

การออกแบบเตาแก๊สชีฟายเออร์แบบไหลลงประสิทธิภาพสูง

A Design of High Efficiency Downdraft Gasifier

ไตรรัตน์ โขสาแสง และ รัชพล สันติวารการ *

Trirat Khosasaeng and Ratchaphon Suntivarakorn*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 40002

Received: 20 ม.ค 59

Accepted: 24 ก.พ 59

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวคิดในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเตาแก๊สชีฟายเออร์แบบไหลลง โดยการออกแบบได้พิจารณาถึงความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาและขนาดของท่ออากาศของเตาแก๊สชีฟายเออร์ พร้อมทั้งการควบคุมปริมาณการใช้อากาศ ออกซิเจน และไอน้ำที่เหมาะสม ทั้งนี้ยังรวมถึงการออกแบบระบบผลิตไอน้ำจากความร้อนภายในเตาแก๊สชีฟายเออร์ เพื่อใช้ไอน้ำในการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาแก๊สชีฟายเออร์ จากการออกแบบพบว่าเตาแก๊สชีฟายเออร์ขนาด 34 กิโลวัตต์สามารถบ้อนวัตถุดิบในอัตรา 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีความสูง 166 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาคอคอด และท่ออากาศ เท่ากับ 44 13.80 และ 1.56 เซนติเมตร ตามลำดับ จากการคำนวณพบว่าระบบสามารถผลิตไอน้ำได้ 13.84 กิโลกรัม ต่อชั่วโมง และต้องใช้ออกซิเจน 2.68 ลบ.ม ต่อชม, หรืออากาศ 13.99 ลบ.ม ต่อชั่วโมง ทั้งนี้เตาที่ออกแบบให้มีระบบการบ้อนไอน้ำและออกซิเจนหรืออากาศ จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเตาแก๊สชีฟายเออร์แบบดั้งเดิมประมาณ 29.60 %

คำสำคัญ: เตาแก๊สชีฟายเออร์แบบไหลลง ก๊าซชีวมวล เครื่องกำเนิดไอน้ำ

Abstract

This work presents a design of high efficiency downdraft gasifier. The height, throat diameter, diameter and size of stove were designed in order to the product gas. The volume control of air, oxygen and steam were also studied in order to increase the efficiency of the gasifier. The steam

system was designed by using the heat recovery from the gasifier . From the study, it was found that the gasifier has the capacity of 34 kw with the fuel feed rate of 15 kg/hr. The hight of the gasifier was 166 cm, and the diameter of stove, throat, and air pipe were 44 ,13.80, 1.56 cm, respectively. From the calculation, this system can produce steam at 13.84 kg/hr and is require oxygen and air equal to 2.68, 13.99 m³/hr, respectively. The efficiency of the designedt downdraft gaifier was 29.60% higher than that of conventional gasifier.

Keywords : downdraft gasifier, producer gas, steam generator

*ติดต่อ: Ratchaphon@kku.ac.th, 043-202845, 043-202849

1. บทนำ

สถานการณ์พลังงานของประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้พลังงานไฟฟ้า ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน จึงทำให้ต้องมีการจัดหาแหล่งพลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อให้เพียงพอับความต้องการ โดยในแต่ละปีประเทศไทยต้องใช้จ่ายเงินจำนวนมากในการจัดหาพลังงานซึ่งส่วนใหญ่ได้จากการนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ต้องสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศเป็นจำนวนมากและมีแนวโน้มที่จะสูงมากขึ้น ดังนั้นการใช้พลังงานทดแทนจึงถือว่ามีมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง นอกจากจะช่วยลดการนำเข้าพลังงานของประเทศได้แล้ว ยังสามารถช่วยลดสภาวะโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

แก๊สซิเคชั่นเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนโดยใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส โดยให้ความร้อนผ่านตัวกลางเช่น อากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ ในสภาวะออกซิเจนน้อย ซึ่งจะได้เชื้อเพลิงก๊าซหรือที่เรียกว่าแก๊สเชื้อเพลิง (Syngas) อันประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH₄) และ ไฮโดรเจน (H₂) ซึ่งจะมีค่าความร้อนอยู่ประมาณ 8-20 MJ/m³ ขึ้นกับชนิดของเชื้อเพลิง

แข็ง และประสิทธิภาพของเตาแก๊สซิฟายเออร์ ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้สามารถทดแทนก๊าซหุงต้มในครัวเรือนและผลิตไฟฟ้าโดยใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ก๊าซหรือหม้อต้มไอน้ำ

