

ผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่มีต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงของเตาฟลูอิดไต์เบดแก๊สซิไฟเออร์
The Effects of Air Inlet Configurations on Syngas Productions
in a Fluidized Bed Gasifier

จตุพร อินสุวรรณโน วสุ สุขสุวรรณ และ มัगतาร์ แวหะยี่*
Jatuporn Insuwanno, Wasu Suksuwan and Makatar Wae-Hayee*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110
Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Songkhla 90110

*Corresponding author: Tel.: 080 7151346. E-mail address: wmakatar@eng.psu.ac.th

Received: 20 September 2022, Revised: 20 April 2023, Accepted: 4 May 2023, Published online: 30 August 2023

Abstract

In this work, the effect of air configuration inlet of a fluidized bed gasifier was studied. The reactor has a diameter of 0.2 meter and a height of 1.5 meters. There are three air inlet configurations: (1) the updraft air inlet pipe, (2) the double tangential inlet pipe, and (3) the single tangential inlet pipe. The latter two types can create a swirling flow inside the reactor. The air flow rate was fixed at an equivalent ratio of 0.3, while the mixed palm cake was constantly fed at 3 kg/hour. The production gas (Syngas) obtained from the gasification process were measured using a syngas analyzer. The results showed that the temperature profile inside the fluidized bed gasifier with the double air inlet is higher than the other cases. This is because the combustion zone size is the largest in this case. In addition, the double tangential inlet pipe produced the most syngas quality which can produced the syngas concentration of 20.40%, 8.66% and 2.70% for carbon monoxide (CO), hydrogen (H₂) and methane (CH₄), respectively. In addition, the low calorific value (LHV) of the syngas of the double tangential air inlet was the highest at 4,786 kJ/m³, followed by the single tangential air inlet at 3,437 kJ/m³ and the updraft air inlet 2,721 kJ/m³. In conclusion, the double tangential inlet pipe is more favorite for designing fluidized bed gasification system at assigned equivalence ratio.

Keywords: Gasifier, Fluidized gasifier, fuel, Syngas

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ศึกษาผลของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศของเตาฟลูอิดไธด์เบดแก๊สซิไฟเออร์ เตามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร และมีความสูง 1.5 เมตร โดยได้กำหนดรูปแบบท่อทางเข้าอากาศ 3 รูปแบบ คือ (1) ท่อทางเข้าอากาศแบบไหลขึ้น (แบบทั่วไป Updraft), (2) ท่อทางเข้าแบบไหลเข้าด้านข้างสองทาง และ (3) ท่อทางเข้าแบบไหลเข้าด้านข้างทางเดียว โดยสองแบบหลังสามารถสร้างกระแสไหลหมุนวน (Swirling) ภายในเตา ทุกรูปแบบการทดลองกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงจากกากปาล์มน้ำมันให้คงที่ที่ 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และกำหนดการป้อนอัตราการไหลของอากาศที่อัตราส่วนสมมูล (Equivalent Ratio) เท่ากับ 0.3 สำหรับแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) ที่ได้จากการกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้วิเคราะห์คุณสมบัติโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Syngas analyzer) ผลการศึกษาพบว่า โปรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาฟลูอิดไธด์เบดแก๊สซิไฟเออร์ของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าด้านข้างสองทาง มีโปรไฟล์อุณหภูมิที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ ซึ่งเป็นผลที่แสดงให้เห็นว่ามีขนาดของโซนเผาไหม้ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบท่อทางเข้าอื่นๆ สอดคล้องกับปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงของรูปแบบท่อทางเข้าสองทางที่มีความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิงมากที่สุด ซึ่งประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีความเข้มข้นเฉลี่ยที่ 20.40 % ตามมาด้วย แก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีความเข้มข้นเฉลี่ย 8.66 % และแก๊สมีเทน (CH_4) ที่มีความเข้มข้นเฉลี่ย 2.70 % และเมื่อพิจารณาถึงค่าความร้อนต่ำเฉลี่ย (Average Low Heating Value) พบว่า รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบสองทางมีค่าความร้อนเฉลี่ยที่สูงที่สุด คือ $4,786 \text{ kJ/m}^3$ ตามมาด้วยรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบทางเดียวที่มีค่าความร้อนเฉลี่ยที่ $3,437 \text{ kJ/m}^3$ และกรณีรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลขึ้นที่มีค่าความร้อนเฉลี่ยต่ำสุดคือ $2,721 \text{ kJ/m}^3$ จากการศึกษาทั้งหมดแสดงให้เห็นว่ารูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าด้านข้างสองทาง มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับสร้างระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนสมมูลดังกล่าว

