journal** 12(2): 49-59. (in Thai)
- Khlaichom, P., Tangjuank, S. and Pinyaphong, P. 2020. Design and efficiency of downdraft gasifier using waste from processing of cashew nut as fuel. **Journal of Energy and Environment Technology** 7(1): 75-86. (in Thai)
- Kiatsunthorn, S. 2015. **Industrial automation PLCs and industrial automation systems**. SE-ED Education Public Company Limited, Bangkok. (in Thai)
- Phankam, W. 2022. **Management Model for Cashew Nut Shell Waste from the Processing Process**. Ban Hat Kai Toi Career Promotion Group, Uttaradit. (in Thai)
- Polaridad. 2024. **What is the difference between PLC and Arduino?**. Available Source: <https://www.polaridad.es/th/que-diferencia-hay-entre-un-plc-y-un-arduino/>, March 20, 2024. (in Thai)
- Sabpayasan, P., Thongbunchoo, J., Rukruang, A., Chaichana, T., Kongsune., P. and Kaew-On, J. 2018. Analysis of producer gas form downdraft gasifier by using coconut shell as fuel. **Thaksin University Journal** 21(2): 61-68. (in Thai)
- Samutjak, S. and Jakrawatana, N. 2016. Efficiency analysis of electricity production from biomass waste using downdraft gasifier. **Thai Environmental Engineering Journal** 30(3): 37-46. (in Thai)
- Sangmanee, P. 2021. Characteristics of Biochar Derived from Cashew Nut Shell and Potential for Acid Soil Amelioration. **Journal of Agriculture** 37(1): 39-49. (in Thai)
- Unsomsri, N. 2022. Development of small ceramic kiln employing syngas provided by biomass cross draft gasifier. Master of engineering (Mechanical Engineering), Srinakharinwirot University. (in Thai)