เตาแก๊สซิฟายเออร์มีหลากหลายรูปแบบ เช่น เตาแก๊สซิฟายเออร์แบบไหลง เตาแก๊สซิฟายเออร์แบบไหลขึ้น เตาแก๊สซิฟายเออร์แบบพลูวโดซ์เบด และเตาแก๊สซิฟายเออร์แบบพลาสมา สำหรับในบทความนี้จะเลือกใช้เตาแก๊สฟายเออร์แบบไหลง เนื่องจาก เตาชนิดนี้ง่ายต่อการใช้งานในชุมชน ก๊าซเชื้อเพลิงมีสิ่งปนเปื้อนน้อย ก๊าซเชื้อเพลิงค่าความร้อนสูง และดูแลรักษาง่าย พร้อมทั้งสามารถติดตั้งคอคอดเพื่อบังคับเชื้อเพลิงให้มารวมกันบริเวณชั้นเผาไหม้ เพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง ซึ่งจะส่งผลให้เตามีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

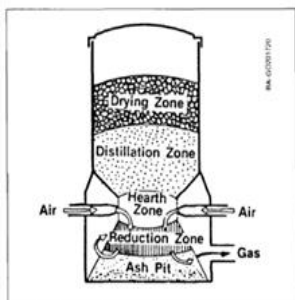
เตาแก๊สซิฟิเคชั่นแบบไหลลงมีการใช้ตัวทำปฏิกิริยาอยู่ 3 ชนิดคือ อากาศ ออกซิเจน และไอน้ำ ออกแบบให้เตาสามารถรองรับการป้อนออกซิเจนและไอน้ำ เนื่องจากออกซิเจนไอน้ำสามารถทำให้คุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงดีขึ้น และมีค่าความร้อนสูงขึ้นจากเตาแก๊สซิฟายเออร์แบบใช้อากาศ โดยในบทความนี้

ได้นำเสนอแนวคิดออกแบบเตาแก๊สซิฟายเออร์แบบไหลลงชนิดคอดอดเดียวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยการควบคุมระบบและเชื้อเพลิงที่เหมาะสม

2. ปฏิกริยาในกระบวนการแก๊สซิฟเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปทางด้านเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion Process) ซึ่งแบ่งเขตการเผาไหม้ออกเป็น 4 เขตดังนี้ (Process Zone)

1) ชั้นเผาไหม้ (Hearth Zone or Combustion Zone) เป็นชั้นที่มีการเผาไหม้สสารของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีคือ คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักเมื่อมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะได้คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ มีอุณหภูมิในการเผาไหม้ประมาณ 1,450 °C



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของเตาแก๊สซิฟายเออร์แบบไหลลง [1]

2) ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone or Gasification Zone) เป็นโซนของการสังเคราะห์ก๊าซติดไฟได้ทั้งหมดเมื่อแก๊สร้อนต่างๆที่เกิดจากการเผาไหม้คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ

รวมถึงเชื้อเพลิงที่แตกตัวในชั้น Pyrolysis คือ ทาร์ จะไหล เข้าสู่ชั้นรีดักชันปฏิกริยา และจะได้ก๊าซที่ติดไฟได้คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน อุณหภูมิในโซนนี้ประมาณ 800-1,000 °C

3) ชั้นกลั่นสลายตัว (Distillation Zone หรือ Pyrolysis Zone) โดยในชั้นนี้เชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากชั้นเผาไหม้ เพื่อสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้สารระเหย ต่างๆออกมาซึ่งประกอบไปด้วย เมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิบ ก๊าซที่เผาไหม้ได้และไม่ได้ อุณหภูมิในชั้นนี้จะประมาณ 280-500 °C ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการในชั้นนี้คือ คาร์บอนในรูปถ่าน

4) ชั้นลดความชื้น Drying Zone สำหรับในชั้นนี้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ โดยที่ความร้อนที่ได้มาจากชั้น Pyrolysis จะระเหยความชื้นที่อยู่ในชีวมวลในรูปของไอน้ำอุณหภูมิในชั้นนี้อยู่ที่ประมาณ 100-135 °C การเพิ่มประสิทธิภาพเตาแก๊สซิฟายเออร์ให้มีประสิทธิภาพสูงสามารถทำได้โดยการออกแบบให้มีไอน้ำเข้าไปผสมกับอากาศหรือออกซิเจนและเชื้อเพลิงซึ่งไอน้ำจะก่อให้เกิดปฏิกริยา water gas shift reaction และ water gas reaction ตามลำดับตามสมการต่อไปนี้