คำสำคัญ: แก๊สซิไฟเออร์ ฟลูอิดไธด์เบดแก๊สซิไฟเออร์ เชื้อเพลิง แก๊สเชื้อเพลิง

บทนำ

ในปัจจุบันการใช้เชื้อเพลิงมาจากหลากหลายแหล่งพลังงาน ซึ่งส่วนใหญ่มาจากน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ หรือ ถ่านหิน ซึ่งแหล่งเหล่านี้ล้วนเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และยังมีแนวโน้มที่แหล่งพลังงานจะมีปริมาณลดลงแต่ยังมีความต้องการที่สูงมากขึ้น ทำให้เชื้อเพลิงดังกล่าวมีราคาที่สูงขึ้นในทุกๆ ปี ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้ทั่วโลกหันมาให้ความสำคัญกับการหาแหล่งพลังงานทางเลือกเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป สำหรับการเลือกใช้พลังงานทางเลือกส่วนใหญ่ ก็จะต้องคำนึงถึงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ที่ใช้งาน โดยพลังงานทางเลือกส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาใช้ เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ หรือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ แต่สำหรับประเทศไทย พลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพมากที่สุดคือ พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งจะอยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง ส่วนใหญ่เชื้อเพลิงประเภทนี้จะถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมที่หลากหลาย อย่างเช่น การนำไปใช้ในโรงไฟฟ้าชีวมวล หรือ การนำไปใช้ในโรงงานที่ใช้ไอน้ำจากการหมักต้มไอน้ำ ซึ่งจากข้อมูลของสำนักงานสิ่งแวดล้อม [1] ได้ให้ข้อมูลว่า การนำชีวมวลใช้เป็นพลังงาน สามารถแบ่งการนำไปใช้ได้ 2 ลักษณะ [2] คือ (1) การนำไปใช้โดยตรง คือ การนำเอาชีวมวลไปใช้ได้โดยการนำไปเผา ซึ่งให้ได้ทั้งความร้อนและแสงสว่าง แต่จะได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ และ (2) การนำไปใช้โดยผ่านกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถนำชีวมวลไปใช้งานได้หลายรูปแบบและสะดวกต่อการนำไปใช้งานได้หลากหลาย [3-5] อย่างเช่น เอทานอล น้ำมันชีวภาพ หรือ ก๊าซชีวภาพ ที่ได้จากกระบวนการทางเคมี

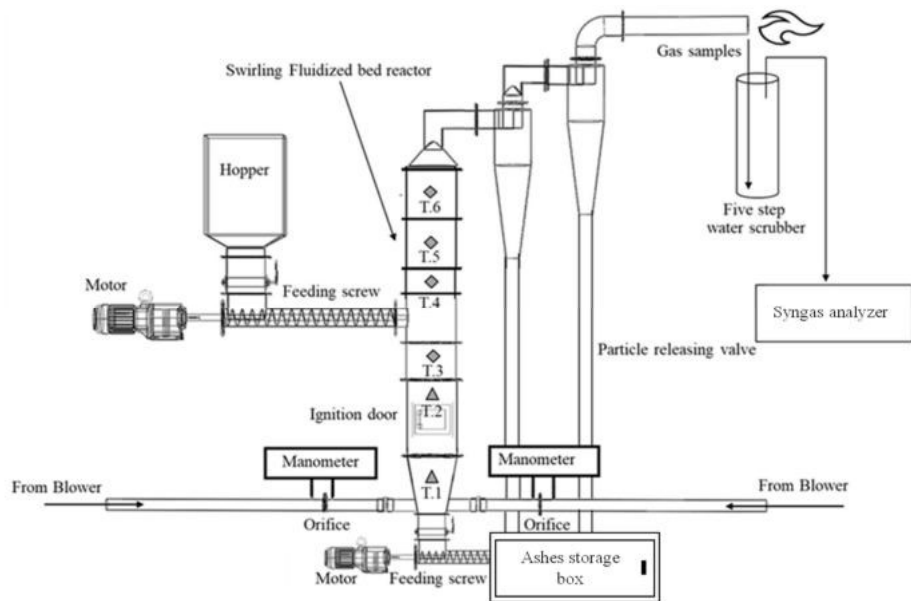
จากการศึกษากระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส คือกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) [6-8] ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของแก๊ส โดยทำให้เกิดการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ โดยควบคุมปริมาณอากาศเข้าให้มีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการสันดาปที่สมบูรณ์ แต่จะเกิดความร้อนเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันให้ผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า Syngas ที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจน (H_2)

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ แก๊สมีเทน (CH₄) เตาเผาแบบแก๊สซิฟิเคชันสำหรับผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) เพื่อใช้ในกระบวนการทางความร้อนแบ่งได้ 3 ประเภท [9, 10] คือ เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed gasifier), เตาฟลูอิดไซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์ (Fluidized bed gasifier), และเอนเทรนส์เบดแก๊สซิไฟเออร์ (Entrained bed gasifier) โดยสำหรับงานวิจัยฉบับนี้สนใจเตาเผาในรูปแบบฟลูอิดไซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์ เนื่องจากความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นต่ำ เหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก-กลาง ใช้พื้นที่น้อย เหมาะกับชีวมวลที่มีลักษณะเป็นผงหรือมีขนาดเล็ก เช่น กากปาล์ม ชีลื้อย แกลบ เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับเชื้อเพลิงชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร ในพื้นที่ทางตอนใต้ของประเทศไทย พบว่า ชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนใหญ่จะถูกส่งไปยังโรงไฟฟ้าชีวมวลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ เช่น เศษไม้ยางพารา กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มน้ำมัน เป็นต้น แต่ยังมีชีวมวลเหลือใช้ที่ยังไม่ได้ถูกใช้งานมากนัก ก็คือกากปาล์มน้ำมันแบบหีบรวมเมล็ดในปาล์ม (Mixed palm cake) ซึ่งกากปาล์มน้ำมัน จะมีลักษณะเป็นผงและมีปริมาณความชื้นที่สูงกว่าเชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไป [11] มีความเหมาะสมในการนำมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

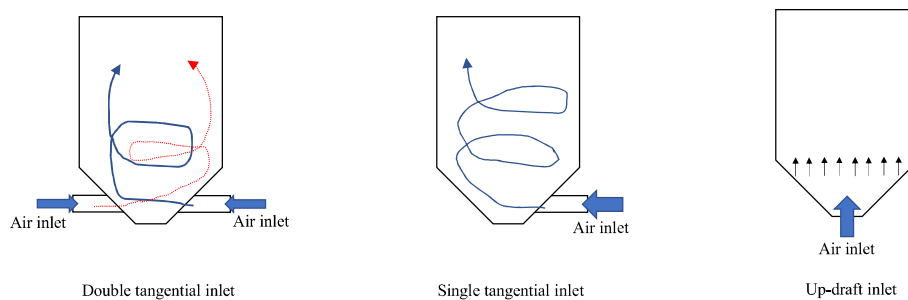
ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการนำกากปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาฟลูอิดไซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์ โดยกำหนดรูปแบบท่อทางเข้าของอากาศเป็น 3 รูปแบบ คือ ท่อทางเข้าด้านข้างสองทาง ท่อทางเข้าด้านข้างทางเดียว และท่อทางเข้าแบบไหลขึ้น โดยจะควบคุมปริมาณอากาศและปริมาณของเชื้อเพลิงเท่ากันทุกกรณี เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์ของแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

วิธีการวิจัย

ภาพที่ 1 แสดงไดอะแกรมของเตาฟลูอิดไซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์ เตามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร และมีความสูง 1.5 เมตร โดยชุดเตาฟลูอิดไซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์ ประกอบด้วยโบลเวอร์สำหรับดูดอากาศแล้วส่งผ่านไปยังออริฟิสเพื่อวัดอัตราการไหล จากนั้นอากาศจะไหลเข้าเตาทางตำแหน่งท่อทางเข้าที่กำหนดไว้ 3 รูปแบบตามที่ได้แสดงในภาพที่ 2 คือ ท่อทางเข้าด้านข้างสองทาง (Double tangential inlet) ท่อทางเข้าของอากาศไหลเข้าทางเดียว (Single tangential inlet) และท่อทางเข้าแบบไหลขึ้น (Updraft inlet) เพื่อทำให้เกิดรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจะป้อนเข้าทาง ฮอปเปอร์ที่อยู่ด้านบนของสกรูลำเลียง จากนั้นจะถูกส่งเข้าเตาปฏิกรณ์โดยผ่านสกรูลำเลียงที่สามารถควบคุมอัตราการไหลของชีวมวลโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) เชื้อเพลิงชีวมวลจะตกลงสู่ด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ จากนั้นจะถูกเผาไหม้ในสภาวะที่อากาศถูกควบคุมตามอัตราส่วนสมมูลต่างๆ ให้เกิดการเผาไหม้ ในส่วนของชีเถ้าจะหล่นกองอยู่ด้านล่างของเตาและถูกลำเลียงโดยใช้สกรูลำเลียงเก็บในกล่องใส่ชีเถ้า โดยชีเถ้าจะถูกนำไปทิ้งเมื่อทดลองเสร็จ สำหรับแก๊สที่เกิดขึ้นจะไหลขึ้นด้านบนของเตาแล้วไหลเข้าไซโคลนเพื่อกรองฝุ่นและชีเถ้าลอยที่อยุ่ในแก๊สเชื้อเพลิงออก จากนั้นแก๊สเชื้อเพลิงจะถูกวิเคราะห์คุณภาพของแก๊สโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Infrared Syngas Analyzer Gasboard-3100, China)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเตาฟลูอิดไคซ์เบดแก๊สซิฟิเคชัน