ไอน้ำเมื่อทำปฏิกริยาดูดความร้อนกับคาร์บอนจะทำให้อุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 600-800 °C

ก่อให้เกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรเจน เรียกว่า water gas reaction หากมีไอน้ำมากเกินไป อาจทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนได้ เรียกว่า water gas shift reaction จะเห็นได้ทั้ง 2 สมการ จะ ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ซึ่ง จะช่วยทำให้ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงสูงขึ้น อัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเตาก๊าซซีฟายเออร์สูงตามไป ด้วย

3. หลักการและสมการการออกแบบ

การออกแบบเตาแก๊สซีฟายเออร์ต้องคำนวณหา ค่าความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ ต่างๆ โดยมีสมการในการออกแบบดังนี้

3.1 การคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของเตา ก๊าซซีฟายเออร์

สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่างนี้ [2]

$$D = \left(\frac{1.27FCR}{SGR} \right)^{0.5} \quad (3)$$

เมื่อ FCR คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/hr SGR คือ Specific gasification rate, kg/m²-hr ซึ่งการหา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาจะต้องทราบการป้อน เชื้อเพลิงและ Specific gasification rate ของ เชื้อเพลิงนั้นๆ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณเส้นผ่าน ศูนย์กลางได้จากความสัมพันธ์ของคอคอดในกรณี ออกแบบเตาแก๊สซีฟเคชั่นแบบคอคอดเดียว ได้หา จากสมการของ [3] คือ

$$B_g = 2.5B_s \quad (4)$$

เมื่อ B_g คือ ปริมาณการเกิดโปรดักต์ก๊าซต่อ พื้นที่หน้าตัด, m³/(cm².h) มีค่าประมาณ 0.3-1.0 B_s คือ ปริมาณเชื้อเพลิงต่อพื้นที่หน้าตัด, kg/(cm².h) ซึ่งจะสามารถหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเตาได้ โดยหาจากความลาดเอียงของคอคอดที่ลาดเอียงจาก ผนังเตาไปหาคอคอดโดยมีความลาดเอียงที่เหมาะสม ที่ 45-60 องศา [4]

3.2 การคำนวณการหาความสูงของเตา

ความสูงของเตาสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$H = \frac{SGR \times T}{P_{rh}} \quad (5)$$

เมื่อ T คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา(hr) P_{rh} คือ ความหนาแน่นเชื้อเพลิง(kg/m³)โดยวิธีนี้จะต้องทราบ ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงSpecific gasification rate และเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ [2] ทั้งนี้การหาความสูงของเตาก็สามารถหาได้ จากสมการ [3]

$$H = \frac{m}{\rho A} \quad (6)$$

โดย m คือ จำนวนเชื้อเพลิง (kg) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของเตา (m²) [3]

3.3 การหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิง

อัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีหน่วยเป็น kg/hr เหมาะ สำหรับผู้ออกแบบระบบที่ทราบค่าพลังงานที่ผลิตได้ ของระบบ (Energy output) ที่ชัดเจนแน่นอน ซึ่ง เหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบเพื่อรองรับ เครื่องยนต์ก๊าซเพื่อผลิตระบบไฟฟ้า สามารถหาจาก สมการ

$$M_f = \frac{Q}{LHV_{bm}\eta} \quad (7)$$

เมื่อ Q คือ พลังงานที่ต้องการ (MW) LHV_{bm} คือ ค่าความร้อนของชีวมวล (KJ/kg) และ η คือ ประสิทธิภาพของระบบก๊าซซิฟิเคชัน [5]

3.4 การคำนวณหาอัตราการป้อนอากาศ

อากาศ มีความสำคัญต่อกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากอากาศ ออกซิเจน หรือไอน้ำ จัดว่าเป็นตัวทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งการป้อนด้วยอัตราที่เหมาะสมจะทำให้อัตราการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงมีปริมาณมากและมีค่าความร้อนสูง โดยการคำนวณหาอัตราการป้อนอากาศหาได้จากสมการ [2]

$$AFR = \frac{\varepsilon \times FCR \times SA}{\rho_a} \quad (8)$$

เมื่อ ε คือ equivalence ratio, 0.3 to 0.4

SA คือ stoichiometric air (kg_{air}/kg_{Fuel})