(ก) ท่อทางเข้าด้านข้างสองทาง (ข) ท่อทางเข้าของอากาศไหลเข้าทางเดียว (ค) ท่อทางเข้าแบบไล่ขึ้น

ภาพที่ 2 รูปแบบทางเข้าอากาศของของเตาฟลูอิดไคซ์เบดแก๊สซิฟิเคชัน

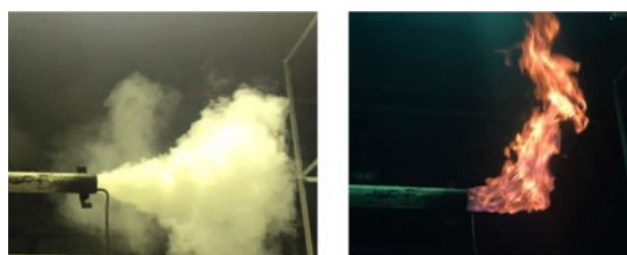
วิธีการทดลองเริ่มจากการป้อนเชื้อเพลิงกากปาล์มที่ได้จากโรงสกัดน้ำมันปาล์มแบบหีบรวมเมล็ดในปาล์ม ในปริมาณ 250 กรัม เข้าไปในเตาฟลูอิดไคซ์เบดแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อทำการจุดไฟเริ่มต้นกระบวนการทดลอง จากนั้นจะเริ่มป้อนอากาศที่อัตราส่วนสมมูลคงที่ (Equivalent ratio) ที่ 0.3 ในทุกการทดลอง และรอจนกว่าไฟด้านในเตาจะติด จากนั้นจะเริ่มป้อนเชื้อเพลิงกากปาล์มลงอย่างต่อเนื่องโดยมีอัตราการป้อนอยู่ที่ 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยในขั้นตอนนี้จะใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 60 นาที

ในระหว่างการทดลอง ได้บันทึกข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาทุกๆ 1 นาที โดยใช้เครื่อง Data logger (Hioki LR8400-20, Japan) ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ตามที่ได้ระบุจุดวัดตำแหน่งต่างๆดังที่แสดงในภาพที่ 1 โดยที่ตำแหน่ง T.1 จะเลือกใช้โมเทอร์คัปเปิล ชนิดเอส (Type-S) ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้วัดในที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะโซนที่มีการเผาไหม้ ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้สามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง 1,600 องศาเซลเซียส สำหรับตำแหน่งที่เหลือใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Type-K) ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ไม่เกิน 1,300 องศาเซลเซียส และในส่วนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จะถูกส่งเข้าไปในระบบล้างแก๊ส (Wet scrubber) เพื่อกำจัดอนุภาคฝุ่นและทาร์ ก่อนที่จะนำแก๊สไปวิเคราะห์องค์ประกอบของ

แก๊ส [12, 13] ซึ่งประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) แก๊สมีเทน (CH₄) และความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สตามที่ได้กล่าวข้างต้น

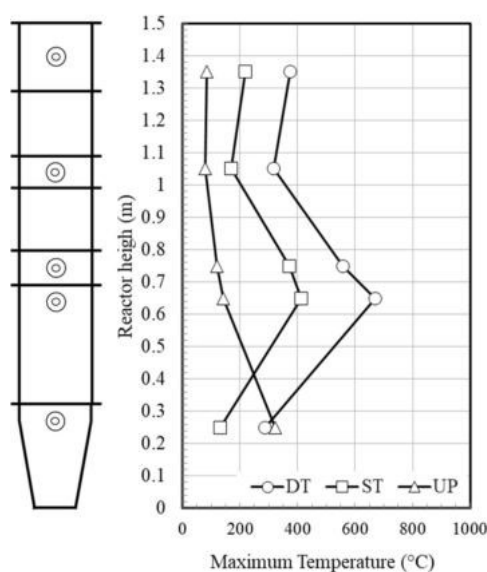
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ของเตาฟลูอิดไธด์เบดแก๊สซิฟิเคชัน โดยภาพที่ 3 (a) เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีลักษณะสีขาว-เทา ซึ่งเป็นลักษณะของแก๊สเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถนำมาเผาไหม้ได้ซ้ำ เนื่องจากควบคุมอยู่ในช่วงอัตราส่วนสมมูลสูง (ER=1) และในภาพที่ 3 (b) แสดงเปลวไฟที่มาจากกาเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ เนื่องจากควบคุมอยู่ในช่วงอัตราส่วนสมมูลต่ำ (ER=0.3) ซึ่งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ไฮโดรคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้สามารถจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง



(a) แก๊สที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (จุดแล้วไม่ติดไฟ) (b) แก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้

ภาพที่ 3 ลักษณะของแก๊สเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้และเปลวไฟที่เผาแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้

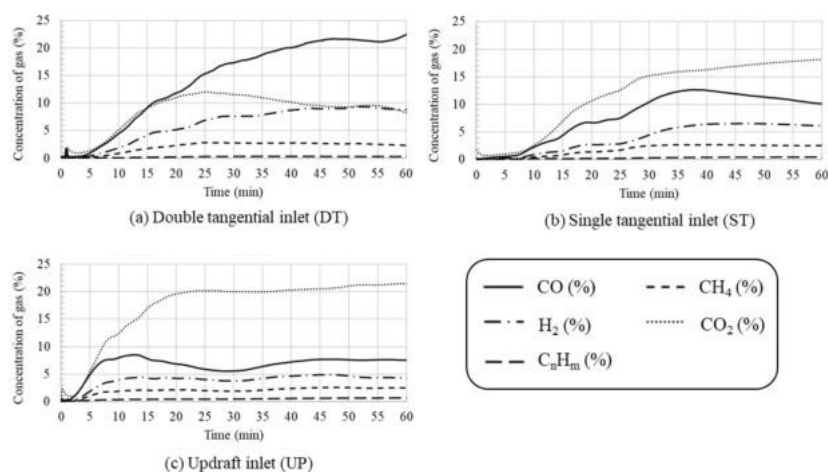


ภาพที่ 4 โปรไฟล์ของอุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาฟลูอิดไธด์เบดแก๊สซิฟิเคชัน

ภาพที่ 4 แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาฟลูอิดไธด์เบดแก๊สซิฟิเคชัน กรณีท่อทางเข้าอากาศ 3 แบบ คือ ท่อทางเข้าด้านข้างสองทาง (DT) ท่อทางเข้าด้านข้างทางเดียว (ST) และท่อทางเข้าแบบอากาศไหลขึ้น (UP) โดยแสดงในช่วงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงสุดในช่วงระหว่างกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน พบว่า รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบเข้าด้านข้างสองทาง

(DT) สามารถสร้างโซนการเผาไหม้ภายในเตาได้กว้างที่สุด โดยอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 0.65 เมตร จากระดับล่างสุดของเตา ทำให้เห็นว่าโซนที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกากปาล์มมีโซนการเผาไหม้ที่กว้างกว่ารูปแบบท่อทางเข้าแบบอื่น สำหรับรูปแบบท่อทางเข้าแบบอากาศไหลเข้าทางเดียว (ST) จะเห็นได้ว่ารูปแบบท่อทางเข้าอากาศที่ตำแหน่งล่างสุด 0.25 เมตร มีอุณหภูมิการเผาไหม้ที่น้อยที่สุด เนื่องจากการเผาไหม้เกิดขึ้นเฉพาะตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศที่ด้านข้างของเตา แค่เพียงตำแหน่งเดียว แต่เมื่อระดับสูงขึ้นจะพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื่องจากอากาศที่ไหลเข้าทางด้านข้างมีทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางของเตา ทำให้ระดับที่สูงขึ้นมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น และสำหรับรูปแบบท่อทางเข้าแบบอากาศไหลขึ้น (UP) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 0.25 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าสองทาง แต่เมื่อระดับความสูงของเตาสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิตกลงมาต่ำสุดเมื่อเทียบกับรูปแบบท่อทางเข้าอากาศทั้งหมด เนื่องจากเชื้อเพลิงกากปาล์มมีลักษณะเป็นผง และมีการเติมเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องทำให้ อากาศที่ไหลขึ้นมาจะไหลผ่านขึ้นมาค่อนข้างยากกว่ากรณีอื่นๆ เพราะอากาศมีความเร็วไม่เพียงพอต่อการแทรกให้เกิดการไหลภายในชั้นเชื้อเพลิง