ρ_a คือ ความหนาแน่นอากาศ ($1.25 kg/m^3$)

โดยอัตราการป้อนอากาศ (AFR) มีหน่วยเป็น (m^3/hr)

3.5 อัตราการป้อนออกซิเจน

สามารถหาได้จากสมการของการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง ซึ่งจำเป็นจะต้องทราบองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และซัลเฟอร์ (S) ของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ ซึ่งสามารถหาความต้องการออกซิเจนในการเผาไหม้สมบูรณ์ (m_{th}) ได้จากสมการ

$$m_{th} = \frac{32C}{12} + 8H + S - O \quad (9)$$

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะใช้ออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาประมาณร้อยละ 20-30 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งอัตราการป้อนออกซิเจนจะสามารถหาได้จากสมการ

$$M_{fo} = m_{th} \times ER \times M_f \quad (10)$$

เมื่อ M_{fo} = อัตราการป้อนออกซิเจน (kg/hr)

ER= Equivalent ratio มีค่าประมาณ 0.20-0.35

[6] M_f = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/hr)

3.6 อัตราการป้อนไอน้ำ

ไอน้ำมีความสำคัญเนื่องจากไอน้ำทำปฏิกิริยาดูดความร้อนกับคาร์บอนจะทำให้อุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ $600-800^\circ C$ ก่อให้เกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์และไฮโดรเจน เรียกว่า water gas reaction หากมีไอน้ำมากเกินไปอาจทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนนอกไซด์ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนได้ เรียกว่า water gas shift reaction [7] การคำนวณปริมาณไอน้ำ (m_{in}) ที่เหมาะสมหาได้จากสมการ

$$(M_{in}) = 18 \frac{M_f C}{12} (s/c) \quad (11)$$

เมื่อ M_f = อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/hr)

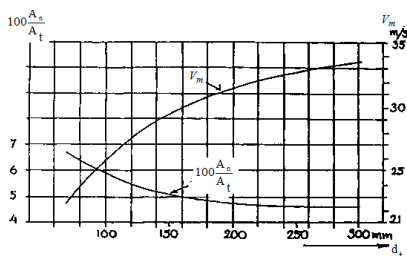
C = สัดส่วนของคาร์บอนของเชื้อเพลิง

s/c = อัตราส่วนระหว่างมวลของโมลาร์ไอน้ำ

ต่อโมลาร์คาร์บอนของเชื้อเพลิง มีค่าระหว่าง 2-2.5 [8]

3.7 การคำนวณหาขนาดของท่ออากาศ

ความเร็วของอากาศมีความสำคัญต่อ การแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากความเร็วของอากาศที่เหมาะสมจะทำให้เกิดอากาศเกิดการคลุกเคล้ากับ เชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี อันมีผลต่อประสิทธิภาพของ เตา โดยความเร็วของท่ออากาศจะแปรผกผันกับ ขนาดของท่ออากาศ ซึ่งการหาขนาดท่ออากาศหาได้จาก รูปที่ 2 เมื่อสมมติให้ A_n เท่ากับจำนวนท่อ A_t คือ พื้นที่หน้าตัดท่อแต่ละเส้น และ d_t เท่ากับ เส้นผ่าน ศูนย์กลางคอคคอด



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ท่ออากาศกับเส้น ผ่านศูนย์กลางคอคคอด [4]

3.8 การหาประสิทธิภาพเตาแก๊สซิฟายเออร์

ประสิทธิภาพของเตาแก๊สซิฟายเออร์ (η) สามารถหาได้จากสมการ [5]

$$\eta = \frac{Q_g M_g}{LHV_f M_f} \times 100 \quad (12)$$

เมื่อ Q_g คือ ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง (MJ/kg)

M_g คือ อัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (m^3/hr)

LHV_f คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

3.9 การหาขนาดของเตาแก๊สซิฟายเออร์ (Energy output (kw))

ขนาดของเตาแก๊สซิฟายเออร์หรือพลังงานที่ผลิต ได้ (Energy output)หาได้จากสมการ [5]

$$Q = \frac{M_f \times \eta \times LHV_f}{3,600} \quad (13)$$

M_f คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/hr)