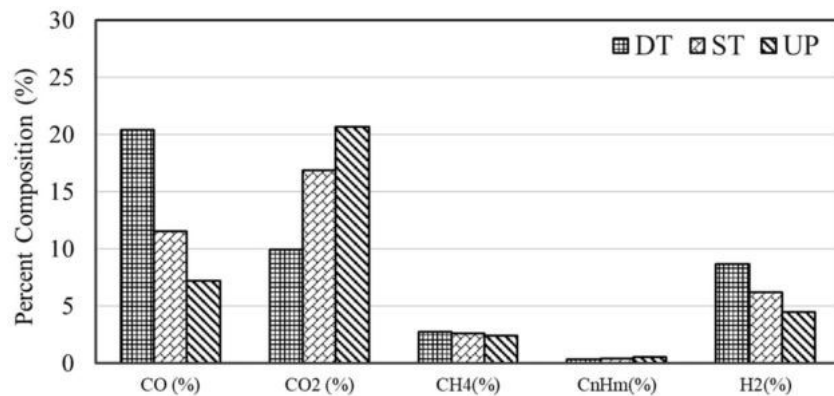
ภาพที่ 5 แสดงองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศทั้ง 3 แบบ โดยองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่นำมาวิเคราะห์ประกอบด้วย แก๊สที่มีคุณสมบัติติดไฟได้อีกครั้งคือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สมีเทน (CH₄) แก๊สไฮโดรคาร์บอน (C_nH_m) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สที่ไม่สามารถติดไฟได้คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สำหรับองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้ท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าสองทางแสดงไว้ในภาพที่ 5(a) ผลของแก๊สเชื้อเพลิงแสดงให้เห็นว่าปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน และไฮโดรคาร์บอนตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีองค์ประกอบแก๊สที่ติดไฟได้มีปริมาณมากกว่ากรณีอื่นๆ สำหรับองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าทางเดียว (ภาพที่ 5(b)) และรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบอากาศไหลขึ้น (ภาพที่ 5(c)) มีลำดับการผลิตแก๊สที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน คือมีปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด (ซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ซ้ำไม่ได้) และตามมาด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทน และไฮโดรคาร์บอน ตามลำดับ



ภาพที่ 5 ผลขององค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงตลอดระยะเวลาการเผาไหม้

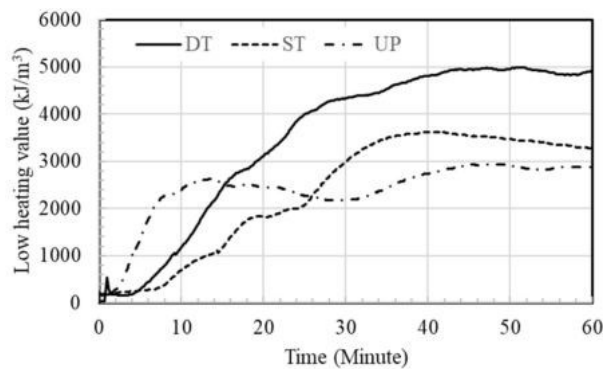
จากผลการทดลองทั้ง 3 รูปแบบท่อทางเข้าอากาศในภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าในช่วงระยะเวลา 0 – 30 นาที เป็นช่วงที่เริ่มต้นกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันทำให้แก๊สเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่หลังจากนาทีที่ 30 จะเห็นได้ว่าปริมาณของแก๊สเชื้อเพลิงมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันตลอดในช่วงนาทีที่ 30 – 60 นาที ซึ่งเป็นสภาวะทำงานของเตาฟลูอิดไรเซดแก๊สซิฟิเออร์อยู่ในช่วงคงตัว (Steady state) ทำให้เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการนำวิเคราะห์คุณภาพของ

แก๊สเชื้อเพลิงของแต่ละรูปแบบท่อทางเข้าอากาศ โดยได้แสดงผลของการเปรียบเทียบขององค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงแต่ละชนิดในช่วงเวลา 30 - 60 นาที ไว้ในภาพที่ 6 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน ของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าสองทาง (DT) มีค่าสูงที่สุด ตามมาด้วยกรณิรูปแบบท่อทางเข้าอากาศไหลเข้าทางเดียว (ST) และท่อทางเข้าอากาศแบบไหลขึ้น (Up) ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สที่กล่าวมาเบื้องต้นล้วนเป็นแก๊สที่มีคุณสมบัติในการเผาไหม้ซ้ำได้ จึงทำให้เห็นว่ารูปแบบท่อทางเข้าอากาศเข้าสองทาง มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



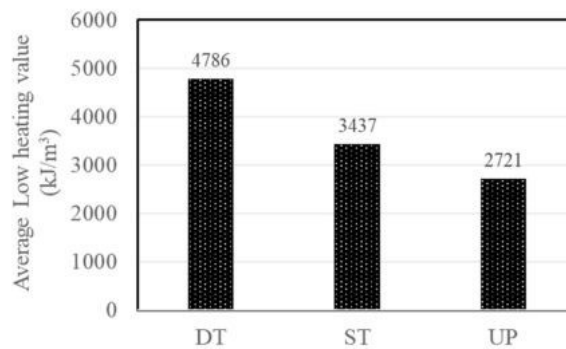
ภาพที่ 6 องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลา 30 – 60 นาที