เมื่อ η ของเตาแก๊สซิฟายเออร์มีค่าระหว่าง 0.6-0.75

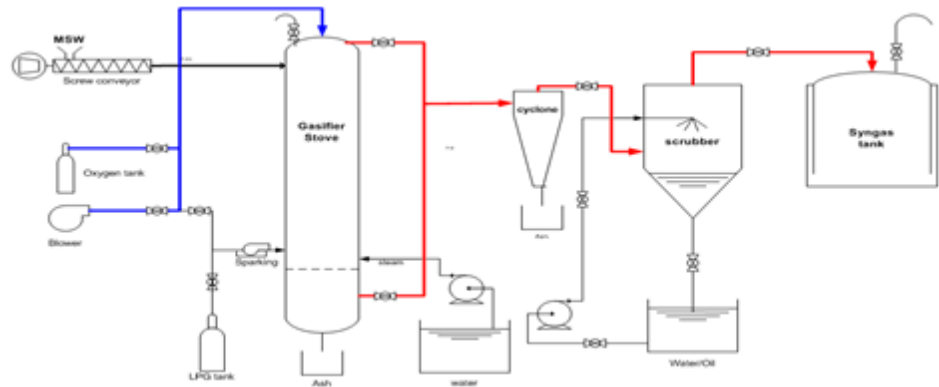
4. แนวทางการออกแบบ

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันประกอบไปด้วย เตาแก๊สซิฟายเออร์ ไฮโคลน และสกรับเบอร์ รูปที่ 3 สำหรับบทความวิชาการฉบับนี้ผู้วิจัยได้มุ่งเน้นเฉพาะ การออกแบบเตาแก๊สซิฟายเออร์แบบไหลลงชนิดคอคคอดเดียว โดยใช้ขยะชุมชนเป็นเชื้อเพลิงโดยมีขั้นตอน การออกแบบตามรูปที่ 4

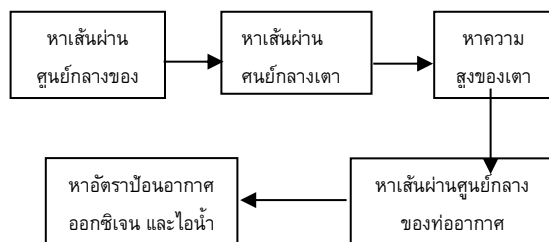
สำหรับการออกแบบที่ผู้วิจัยเลือกใช้เตาแก๊สซิฟายเออร์แบบคอคคอดเดียวนั้น เนื่องจากเชื้อเพลิง จะมีการบีบตัวกันแน่นบริเวณคอคคอดเกิดปฏิกิริยาได้ดี และเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงทำให้เกิดก๊าซเชื้อเพลิงในปริมาณที่มากกว่าแบบไม่มีคอคคอด โดยตัวอย่างการออกแบบมีขั้นตอนและวิธีการ ดังต่อไปนี้

4.1 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางคอคคอด (Throat diameter)

ในการหาเส้นผ่านศูนย์กลางเตาเบื้องต้น จะต้องกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงในหน่วยของ



รูปที่ 3 ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน



รูปที่ 4 ขั้นตอนการออกแบบเตาแก๊สซิฟายเออร์แบบไหลลงชนิดคอคคอดเดียว

กิโลกรัม ต่อชั่วโมง และค่า Heat load ในหน่วยของ $\text{Nm}^3/\text{s.m}^2$ จาก

$$(B_g) = \frac{\text{Volumetric Production rate}}{\text{Heat Cross sectional area}} \quad (14)$$

$$(B_s) = \frac{\text{Mass of fuel gasifier}}{\text{Heat Cross sectional area}} \quad (15)$$

จากสมการที่ (4) $B_g = 2.5B_s$ จะได้

$$B_g = 2.5 \times \frac{\text{Mass of fuel gasifier}}{\text{Heat Cross sectional area}} \quad (16)$$

เมื่อ $B_g = 0.25 \text{ Nm}^3/\text{s.m}^2$ และ Mass of fuel gasifier = 15 kg/hr จะได้

$$\text{Heat cross section area} = 2.5 \times \frac{\text{Mass of fuel gasifier}}{B_g}$$

$$\text{Heat cross section area} = 2.5 \times \frac{15}{0.25}$$

จะได้ Heat cross section area (A) เท่ากับ 0.015 m^2 และเส้นผ่านศูนย์กลางคอคคอด (Throat diameter) มีค่าเท่ากับ 0.138 เมตร