สำหรับภาพที่ 7 แสดงค่าความร้อนต่ำ (Low heating value) ของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มาจากการเผาไหม้โดยใช้รูปแบบท่อทางเข้าอากาศ 3 รูปแบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะเวลา 0 – 30 ของทุกเงื่อนไขการทดลองเป็นช่วงของการเริ่มต้นกระบวนการ ค่าความร้อนของแก๊สค่อยๆ เพิ่มขึ้น และเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady) หลังจากนาฬิกาที่ 30 เป็นต้นไป จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า รูปแบบท่อทางเข้าอากาศส่งผลต่อค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงโดยตรง โดยรูปแบบท่อทางเข้าที่ให้ค่าความร้อนมีค่าสูงสุดคือรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าสองทาง (DT) ตามมาด้วยรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าทางเดียว และรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบอากาศไหลขึ้น ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (ในช่วงระยะเวลา 0-30 นาที) มีความน่าสนใจเนื่องจากการรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลขึ้นสามารถสร้างแก๊สเชื้อเพลิงได้สูงเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปแก๊สเชื้อเพลิงมีปริมาณลดลงในส่วนนี้เป็นผลมาจากในช่วงเริ่มต้น ปริมาณของเชื้อเพลิงกากปาล์มมีปริมาณน้อย และเมื่อป้อนอากาศจากด้านล่างให้ไหลขึ้น ทำให้พื้นที่ที่อากาศกับเชื้อเพลิงสัมผัสกันแล้วทำให้เกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้มากกว่ารูปแบบท่อทางเข้าอื่นๆ จนทำให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนมากในช่วงแรก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป การเติมเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องทำให้อากาศแบบไหลขึ้นไหลผ่านชีวมวลได้ยากขึ้น ทำให้ไม่สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนในช่วงเริ่มต้นของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าด้านข้างทั้งแบบสองทางและแบบทางเดียว พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกัน และจะเริ่มมีอัตราการเพิ่มขึ้นลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที



ภาพที่ 7 ค่าความร้อนต่ำของแก๊สเชื้อเพลิง

ภาพที่ 8 แสดงค่าความต่ำเฉลี่ยของแก๊สเชื้อเพลิงในช่วงระยะเวลา 30 - 60 นาที โดยค่าความร้อนต่ำเฉลี่ยที่ได้จากการศึกษามีผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆที่ได้ทำการศึกษางานทางด้านค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงโดยใช้รูปแบบเตาฟลูอิดซ์เบดแก๊สซิฟิเคชันและใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง (Campoy และคณะ [14] Kim และคณะ [15] และของ Khezri และคณะ [16]) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนเฉลี่ยของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบสองทาง (DT) มีค่ามากที่สุดถึง 4,786 kJ/m³ ตามมาด้วยรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบทางเดียวที่มีค่าความร้อนเฉลี่ยที่ 3,437 kJ/m³ และกรณีรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลขึ้นมีค่าความร้อนที่ต่ำสุด คือ 2,721 kJ/m³ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนี้ เป็นส่วนช่วยสำคัญที่ทำให้ยืนยันได้ว่ารูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าด้านข้างสองทาง (Double tangential inlet) มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในเตาฟลูอิดซ์เบดแก๊สซิฟิเคชัน



ภาพที่ 8 ค่าความร้อนต่ำเฉลี่ย (Average Low Heating Value) ของแก๊สเชื้อเพลิงในช่วง 30 – 60 นาที

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการทำแก๊สซิฟิเคชันเชื้อเพลิงจากกากปาล์มน้ำมันโดยใช้เตาฟลูอิดซ์เบดแก๊สซิฟิเคชันที่มีรูปแบบท่อทางเข้าอากาศ 3 รูปแบบ คือท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าด้านข้างสองทาง ท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าด้านข้างทางเดียว และท่อทางเข้าอากาศแบบอากาศไหลขึ้น โดยทุกรูปแบบได้ควบคุมอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.3 ผลการทดสอบสรุปได้ดังนี้

1. รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าด้านข้างสองทาง สามารถสร้างโปรไฟล์อุณหภูมิให้อยู่ในช่วงกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันได้สูง เมื่อเทียบกับรูปแบบทางเข้าอากาศทั้งหมด และยังทำให้โซนการเผาไหม้ภายในเตามีโซนการเผาไหม้ที่กว้าง

2. รูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลเข้าด้านข้างสองทางผลิตแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงกว่ากรณีอื่นๆ โดยเฉพาะปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่มีค่าสูงแตกต่างจากรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด

3. ค่าความร้อนเฉลี่ยของรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบสองทางมีค่ามากที่สุดถึง $4,786 \text{ kJ/m}^3$ ตามมาด้วยรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบทางเดียวที่มีค่าความร้อนเฉลี่ยที่ $3,437 \text{ kJ/m}^3$ และกรณีรูปแบบท่อทางเข้าอากาศแบบไหลขึ้นมีค่าความร้อนที่ต่ำสุด คือ $2,721 \text{ kJ/m}^3$

4. รูปแบบท่อทางเข้าอากาศไหลเข้าด้านข้างสองทางเหมาะสำหรับออกแบบระบบฟลูอิดซ์เบดแก๊สซิฟิเคชัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG 6402068S และได้รับการสนับสนุนเงินอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13. **สิ่งแวดล้อมน่ารู้ : พลังงานชีวมวล** สืบค้นเมื่อ 5 สิงหาคม 2565, จาก <http://www.mnre.go.th/>.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). **ชุดที่ 4 คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน (พลังงานชีวมวล)**. กรุงเทพฯ : กระทรวงพลังงาน.
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). **ชุดที่ 7 คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน (เชื้อเพลิงเอทานอล)**. กรุงเทพฯ : กระทรวงพลังงาน.
- [4] ศุภรัฐชา สัตตทุกข์ สกฤทธรา รัตนวิไล กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์ และผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์. (2564). การผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเปลือกเมล็ดกาแฟโดย $Co/HZSM-5$ และ $Ni/HZSM-5$ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบด-นิ่งและไมโครเวฟ. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. 10 (2), 19-39.
- [5] I. Ahmed, and A.K. Gupta (2009). Syngas yield during pyrolysis and steam gasification of paper. **Applied Energy**. 86, 1813-1821.
- [6] Prabir Basu. (2006). **Combustion and gasification in fluidized beds**. Taloy & Francis Group,
- [7] P. Makwana, Asim Kumar Joshi, Gaurav Athawale, Dharminder Singhm, and Pravaker Mohanty. (2015). Air Gasification of rice husk in bubbling fluidized bed reactor with bed heating by conventional charcoal. **Bioresource Technology**. 178, 45-52.
- [8] Rachadaporn Kaewklum, Vladimir I. Kuprianov, and Peter L. Douglas. (2009). Hydrodynamics of air-sand flow in a conical swirling fluidized bed: A comparative study between tangential and axial air entries. **Energy Conversion and Management**. 50, 2999-3006.
- [9] Poramet Arromdee, and Vladimir I. Kuprianov. (2021). Experimental study and empirical modeling of CO and NO behaviors in a fluidized-bed combustor firing pelletized biomass fuels. **Biomass conversion and biorefinery**. 11, 1507-1520.

- [10] Samarjeet Singh Siwal, Qibo Zhang, Changbin Sun, Sourbh Thakur, Vijai Kumar Gupta, and Vijay Kumar Thakur. (2020). Energy production from steam gasification processes and parameters that contemplate in biomass gasifier – A review. **Bioresource Technology**. 297, 1-11.
- [11] Wasu Sukswan, Mohd Faizal Mohideen Batcha, Arkom Palamanit, Makatar Wae-hayee. (2021). The Effect of Biomass Shapes on Combustion Characteristic in Updraft Chamber. **International Journal of Integrated Engineering**. 13 (4), 163-171.
- [12] A. Dufoura, P. Girods, E. Masson, Y. Rogaume, and A. Zoulalian. (2009). Synthesis gas production by biomass pyrolysis: Effect of reactor temperature on product distribution. **International journal of hydrogen energy**. 34, 1726-1734.
- [13] Younes Chhiti and Mohammed Kemih. (2013). Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification: A Review. **The International Journal of Engineering and Science**. 2(3), 75-85.
- [14] Manuel Campoy, Alberto Gómez-Barea, Pedro Ollero and Susanna Nilsson. (2014). Gasification of wastes in a pilot fluidized bed gasifier. **Fuel Processing Technology**. (121), 63-69.
- [15] Young Doo Kim, Chang Won Yang, Beom Jong Kim, Kwang Su Kim, Jeung Woo Lee, Ji Hong Moon, Won Yang, Tae U Yu and Uen Do Lee. (2013). Air-blown gasification of woody biomass in a bubbling fluidized bed gasifier. **Applied Energy**. (112), 414-420.
- [16] Ramin Khezri, Wan Azlina Wan Ab Karim Ghani, Dayang Radiah Awang Biak Robiah Yunus, and Kiman Silas. (2019). Experimental Evaluation of Napier Grass Gasification in an Autothermal Bubbling Fluidized Bed Reactor. **Energies**. (12), 1-18.