4.2 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาแก๊สซิฟายเออร์

สามารถหาจากความลาดเอียงของคอคคอดที่ลาดเอียงจากผนังเตาไปหาคอคคอดโดยมีความลาดเอียงที่เหมาะสมที่ 45-60 องศา [4] โดยมีการกำหนดความสูงของ 22 เซนติเมตร จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเตามีค่าเท่ากับ 44 เซนติเมตร โดยที่ความเหมาะสมของความลาดเอียงเท่ากับ 45 องศา

4.3 การหาความสูงของเตาแก๊สซิฟายเออร์

สามารถหาความสูงของเตาแก๊สซิฟายเออร์จากชั้น Reduction zone จนถึงชั้น combustion จะต้องทราบค่า Specific gasification rate (kg/h.m^3), ระยะเวลาปฏิบัติการ (h) และความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m^3) จากสมการ (5) เมื่อ SGR คือ Specific gasification rate (kg/h.m^3) มีค่าประมาณ $1,000 (\text{kg/h.m}^3)$ t คือ ระยะเวลาปฏิบัติการ (hr) เท่ากับ 1 ชั่วโมง ρ คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m^3) โดยที่เชื้อเพลิงอัดแท่ง RDF มีค่าประมาณ 600 kg/m^3 แทนค่า จะได้ ความสูงของเตาแก๊สซิฟายเออร์ (H) เท่ากับ 1.66 เมตร

4.4 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศหรือออกซิเจน

สามารถหาเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศสามารถหาได้จากรูปที่ 2 เมื่อ A_n คือ พื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศ d_t คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอดเท่ากับ 138 mm A_t คือ พื้นที่หน้าตัดของคอคอดมีค่าเท่ากับ เท่ากับ $14,949 \text{ mm}^2$ หรือ 0.0149 m^2

$$A_n = \frac{5.1 \times 0.0149}{100} = 0.000765 \text{ m}^2$$

โดยที่ได้ออกแบบให้มีท่ออากาศจำนวน 4 ท่อ ดังนั้นแต่ละท่อจะมีพื้นที่เท่ากับ $0.000765/4$ เท่ากับ 0.0001913 m^2 ซึ่งจะทำให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศเท่ากับ 0.0156 m หรือ 1.56 cm

4.5 การคำนวณอัตราการป้อนออกซิเจน

เมื่อวิเคราะห์ขยะชุมชนด้วยวิธี Ultimate analysis จะทราบถึงปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน

ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะ ดังนี้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงขยะ [9]

คุณสมบัติของขยะ	ค่าที่ตรวจพบ
Moisture (wt%)	48.00
Proximate analysis (wt% dry basis)	
Volatile matter	46.15
Fixe carbon	7.70
Ash	46.15
Ultimate analysis (wt% dry basis)	
C	30.77
H	4.62
O	17.30
N	0.77
S	0.39
High heating value (kJ/kg)	13,076

จากค่าตรวจวัดได้จะนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาณของออกซิเจนตามสมการ (9) เมื่อ C = 0.3077, H = 0.0462, S = 0.0390 และ O = 0.1730 จะได้ $m_{th} = \frac{32(0.3077)}{12} + 8(0.0462) + 0.0390 - 0.1730$

$$m_{th} = 1.02 \text{ Kgo}_{2v}/\text{Kg}_{\text{Fuel}}$$

การเผาไหม้ที่สมบูรณ์สำหรับขยะจะใช้ ออกซิเจนในการเพื่อใช้ในการสันดาปจะต้องใช้ออกซิเจน $1.02 \text{ kg}_{\text{o}_2}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ แต่กระบวนการแก๊ส

ซีพีเคชั่นจะใช้ออกซิเจนในการสันดาปประมาณร้อยละ 20-35 ของการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งอัตราการป้อนออกซิเจนจะสามารถหาได้จากสมการที่ (10)

$$\text{จะได้ } M_{fo} = 1.02 \times 0.25 \times 15$$

และมีอัตราการป้อนออกซิเจน เท่ากับ 3.83 kg/hr หรือ 2.68 m³/hr

4.6 การคำนวณอัตราการป้อนอากาศ

เมื่อปริมาณออกซิเจนมีอัตราส่วนผสมในอากาศเท่ากับร้อยละ 23.20 จะสามารถคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องการได้ตามสมการนี้

$$M_{fa} = \frac{M_{fo}}{0.232}$$

ซึ่งจะได้ ปริมาณอากาศที่ต้องการ M_{fa} เท่ากับ 3.83/0.232 = 16.50 kg_{air}/hr หรือ 13.99 m³/hr

4.7 การคำนวณปริมาณไอน้ำ

การป้อนไอน้ำสามารถเพิ่มปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์และไฮโดรเจนให้ก๊าซเชื้อเพลิงได้โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$\text{steam rate } (M_{fh}) = 18 \frac{(15)(0.3077)}{12} \quad (2)$$

อัตราการป้อนไอน้ำเท่ากับ 13.84 kg/hr ทั้งนี้ไอน้ำจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซ CO และ H₂ เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูงขึ้นด้วย

4.8 การออกแบบระบบไอน้ำ

ออกแบบโดยใช้ความร้อนภายในเตาเพื่อแลกเปลี่ยนกับน้ำในอยู่ภายในเขตท่อทองแดง โดยทำการพันขดลวดทองแดง อยู่ภายในเตาระหว่างชั้นผนังคอคอดกับผนังของเตา โดยมีการคำนวณตามหลักการถ่ายโอนความร้อนตามสมการ

เปลี่ยนกับน้ำในอยู่ภายในเขตท่อทองแดง โดยทำการพันขดลวดทองแดง อยู่ภายในเตาระหว่างชั้นผนังคอคอดกับผนังของเตา โดยมีการคำนวณตามหลักการถ่ายโอนความร้อนตามสมการ

$$T_b = (T_i - T_w) \exp\left(-\frac{hA}{mc_p}\right) + T_w \quad (17)$$

เมื่อ T_b คืออุณหภูมิน้ำขาออก (°C)

T_i คืออุณหภูมิน้ำขาเข้า 25°C

T_w คือ อุณหภูมิของท่อทองแดง 600°C

โดยอุณหภูมิท่อทองแดงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิภายในเตา

h คือ ค่าการพาความร้อนของน้ำ 100 w/(m².k)

A คือพื้นที่ของท่อทองแดง เมื่อ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทองแดงเท่ากับ 8 mm. และ

มีจำนวนขดจำนวน 15 ขด แต่ละขดมีเส้นรอบวง 0.025 m. จะมีพื้นที่ท่อทองแดงเท่ากับ

0.57 m² ดังแสดงในรูปที่ 5 และเมื่อกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำ 13.84 ลิตร ต่อ ชั่วโมง

ค่าความจุจำเพาะของน้ำ 4,181 J/Kg.C เมื่อแทนค่าใน (17) จะได้ อุณหภูมิน้ำขาออกเท่ากับ 119.10 °C ภาพของเตาแก๊สซีฟายเออร์ที่ออกแบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 6

5. ขนาดและประสิทธิภาพของเตาแก๊สซีฟายเออร์

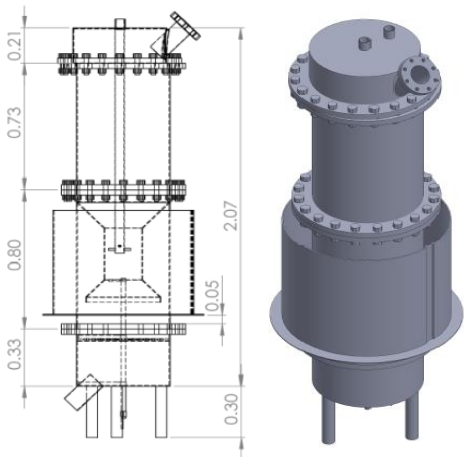
จากตารางที่ 2 แสดงค่าเปรียบเทียบคุณลักษณะของเตาแก๊สซีฟายเออร์แบบดั้งเดิมและแบบเติมออกซิเจนและไอน้ำ [7] สามารถนำข้อมูลไปหาประสิทธิภาพของเตาแก๊สซีฟายเออร์แบบดั้งเดิมและแบบเติมออกซิเจนและไอน้ำ ได้จากสมการที่ (12)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบองค์ประกอบของเตาแก๊สซิฟายเออร์แบบดั้งเดิมและแบบเติมออกซิเจนและไอน้ำ [7]

Characteristic	Air Gasification	Oxygen/steam Gasification
High heating value (kJ/kg)	20,540	20,540
Feed rate (kg/hr, wet basis)	7.20	7.92
Air (Nm ³ /hr)	7.98	-
O ₂ (Nm ³ /hr) (95%)	-	2.00
Steam (kg/hr)	-	3.20
Gas yield (Nm ³ /kg, wet basis)	0.94	1.32
Lower heating value (MJ/Nm ³)	5.17	9.75



รูปที่ 5 ท่อขดทองแดงสำหรับผลิตไอน้ำ



รูปที่ 6 เตาแก๊สซิฟายเออร์แบบไหลลงชนิดคอคคอดีียว

โดยศึกษาแล้วพบว่าเตาแก๊สซิฟายเออร์แบบไหลลง
ดั้งเดิมมีประสิทธิภาพ 33% และเตาแก๊สซิฟายเออร์
แบบเติม อากาศมีประสิทธิภาพ 62.60% และพบว่า
เตาแก๊สซิ ฟายเออร์แบบเติมออกซิเจนและไอน้ำมี
ประสิทธิภาพมากกว่าเตาแก๊สซิฟายเออร์แบบ
ดั้งเดิมอยู่ 29.60% ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวอ้างอิง
จาก Lv P, Yuan Z, Ma L, Wu C, Chen Y, and
Zhu J.1[7] และจะถูกนำไปใช้วิเคราะห์ข้อมูลจริงที่
ได้จากการทดลองเมื่อใช้กับเตาที่ออกแบบใหม่นี้
ต่อไป

ขนาดหรือพลังงานที่ผลิตได้ของเตาแก๊สซิฟาย
เออร์สามารถหาได้จากสมการที่ (13) เมื่อ อัตราการ
ป้อนเชื้อเพลิง 15 kg/hr ประสิทธิภาพของเตา
62.60% ค่าความร้อนเชื้อเพลิงเท่ากับ จะได้ 13.08
MJ/kg จะได้

$$Q = \frac{15 \times 0.626 \times 13.08}{3,600}$$

ขนาดของเตาแก๊สซิฟายเออร์ เท่ากับ 34 kw

6. สรุป

การออกแบบเตาแก๊สชีวภาพแบบไหลลงชนิดคอคอดเดียวโดยขยะชุมชนเป็นเชื้อเพลิง สามารถจะคำนวณความสูงของเตาแก๊สชีวภาพได้ 1.66 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.44 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด 13.80 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศ 1.56 เซนติเมตร เมื่อทำการเดินระบบจะต้องใช้ออกซิเจน 3.83 kg/hr ($2.68 \text{ m}^3/\text{hr}$), หรืออากาศ 16.50 $\text{kg}_{\text{air}}/\text{hr}$ ($13.99 \text{ m}^3/\text{hr}$) และไอน้ำ 13.84 kg/hr โดยเตาที่มีการป้อนออกซิเจนและไอน้ำจะมีขนาด 34 kw และมีประสิทธิภาพสูงกว่าเตาที่ใช้อากาศประมาณ 29.60 % ซึ่งการออกแบบดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดด้วย จึงจะทำให้เตาแก๊สชีวภาพที่ออกแบบมีความเหมาะสมกับเชื้อเพลิงและได้ประสิทธิภาพสูงสุด

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ที่ได้จัดสรรเงินกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน เงินทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษาประจำปีงบประมาณ 2558 และขอขอบคุณกลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Reed TB, Das A. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System. ERI/SP-271- 3022 DE88001135, UC Cate goty. 1988; 245.
- [2] Alexis TB. Rice husk Gas Stove Handbook. Appropriate Technology Center, Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture Central Philippine University; 2005.
- [3] Ojolo SJ, Orisaleye JI. Design and Development of a Laboratory Scale Biomass Gasifier. Journal of Energy and Power Engineering, 2010,4,8.
- [4] FAO. Industrial Charcoal Making. Wood Carbonization and The Product It Makes. FAO:Document repository;Chapter 2;1985.
- [5] Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction, Practical Design and Theory. Dalhousie University and Greenfield Research Incorporated, Elsevier; 2013.
- [6] Umberto A. Process and Technological Aspects of Municipal Solid Waste Gasification. A review. Waste Management, 2012; 32: 625-639.

- [7] Lv P, Yuan Z, Ma L, Wu C, Chen Y, Zhu J. Hydrogen-rich Gas Roduction from Biomass Air and Oxygen/steam Gasification in a Downdraft Gasifier. *Renew Energy*. 2007; 32(13): 2173-85.
- [8] Probststein, RF, Hicks RE. *Synthetic Fuels*. Dover Publications, 2006; 63: 98-99.
- [9] Chen C, JinYQ, Yan JH , Chi Y. *Simulation of Municipal Solid Waste Gasification in Two Different Types of Fixed Bed Reactors*, 2013; 103: 58-63.